

Endüstri 4.0 Tabanlı Üretim Sistemleri ve Kestirimci Bakım Yaklaşımlarında Dijital İkiz Uygulamalarının İncelenmesi

Özgür AYDIN^{1*}, Erhan AKIN²

¹ Enformatik Bölüm Başkanlığı, Bingöl Üniversitesi, Bingöl, Türkiye

² Bilgisayar Mühendisliği, Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elazığ, Türkiye

*¹ iamozguraydin@gmail.com, ² eakintr@gmail.com

(Geliş/Received: 25/06/2021;

Kabul/Accepted: 17/08/2021)

Öz : Endüstri 4.0 konsepti ile birlikte devam eden dijitalleşme sürecindeki en yeni paradigmalardan biri Dijital İkiz teknolojidir. Dijital ikiz, fiziksel bir varlığın sanal bir temsili olarak tanımlanabilir. Dijital ikizler, bir sistemi gerçek zamanlı kontrol etme, izleme imkanları sunmasının yanı sıra çeşitli makine ve derin öğrenme yazılımları ile optimizasyon işlemlerine yardımcı olabilir ve sistemlerin gelecekle ilgili tahminlerde bulunabilir. İt teknolojisindeki gelişmelerin neticesinde cihazlardan elde edilen verilerden beslenen Dijital İkizler, özelleştirilmiş üretim sürecinden başlamak üzere endüstriyel süreçlerin birçok alanında kullanılmaya başlanmıştır. Bu makalede dijital ikiz teknolojisi ele alınmış olup, kestirimci bakım ve üretim süreçlerindeki ürün ve üretim optimizasyonları olmak üzere iki alana odaklanılmıştır. Çalışma, belirlenen bu iki odak noktadaki mevcut son gelişmeleri aktarmayı ve yeni başlayanlar için bir rehber sunmayı amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda literatürde yer alan ve 2015-2020 yılları arasında yayınlanan seksen sekiz çalışma sistematik olarak incelenmiş, analiz edilmiş ve sonuçları irdelenmiştir. Araştırma sonuçları bakımından dijital ikizlerin son iki yılda çok hızlı bir gelişme süreci içerisine girdiği gözlemlenmiştir. Özellikle zaman tasarrufu, bakım giderleri ve üretim maliyetlerinin azaltılması ve üretimdeki risklerin düşürülmesi, bunların yanı sıra üretkenliğin ve kalitenin artırılması gibi faydalarından dolayı endüstride hızlı bir ivme kazandığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler : Dijital İkiz, Kestirimci Bakım, Öngücü Bakım, Üretim Optimizasyonu, Siber-Fizik Sistemler

Examination Of Digital Twin Applications In Industry 4.0 Based Production Systems And Predictive Maintenance Approaches

Abstract : One of the newest paradigms in the digitalization process that continues with the Industry 4.0 concept is Digital Twin technology. A digital twin can be defined as a virtual representation of a physical entity. Digital twins can provide real-time control and monitoring of a system, as well as assist optimization processes with various machine and deep learning software, and make predictions about the future of systems. As a result of the developments in IoT technology, Digital Twins, fed by the data obtained from the devices, have started to be used in many areas of industrial processes, starting with the customized production process. In this article, digital twin technology is discussed and focused on two areas: predictive maintenance and product and production optimizations in production processes. The study aims to present the latest developments in these two identified focal points and provide a guide for beginners. For this purpose, eighty eight studies in the literature published between 2015-2020 were systematically examined, analyzed and their results were examined. It has been observed that digital twins have entered a very rapid development process in the last two years, and they are preferred because of their benefits such as saving time, reducing maintenance and production costs and reducing production risks, as well as increasing productivity and quality.

Keywords: Digital Twin, Predictive Maintenance, Production Optimization, Cyber-Physics Systems

1. Giriş

James Harrington'un “Ölçemezseniz anlayamazsınız. Anlayamazsanız kontrol edemezsiniz. Kontrol edemezseniz daha iyiye götüremezsiniz” söylemi günümüz dijital dönüşüm paradigmalarnın temelinde yatan ana fikir olarak karşımıza çıkmaktadır. İşletmelerin, imalat maliyetlerini düşürme, ürünlerini daha kısa sürede ve planlı bir şekilde üretme, siparişlere daha hızlı yanıtlar verebilme ve tüm bunları yaparken istenmedik üretim aksaklıklarını ortadan kaldırma ihtiyaçları, değişen pazarlama ortamında önemli bir konu haline gelmiştir. Bu bağlamda, Endüstri 4.0'ın yaygınlaşması ile birlikte faaliyetlerine devam etmek isteyen firmalar, tüm bu zorlukların üstesinden gelebilecek gerçek zamanlı karar verebilme yetisine sahip araçları kendi firmaları için uyarlama ve geliştirme çabası içine girmişlerdir. Endüstri 4.0'ın en temel unsuru süreçlerin tam

* Sorumlu yazar: iamozguraydin@gmail.com .Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-8130-277X, ² 0000-0001-6476-9255

otomatikleştirilecek bir biçimde iletilemesidir. Verinin toplanmasından üretim süreçlerinin optimizasyonuna, verimliliğinin ve esnekliğinin artırılmasına kadar olan tüm sürecin akıllı üretim başlığı altında yürütülmesi hayati önem taşımaktadır. Gerçek anlamıyla akıllı bir üretim, gerçek zamanlı izleme, simülasyon sistemleri ve tahminlere dayalı yazılımlar ile verimliliği ve esnekliği arttırmayı amaçlamaktadır. IoT, büyük veri, sanal gerçeklik, makine öğrenmesi, derin öğrenme yazılımları ve 5G gibi teknolojilerinin ortaya çıkmasıyla birlikte, bugün üretim sistemlerinde fiziksel kaynaklar ile sanal olanlar arasındaki yüksek hızda bağlantı mümkün hale gelmektedir [1, 2].

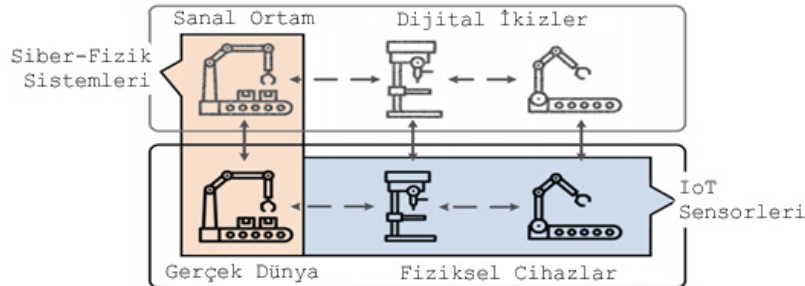
Dijital ikiz, fiziksel bir modelin sanal olarak temsil edildiği bir teknolojidir [3]. Dijital ikizler, sensör teknolojilerine bağlı gelişmeler ile birlikte bir ürünün, sürecin ya da bir unsurun gerçek zamanlı izlenmesini ve görsel olarak modellenmesini mümkün kılmaktadır. Üretim süreçlerinin farklılığından başlamak üzere, bu süreçlerdeki veri ve bilgilerin çeşitli olmasına, karmaşıklığına, verinin elde edilme biçimine ve hatta farklı lokasyonlara aktarım performansına, verinin hacmi gibi farklı başlıklardan dolayı dijital ikiz teknolojilerinde henüz kabul görmüş bir standart, yöntem ya da frame-work bulunmamaktadır. Bu nedenle her işletme, ürün ya da süreç için entegrasyon farklılıkları gözlemlenmektedir. Doğru bir şekilde geliştirilmiş ve uygulanmış bir dijital ikiz modeli, sistemler üzerinde güvenliğini arttırabilir [4]. Aynı zamanda, ürünlerin üretim maliyetlerini azaltırken, süreç yönetimine katkıda bulunabilir. Diğer taraftan çoğu zaman işletmeler arızalara tepkileri anlık olarak vermekte (reaktif bakım) veya belirli zaman aralıklarıyla gerçekleştirmektedir (önleyici bakım). Bu iki yaklaşım, üretimin istenmedik şekilde aksamasına dolayısıyla boşa zaman harcanmasına, üretim kayıplarına neden olmaktadır. Aynı durum henüz ömrü tamamlanmamış bileşenlerin erken değiştirilmesinde de gözlemlenmektedir. Arızanın henüz daha meydana gelmeden tespitine yönelik tahmin yöntemlerinin geliştirilmesi ile birlikte kestirimci bakım paradigması ortaya çıkmıştır. Böylece bileşen ve süreçlerin Kalan Faydalı Ömür (Remaining Useful Life (RUL)) tahmin edilmesine dayalı teknikler için istatistiksel ve algoritmalar geliştirilmeye başlanmıştır. Kestirimci bakım teknikleri ile bir arızayı tahmin etmek ve bakımı daha optimum düzeyde planlamak mümkün hale gelmiştir.

Dijital ikizlerin son iki yılda çok hızlı bir gelişme süreci içerisine girdiği, özellikle zaman tasarrufu, bakım ve üretim maliyetlerinin azaltılması ve üretimdeki risklerin düşürülmesi bunların yanı sıra üretkenliğin ve kalitenin artırılması gibi faydalarından dolayı tercih sebebi olduğu gözlemlenmiştir. Bu gözlemler, dijital ikizlerin önümüzdeki yıllarda geleneksel üretim süreçlerinin değişiminde yüksek derecede önemli ve vazgeçilmez bir role sahip olacağı düşündürmektedir.

Dijital ikiz modelleri ile farklı uygulamalar hakkında son dönemde birçok çalışma yayınlanmıştır. Literatür araştırmasına dayanan bu çalışmada ise dijital ikiz teknolojisinin kestirimci bakım ve üretim süreçlerindeki ürün ve üretim optimizasyonları olmak üzere iki alana odaklanılmıştır. Çalışma, belirlenen bu iki odak noktadaki mevcut son gelişmeleri aktarmayı ve yeni başlayanlar için bir rehber sunmayı amaçlamaktadır.

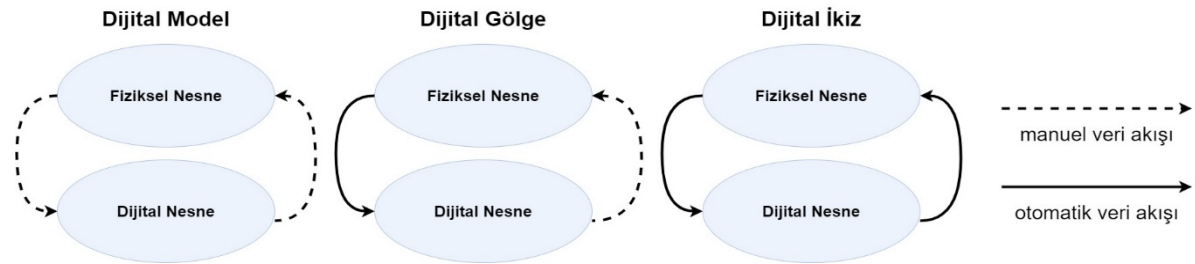
2. Dijital İkiz (Dİ) Teknolojisinin Kuramsal Esasları

Dijital Dönüşüm, Nesnelerin İnterneti (IoT), siber-fizik sistemler, akıllı sistemler ile birlikte hayatımıza Dijital İkiz (Dİ) fikri, Endüstri 4.0 ile ilişkili ana kavramlardan biridir [1]. İlk olarak NASA'nın APOLLO programında kullanıldığı varsayılmaktadır. Uzaya gönderilen aracın, içinde bulunacağı ortam koşullarının yansıtılmasını sağlaması amacıyla bir özdeşi daha üretilmiş, bu özdeş laboratuvar ortamında kullanılmış ve ikiz ismi verilmiştir [2]. Dİ, bir ürünün yaşam döngüsü içerisinde tamamen dijitalleştirilmiş kapsamlı bir dijital temsildir [3]. Dİ, fiziksel bir nesne ya da sistemin gerçek zamanlı ve dinamik olarak modellenmesidir. Dİ, fiziksel bir mekanizmanın (makine, iş hattı, araç, hatta insan) dijital olarak sanal dünyada gösterilmesidir. Şekil 1'de Fiziksel Dünya ile Siber-Fizik dünya arasındaki ilişki ve fiziksel bir araç ile dijital ikizinin arasındaki ilişkisi gösterilmiştir [4].



Şekil 1. Dijital İkiz, Siber-Fizik Sistemler Nesnelerin İnterneti Arasındaki İlişki

Dİ, bir sistemi veya mekânı kamera aracılığıyla izlemekten çok daha fazlasını denetçiye sunar. Dİ'ler bir bağlı oldukları cihazın ısı, nemi, çalışma performansı gibi detaylı bilgiler sunmaktadır. Bu sebeple yakın gelecekte milyonlarca nesnenin dijital ikizinin olacağına inanılmaktadır [5]. Dİ ile ilgili bazı kavramların yanlış kullanıldığı görülmektedir [6]. Bu kavramların birbiri ile olan ilişkileri Şekil 2'de gösterilmiştir. Tüm bu kavramlar arasındaki farklılık verinin akışı ile ilgilidir. **Dijital Model** kavramında fiziksel nesne ile dijital nesne arasında veri alışverişi otomatik olarak gerçekleşmez. Bu nedenle fiziksel nesne üzerinde bir değişiklik olsa bile bu değişikliğin dijital model üzerine etkisi eş zamanlı olarak yansıtılmayacaktır. **Dijital Gölge** kavramında ise fiziksel nesnenin elde edilen verileri eş zamanlı olarak dijital nesneye yansıtılır. Fiziksel nesne de olan bir değişiklik, dijital nesne üzerinde de değişikliğe yol açar. Ancak, bu işlemin tersi söz konusu değildir. **Dijital İkiz** kavramında ise her iki yönde otomatik olarak bir veri akışı söz konusudur. Fiziksel nesne üzerinde bir değişiklik oluştuğunda dijital ikize yansıtılır ve aynı şekilde dijital ikiz üzerinde herhangi bir parametrik ayarlama sonrası fiziksel nesne üzerinde de değişiklikler otomatik olarak işlenir. Kavram karmaşasının haricinde bir diğer yanlış ise; her dijital ikizin, fiziksel bir ürün veya nesneyi her zaman üç boyutlu olarak modellemesi gerektiği yönündedir. Bu modelleme işlemi çoğu zaman mümkün olsa da her zaman gerekli değildir.



Şekil 2. Güncellendi : Dijital Model, Dijital Gölge ve Dijital İkiz [6]

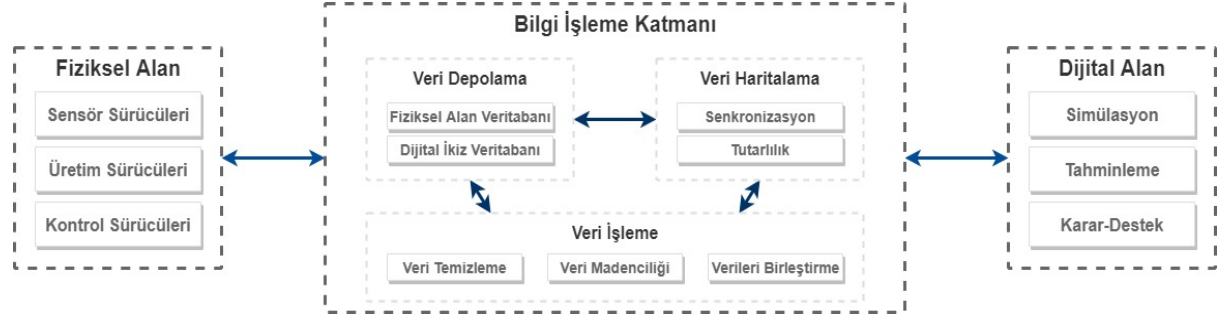
Tablo 1. Dijital İkiz Seviyeleri [7]

Seviye	Model Gelişmişliği	Fiziksel İkiz	Fiziksel İkizden Veri Toplama	Makine Öğrenmesi (Operatörler İçin)	Makine Öğrenmesi (Sistem ve Çevre İçin)	
1	Ön Dijital İkiz	Teknik Riskleri Azaltmaya Yönelik Geliştirilen Sanal Sistem Modeli	Mevcut Değil	Uygulanamaz	Hayır	Hayır
2	Dijital İkiz	Fiziksel İkizin Sanal Modeli	Mevcut	Mümkün, Toplu Güncellenmeler	Hayır	Hayır
3	Uyarlanabilir Dijital İkiz	Uyarlanabilir Kullanıcı Arayüzüne Sahip Sanal Sistem Modeli	Mevcut	Mümkün, Gerçek Zamanlı	Evet	Hayır
4	Akıllı Dijital İkiz	Uyarlanabilir Kullanıcı Arayüzü ve Pekitirmeli Öğrenme İle Geliştirilmiş Sanal Sistem Modeli	Mevcut	Mümkün, Gerçek Zamanlı	Evet	Evet

Tablo 1'de dijital bir ikizin gelişmişlik seviyeleri nasıl belirlendiği gösterilmiştir. Seviye 1, ürünlerin başlangıç aşamasında, tasarım kısmında karar vermeyi destekleyecek olan Ön dijital ikiz, sanal bir prototiptir. Bu prototipin amacı teknik riskleri azaltmak ve olası problemleri öngörmektir. *İkinci seviye*, mevcut fiziksel ikizin sanal modelidir ve bu model türünde fiziksel sensörlerden veriler toplanır. Uyarlanabilir dijital ikizler olan üçüncü seviye, sistem içerisindeki bileşenlerin yönetimi için geliştirilmiş bir kullanıcı arayüzü üzerinden işlemlerin gerçekleştirilebildiği dijital ikiz modelidir. Bilgi akışı iki yönlüdür. Bu aşamada operatör, fiziksel ikizden elde ettikleri bilgiler dijital ikiz üzerinde optimizasyon işlemlerini tüm yönleriyle değerlendirebilir, elde ettiği yeni parametre bilgileriyle fiziksel ikize etki edebilir, sistem iş akışına yeniden oluşturma, değiştirme yönünde müdahalelerde bulunabilir. Bu işlemleri gerçekleştirirken, arayüz üzerine entegre edilmiş makine öğrenme ve derin öğrenme gibi algoritmalar ile planlama ve karar verme noktasında destek alabilir. Dördüncü seviye Akıllı Dijital İkizler ise özerk ikiz olarak düşünülebilir. Bu seviyedeki dijital ikizler, uyarlanabilir dijital ikizin tüm özelliklerine sahip olmasının yanı sıra sistem içerisinde yer alan diğer ikizlerden de haberdardır. Kişisel performansını optimize ederken bir operatör desteğine ve yönlendirmesine ihtiyaç duymaksızın işlemlerini gerçekleştirir. Bu seviyedeki dijital ikizler genellikle denetimsiz öğrenme ve takviyeli öğrenme algoritmaları ile beslenirler.

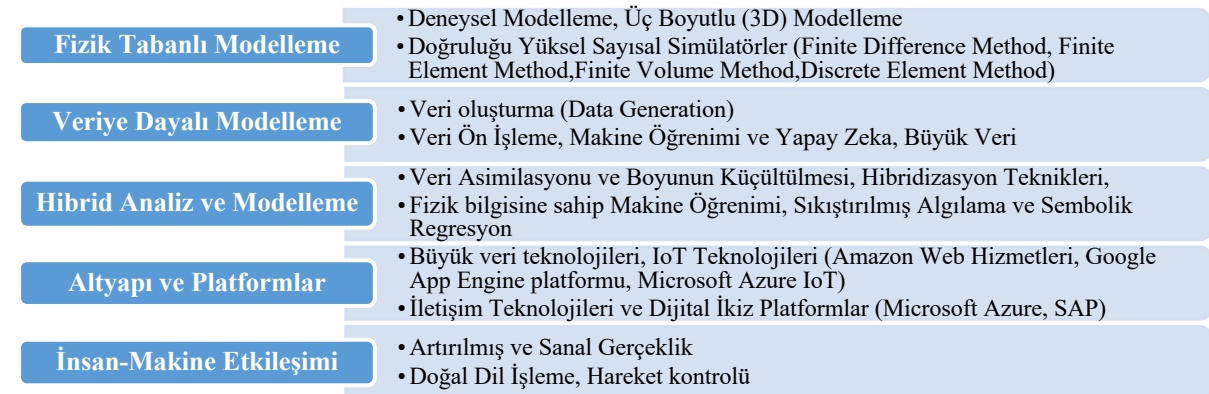
En temel düzeydeki dijital ikizler için üç anahtar bileşen bulunmaktadır [8]. Bu bileşenler Şekil 3'de gösterilmektedir. Fiziksel model ile dijital ikizin birbirine bağlanması sensörlerden elde edilecek olan verilerin bir veri işleme ön sürecinden geçirilmesiyle başlar. Bu süreçte istenmeyen veriler temizlenerek atılır ve sadece gerekli

görülen veriler alınarak daha sonra kullanılmak üzere veri tabanında saklanır. Bu veriler daha önce bahsedildiği üzere çeşitli makine ve derin öğrenme algoritmaları ile işlendikten sonra dijital ikiz üzerinde simülasyon, tahminleme ve karar-destek mekanizmaları için kullanılır.



Şekil 3. Düzenlendi : Dijital İkiz Teknolojisinin En Temel Yapısı [8]

Dijital bir ikiz oluşturulurken kullanılacak teknolojiler: fizik tabanlı modelleme, veriye dayalı modelleme, büyük veri sibernetiği, altyapı ve platformlar ve insan-makine ara yüzü olmak üzere beş ana kategori altında ele alınmıştır [9]. Dijital bir ikizin etkinleştirilebilmesi esnasında kullanılacak teknolojilerin sınıflandırılması Şekil 4’de gösterilmiştir. Bu teknolojileri açıklayacak olursak. **Fizik tabanlı modellemede** Genel olarak deneysel ve sayısal modelleme yapılmaktadır. **Veriye dayalı modelleme** türünde veri oluşturma, veri ön işleme, makine öğrenimi ve yapay zeka gibi işlemler yerel sunucularda gerçekleştirilir ve ölçülmek istenen sisteme özgün sunumlar ve yazılımlar gerçekleştirilir. Verinin toplanması ve oluşturulması sürecinde veri toplama aracı olarak ise sensörler, robot kolları yada hazır data setler tercih edilmektedir. Veriye dayalı modelleme üzerine inşa edilen **Hibrid analiz ve modelleme** yönteminde toplanan veriler asimilasyon sürecinden geçirilerek sistem için anlamlı hale getirilir. Toplanan veriler boyutu küçültülme işlemine tabi tutulur. Regresyon işlemleri ya da makine öğrenme yazılımları ile sistem hakkında çıkarımlar yapılmaya çalışılır. **Altyapılar ve Platformlar** ise sunucu maliyetlerini ortadan kaldırmak isteyen kuruluşlar için hızlı konfigürasyon ve kolayca yönetilebilir bir servis altyapısı sunan bir teknolojidir. Bu teknoloji ile zamandan ve paradan tasarruf edilerek çok kısa sürede birçok hizmetin satın alınabilmesi mümkündür. Büyük veri teknolojileri, IoT Teknolojileri (Amazon Web Hizmetleri, Google App Engine platformu, Microsoft Azure IoT Suite) ve Dijital İkiz Platformları (Microsoft Azure, SAP) gibi hizmetler en çok tercih edilen hizmetler içersinde yer almaktadır. Dijital ikizin geliştirilmesi esnasında kullanılacak diğer bir teknoloji grubu ise **İnsan-Makine etkileşimidir**. Bu bağlamda *sanal gerçeklik* ve *artırılmış gerçeklik* teknolojileri son yıllarda öne çıkan en yenilikçi teknolojilerdir. Bunun yanı sıra doğal dil işleme ve jest kontrolleri gibi etkileşim yöntemleri de giderek yaygınlaşan diğer alt teknolojilerdir.



Şekil 4. Uyarlandı: Dijital İkizlerin Geliştirilmesine Yardımcı Teknolojilerin Sınıflandırılması [9]

3. Yöntem

Bu çalışmada Pasquale ve arkadaşları tarafından önerilmiş olan ayrıntılı ve geniş kapsamlı bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir [10]. Çalışmanın amacı Endüstri 4.0 tabanlı Kestirimci-Öngörücü bakım ve Üretim-Üretim Optimizasyonu alanlarında dijital ikiz konseptinin halihazırdaki mevcut çalışmalarının belirlenmesidir. Bu

katkı ile birlikte çalışma şu araştırma sorusuna cevap vermeyi amaçlamaktadır: "Dijital İkiz için kestirimci bakım ve üretim optimizasyonu alanındaki mevcut uygulamalar, yeni trendler ve zorluklar nelerdir? ". Literatür taraması esnasında veri tabanlarının belirlenmesi, anahtar kelimelerin seçimi, mükerrer kayıtların çıkartılması, analiz süreci ve istatistiklerin çıkarılması adım adım açıklanmıştır.

3.1. Veri Kaynağı

Yazarlar, araştırma sorusunu cevaplamak amacıyla halihazırda var olan yaklaşımların belirlenmesi için üç ana kaynağı araştırmışlardır; IEEE, Web of Science ve ScienceDirect. Bu araştırma kaynakları, çok çeşitli dergileri içeren köklü, güncel ve çok disiplinli veri tabanlarıdır. Bu üç veritabanı Nisan-2021 tarihi itibarıyla sorgulanmıştır. Tarama makalelerin başlığı, anahtar kelimeleri ve özeti ile sınırlandırılmıştır. Ayrıca çalışmanın yazım dili olarak İngilizce belirlenmiştir. Makalelerin seçimi süresinde ilk kriter olarak makalenin başlığı içinde "Digital Twin" paradigması aranmıştır. Seçimi daha özel hale getirmek için daha sonra makalenin anahtar kelimeleri içerisinde "predictive maintenance" ve "production or product optimization" kelimeleri dahil edilmiştir.

3.2. Yayın Seçim Süreci

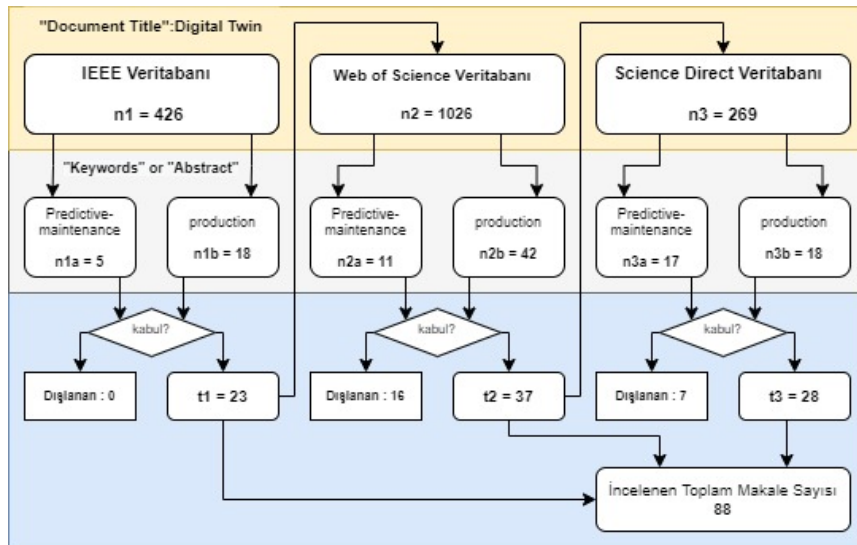
Veri kaynağında belirtilen arama kriterlerine ek olarak makalelerin seçim sürecinde, kitaplar, konferans makaleleri ve dergileri dahil tüm yayın türleri dikkate alınmıştır. Veritabanı taranırken zaman aralığı olarak, 2015-2020 yılları arasında bazı istisnalar(tekrarlayan, erişilemeyen makaleler) dışında tüm makaleler Şekil 5'de yer alan akış diyagramı seçim sürecine göre belirlenmiştir.

3.3. Yayınların Analizi

Makalelerin analizi ve sınıflandırılması; makalenin yayın türü, erişilen veri tabanı, yayın yılı, uygulama alanı, kullanılan teknoloji, yazılım alt yapısı, veri toplama aracı, katkı ve araştırma yöntemlerine göre gerçekleştirilmiştir. Böylece çalışmanın araştırma sorusunu cevaplamak mümkün hale gelmiş ve ayrıca dijital ikizler hakkında yeni başlayanlar için geniş kapsamlı bir rehber oluşturulmuştur.

4. Bulgular

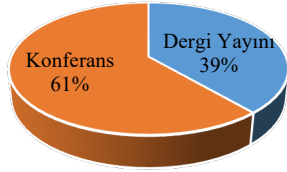
Dijital ikizler çok yeni bir teknoloji olması sebebiyle birçok araştırmacı için dikkat çekmektedir. Bu nedenle araştırmada 2015-2020 yılları arasındaki yayınlara odaklanılmıştır. IEEE, Web of Science ve ScienceDirect veritabanlarında yer alan ve veri kaynağı bölümünde detayları verilen kriterlere göre makale başlığında "digital twin" geçen toplam 1721 adet makale bulunmaktadır. Her bir veri tabanı içerisinde mevcut makale başlığı arama kriterine ek olarak "ve" operatörü ile ikinci bir kriter olarak arama sürecine devam edilmiştir.



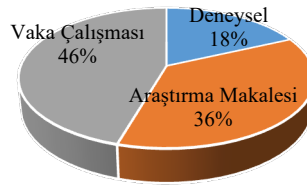
Şekil 5. Makale Seçim Süreci

İlk veritabanı IEEE seçilmiş ve ayrıntılı arama kriterleri sonucunda toplam 23 çalışma araştırmaya dahil edilmiştir. İkinci aşamada Web of Science veritabanı taranmış tekrarlayan, erişilemeyen 16 adet çalışma hariç tutularak toplam 37 çalışma araştırmaya dâhil edilmiştir. Son aşamada ise Science Direct veritabanı taranmış tekrarlayan ve erişilemeyen 7 adet çalışma hariç tutularak toplam 28 çalışma araştırmaya dâhil edilmiştir. Nihai olarak 88 adet makale detaylı olarak taranmış ve sistematik incelemede kullanılmak üzere uygun görülmüştür.

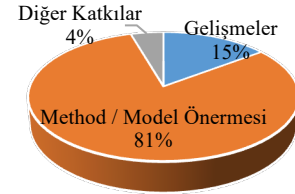
İncelenen makalelerin yayın türlerine dair grafik Şekil 6'da gösterilmiştir. Buna göre yayınlanmış makalelerin %61 konferans bildirisi geri kalan %39 ise dergi yayınlarından oluşmaktadır. Diğer bir istatistiğe göre yayınlanan çalışmaların %46'sı vaka çalışmasına dayanmaktadır. Araştırma makaleleri(%36) oranının yüksek olması konunun araştırmacılar için yeterince doygunluğa erişmediğini göstermektedir. Öte yandan çalışmaların %81'i bir method/model önermesi gerçekleştirmiştir. Bu sonuç, dijital ikiz teknolojisi için standartların henüz yeterince ortaya konulmadığını ortaya koymaktadır.



Şekil 6. Yayın Türleri Sınıflandırılması



Şekil 7. Çalışma Türleri



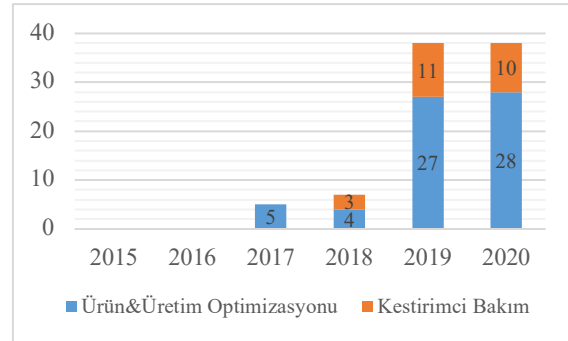
Şekil 8. Çalışmaların Katkıları

Tablo 2'de çalışmaların dergilere göre dağılımı gösterilmiştir. Çalışmaların %29'u Procedia CIRP, %15'i IFAC-PapersOnLine, %15'i Procedia Manufacturing'de geri kalanı ise diğer kategorilerdedir.

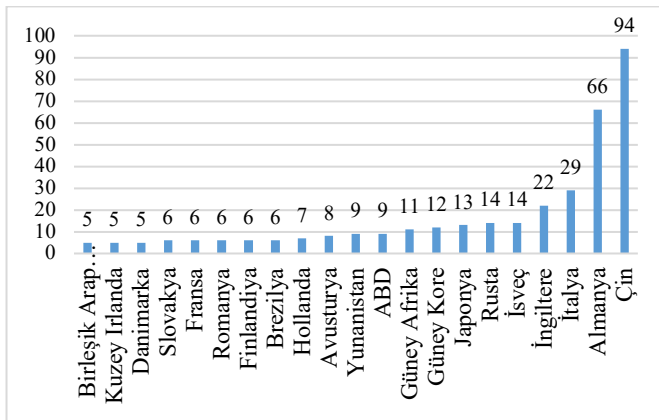
Çalışmaların yayınlandıkları yıllara göre dağılımı Şekil 9'de gösterilmiştir. Grafikte dikkat çekici nokta bu alanda 2015 ve 2016 yıllarında herhangi bir çalışmanın olmaması, son 2 yılda ise çalışmaların çok hızlı bir şekilde artmış olmasıdır. Çalışmaların %73'ü Ürün ve Üretim Optimizasyonuna [1, 8, 11-72] odaklanırken, diğer %27'lik bölümde Kestirimci Bakım [73-96] çalışılmıştır.

Tablo 2. Çalışmaların Dergi Yayın Oranları

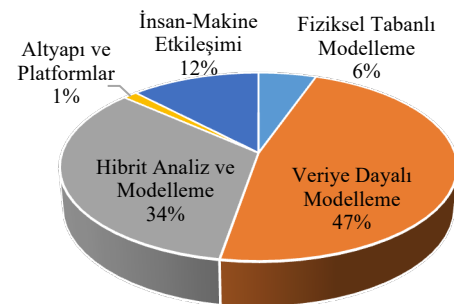
Dergi Yayın Organı	Oran
Procedia CIRP	% 29
IFAC-PapersOnLine	% 15
Procedia Manufacturing	% 15
IEEE	% 13
Robotics & Computer-Integrated Manufacturing	% 10
CIRP Annals	% 9
Digital Twin Driven Smart Design	% 5
Journal of Manufacturing Systems	% 4



Şekil 9. Çalışmaların Yıllara Göre Dağılımı



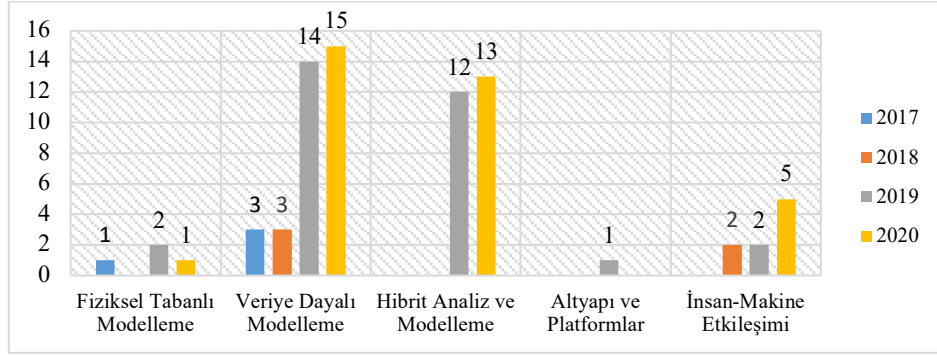
Şekil 10. Çalışmaların Ülkelere Göre Dağılımı



Şekil 11. Çalışmalardaki Teknoloji Dağılımı

İncelenen makalelerin %27'sine Çin, %19'una Almanya katkıda bulunmuştur. İtalya, İngiltere, İsveç, Rusya, Japonya 'dan ve diğer ülkelerden yazarlarda bu alana katkı sunmaya çalışmışlardır. Katkıların gösterildiği Şekil 10'daki grafikte katkısı %1 olan ülkelere yer verilmemiştir. Türkiye'den araştırmacıların katkısı %1 ile sınırlı kaldığı görülmüştür.

Dijital ikizlerin geliştirilmesi esnasında kullanılan teknolojilerin çalışmalardaki dağılımı Şekil 11' de gösterilmiştir. Buna göre araştırmaya dahil edilen çalışmaların %47'si veriye dayalı modelleme teknolojilerine odaklanmışken, %34'lük kısımda Hibrid Modelleme teknolojileri tercih edilmiştir. Fizik tabanlı(%6) modellemelerin dijital ikiz teknolojisinde çok ilgi görmediği, İnsan-Makine etkileşimli teknolojilerin ise bir artış eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Altyapı ve Platformlar ise %1 ile çok sınırlı kalmıştır. Teknolojilerin yıllara göre değişimini gösteren Şekil 12'deki veriler incelendiğinde özellikle son yıllarda piyasada adını sıkça duymaya başladığımız Amazon Web Hizmetleri, Google App Engine platformu, Microsoft Azure IoT Suite gibi uygulamaların akademik çalışmalarda henüz yeterince yer bulmamış olması ise merak uyandırıcı bir araştırma konudur.



Şekil 12. Çalışmalarda Kullanılan Teknolojilerin Yıllara Göre Değişimini

5. TARTIŞMA

Dijitalleşme süreci içinde dijital ikizler geleneksel üretim anlayışlarının değişmesine yol açmaktadır. Bugün birçok şirket geliştirilmekte olan yazılım ve platformları kullanarak üretimlerini takip etmekte ve optimizasyon yöntemleri ile farklı senaryolar için gerçek zamanlı girdi-çıkıta analizi gerçekleştirmekte ve organizasyonlarını buna göre şekillendirmektedir. Bu sayede üretim kapasitesini ve kaliteyi arttırmayı öte yandan üretim maliyetini ve üretim süresini düşürerek çeşitli tasarruflar yapmayı amaçlamaktadır.

Akıllı üretim yaklaşımı içerisinde veri füzyonu önemli bir çalışma alanıdır. Verilerin gerçek zamanlı olarak toplanması, aktarılması ve sistemlerin denetimi veri füzyonu içerisinde dikkat edilmesi gereken önemli başlıklardır. Yapılan çalışmalarda PLC sistemlerinin yoğun olarak kullanıldığı görülmüştür[8, 11, 14, 21, 22, 24, 25, 38, 65, 71, 72, 77, 80, 82, 95]. Elde edilen verilerin makine öğrenme yazılımları ile desteklenerek operatörler için karar destek mekanizmalarının geliştirilmesi dijital ikizler alanında birçok çalışmanın konusu olmuştur [12, 29-30, 32-33, 35, 37, 45-46, 48, 51, 58-59, 68-69, 74, 78-79, 87, 91-92]. Makine öğrenme yazılımlarının yanı sıra matematiksel modeller ve regresyona bağlı istatistiksel yöntemler, çalışmaların %28 ini oluşturduğu gözlemlenmiştir [13, 16-18, 23, 28, 34, 36, 40-44, 47, 50, 53, 54, 76, 81, 83-84, 86, 88-89, 93]. Veri toplanması sürecinde hazır veri setlerinin (%5) [16, 34, 36, 91] kullanıldığı çalışmaların yanı sıra gerçek zamanlı sensör teknolojisinin(%60) yoğun olarak kullanıldığı anlaşılmıştır [8, 11-14, 17-18, 21-24, 28, 30, 32, 35, 38, 40-48, 50-51, 54, 58-59, 61, 64, 65, 68-69, 71-72, 74, 76-82, 84, 87-89, 92, 93, 95]. Bazı çalışmalarda ise robot kolu(%3) ile gerçekleştirilmiş gerçek zamanlı çalışmalar yapılmıştır [25, 33, 53]. Kullanılan yardımcı teknolojilere göre çalışmaların %6'sı [8, 62, 72, 82] fizik tabanlı modelleme üzerine gerçekleştirilmiştir. %47'sinde [11-14, 16-18, 21-24, 29, 31, 34, 36, 38, 43-46, 50, 53-54, 57, 63, 69, 71, 76, 80-81, 86, 88, 91, 93, 95] veriye dayalı modelleme gerçekleştirilmiştir. Veriye dayalı modelleme yönteminde incelenen çalışmaların %72'sinde işlemler gerçek zamanlı sensör verisi üzerinden gerçekleştirilmiştir. Seçilen çalışmaların %34'ünde [32-33, 35, 37, 40-41, 47, 48, 51-52, 58-59, 61, 65-68, 74, 77-79, 84, 87, 89, 92] hibrid analiz ve modelleme gerçekleştirilmiştir. Büyük veri teknolojileri, IoT Teknolojileri gibi hizmetler bugün endüstriyel ortamlarda en çok tercih edilen hizmetler içerisinde yer almasına rağmen seçilen çalışmaların %1'inde [73] altyapı ve platform hizmetlerine kullanılmıştır. Bunda çalışmaların %83'ünün akademisyenler tarafından yürütülmesinin yanı sıra akademi-sanayi arasındaki işbirlikçi yaklaşımın gelişmemiş olmasından kaynaklanabileceğini düşünmekteyiz. Öte yandan çalışmaların %12'si [25, 28, 30, 39, 42, 49, 56, 64, 83] modelleme aracı olarak İnsan-Makine arayüzü teknolojileri kullanmıştır.

Akıllı üretim yaklaşımı içerisinde kestirimci bakım ve alt dalı olan *Kalan Faydalı Ömür* (Remaining Useful Life (RUL)) için hesaplama yöntemlerinin geliştirilmesi diğer önemli bir çalışma alanıdır. Bazı çalışmalarda kalan ömür hesaplamasının matematiksel olarak hesaplanma adımları gösterilmiştir [42-43, 45] öte yandan bazı çalışmalarda endüstriyel robotların ve ürünlerin kalan ömürlerinin hesaplanması için metotlar önerilmiş ve doğrulanmıştır [78, 80, 95].

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada dijital ikiz teknolojisi konusunda 2015-2020 yılları arasında yayınlanan seksen sekiz çalışma sistematik olarak incelenmiş, analiz edilmiş ve sonuçları irdelenmiştir. Bu bağlamda dijital ikizlerin son iki yılda çok hızlı bir gelişme süreci içerisine girdiği, özellikle zaman tasarrufu, bakım ve üretim maliyetlerinin azaltılması ve üretimdeki risklerin düşürülmesi gibi ortak faydalarına vurgular yapılmıştır. Bunun yanı sıra üretkenliğin ve kalitenin artırılması çalışmaların odak noktası olmuştur. İncelenen çalışmalar içinde belirlenen en temel zorluk ortak bir dijital ikiz çerçevesinin olmayışıdır. Bu sebeple Şekil 8'den görüleceği üzere mevcut çalışmaların %81'inde bir method/framework geliştirme üzerine odaklanmaktadır. Diğer bir zorluk ise endüstri 4.0 uyumlu olmayan hali hazırdaki endüstriyel cihazların ya da üretim hatlarının sisteme entegrasyonudur. Makineler arasındaki farklılıklardan dolayı entegrasyon süreçlerinin bazen çok zaman alması bazen de imkansız olması nedeniyle mevcut sistemlerden verilerin toplanamaması yine büyük bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Sektörel bazda birçok endüstriyel ticari yazılımın geliştirildiği ancak tüm sektörler ile tam uyumlu çalışacak bir yazılımın henüz var olmadığı gözlemlenmiştir. Bu eksiklikler ve zorluklar ile birlikte kestirimci bakım ve ürün/üretim optimizasyonları üzerine sonraki çalışmalar için birçok boşluk görülmektedir.

İlerleyen çalışmalar; Tablo 1'de belirtildiği üzere dördüncü seviye Akıllı Dijital İkizler için bir method/framework konsepti üzerinde yoğunlaşılacak ve arayüz geliştirilmeye çalışılacaktır. Veri füzyonu (veriyi elde etme, aktarma, saklama) için api uygulamalarına odaklanılacak ve seçilen çalışmaların %1'inde kullanılan altyapı ve platform teknolojileri üzerinden bir dijital ikiz geliştirilmeye odaklanılacaktır. Oluşturulacak olan dijital ikizin yapısal mimarisi akademik katkı olarak sunulmaya çalışılacaktır. Mevcut makine ve derin öğrenme yazılımları genişletilerek, karar-destek sistemlerinin karşılaştırılması ve geliştirilmesi diğer bir çalışma alanımız olacaktır. Bir ürünün kalan ömür hesaplaması üzerine yapılan dijital ikizlerin ve bu çalışmaların hangi alanlarda yoğunlaştığına dair bir araştırma yapılması ilerleyen dönemlerde üzerinde duracağımız diğer çalışmalar olacaktır.

Kaynaklar

- [1] Murphy A., Taylor C., Acheson C., Butterfield J., Jin Y., Higgins P., Collins R., Higgins C., Representing financial data streams in digital simulations to support data flow design for a future Digital Twin., Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Volume 61,2020,101853, 2020.
- [2] Aivaliotis, P., K. Georgoulis, ve G. Chryssolouris., The use of Digital Twin for predictive maintenance in manufacturing., International Journal of Computer Integrated Manufacturing,32,2019, 1067-1080.
- [3] Aivaliotis, Panagiotis, Konstantinos Georgoulis, ve Kosmas Alexopoulos., Using digital twin for maintenance applications in manufacturing: State of the Art and Gap analysis., 2019 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), 2019: 1-5.
- [4] Altamiranda, Edmary, ve Eliezer Colina., A System of Systems Digital Twin to Support Life Time Management and Life Extension of Subsea Production Systems., OCEANS 2019 - Marseille, 2019: 1-9.
- [5] Altun, Cankal, ve Bulent Tavli., Social Internet of Digital Twins via Distributed Ledger Technologies: Application of Predictive Maintenance., 2019 27th Telecommunications Forum (TELFOR), 2019: 1-4.
- [6] Aschenbrenner, D., ve diğerleri., Mirrorlabs - creating accessible Digital Twins of robotic production environment with Mixed Reality., 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR), 43-48.
- [7] Assawaarayakul, Chaiwat, Wasin Srisawat, Smitti Darakorn Na Ayuthaya, ve Somkiat Wattanasirichaigoon., Integrate Digital Twin to Exist Production System for Industry 4.0., 2019 4th Technology Innovation Management and Engineering Science International Conference (TIMES-iCON), 2019: 1-5.
- [8] Bagheri, Behrad, Shanhu Yang, Hung-An Kao, ve Jay Lee., Cyber-physical Systems Architecture for Self-Aware Machines in Industry 4.0 Environment., IFAC-PapersOnLine 48, no. 3 (2015): 1622-1627.
- [9] Barthelmey, André, Eunseo Lee, Ramy Hana, ve Jochen Deuse., Dynamic digital twin for predictive maintenance in flexible production systems., 2019: 4209-4214.
- [10] Bazaz, Sara Moghadaszadeh, Mika Lohtander, ve Juha Varis. 5-Dimensional Definition for a Manufacturing Digital Twin, 38 (2019): 1705-1712.
- [11] Behrang, Ashtari Talkhestani, ve diğerleri., An architecture of an Intelligent Digital Twin in a Cyber-Physical Production System., AT-AUTOMATISIERUNGSTECHNIK 67, no. 9 (2019): 762-782.
- [12] Beloglazov, I. I., P. A. Petrov, ve V. Yu Bazhin., THE CONCEPT OF DIGITAL TWINS FOR TECH OPERATOR TRAINING SIMULATOR DESIGN FOR MINING AND PROCESSING INDUSTRY., 2020: 50-54.

- [13] Biesinger, Florian, Benedikt Kraß, ve Michael Weyrich., A Survey on the Necessity for a Digital Twin of Production in the Automotive Industry., 2019 23rd International Conference on Mechatronics Technology (ICMT), 2019: 1-8.
- [14] Biesinger, Florian, Davis Meike, Benedikt Kraß, ve Michael Weyrich., A digital twin for production planning based on cyber-physical systems: A Case Study for a Cyber-Physical System-Based Creation of a Digital Twin., 12TH CIRP CONFERENCE ON INTELLIGENT COMPUTATION IN MANUFACTURING ENGINEERING, 79 (2019): 355-360.
- [15] Biesinger, Florian, ve Michael Weyrich., The Facets of Digital Twins in Production and the Automotive Industry., 2019 23rd International Conference on Mechatronics Technology (ICMT), 2019: 1-6.
- [16] Cattaneo, Laura, ve Marco Macchi., A Digital Twin Proof of Concept to Support Machine Prognostics with Low Availability of Run-To-Failure Data., 13th IFAC, 52, no. 10 (2019): 37-42.
- [17] Centomo, Stefano, Nicola Dall’Ora, ve Franco Fummi., The Design of a Digital-Twin for Predictive Maintenance., 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2020: 1781-1788.
- [18] Cimino, Chiara, Gianni Ferretti, ve Alberto Leva., The role of dynamics in digital twins and its problem-tailored representation., 21th IFAC World Congress 53, no. 2 (2020): 10556-10561.
- [19] Coraddu, Andrea, Luca Oneto, Francesco Baldi, Francesca Cipollini, Mehmet Atlar, ve Stefano Savio., Data-driven ship digital twin for estimating the speed loss caused by the marine fouling., Ocean Engineering 186 (2019): 106063.
- [20] D’Amico, Davide, ve diğerleri., Conceptual framework of a digital twin to evaluate the degradation status of complex engineering systems., 7th CIRP Global Web Conference – Towards shifted production value stream patterns through inference of data, models, and technology (CIRPe 2019) 86 (2019): 61-67.
- [21] Ding, Kai, Felix T. S Chan, Xudong Zhang, Guanghui Zhou, ve Fuqiang Zhang., Defining a Digital Twin-based Cyber-Physical Production System for autonomous manufacturing in smart shop floors., INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH 57, no. 20 (tarih yok): 6315-6334.
- [22] ERTURAN, İlkey Ejder, ve Emre ERGİN., DİJİTAL DENETİM VE DİJİTAL İKİZ YÖNTEMİ., Muhasebe Bilim Dünyası Dergisi 20, no. 4 (2018): 810-830.
- [23] Fazel, Ansari, Nixdorf Steffen, ve Sihn Wilfried., Insurability of Cyber Physical Production Systems: How Does Digital Twin Improve Predictability of Failure Risk?, IFAC-PapersOnLine, Volume 53, Issue 3, 2020: 295-300.
- [24] Fuller, Aidan, Zhong Fan, Charles Day, ve Chris Barlow., Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research., IEEE Access 8 (2020).
- [25] Gao, Yunpeng, Haiyang Lv, Yongzhu Hou, Jihong Liu, ve Wenting Xu., Real-time Modeling and Simulation Method of Digital Twin Production Line., 2019 IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC), 2019: 1639-1642.
- [26] Gericke, G.A., R.B. Kuriakose, H.J. Vermaak, ve Ole Madsen., Design of Digital Twins for Optimization of a Water Bottling Plant., IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2019: 5204-5210.
- [27] Graessler, I., ve A. Poehler., Integration of a digital twin as human representation in a scheduling procedure of a cyber-physical production system., 2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2017: 289-293.
- [28] Graessler, Iris, ve Alexander Poehler., Intelligent control of an assembly station by integration of a digital twin for employees into the decentralized control system., 4th International Conference On System-Integrated Intelligence: Intelligent, Flexible And Connected Systems In Products And Production 24 (2018): 185-189.
- [29] Greco, Alessandro, Mario Caterino, Marcello Fera, ve Salvatore Gerbino., Digital Twin for Monitoring Ergonomics during Manufacturing Production., Applied Sciences, 10(21), 7758., 2020.
- [30] Guo, Daqiang, ve diğerleri., A framework for personalized production based on digital twin, blockchain and additive manufacturing in the context of Industry 4.0., 2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 2020: 1181-1186.
- [31] Haag, Sebastian, ve Reiner Anderl., Digital twin-Proof of concept., Industry 4.0 and Smart Manufacturing, 2018, 64-66.
- [32] Harper, K. Eric, Christopher Ganz, ve Somayah Malakuti., Digital Twin Architecture and Standards., IIC J. Innov., 2019.
- [33] Hauge, Jannicke Baalsrud, Masoud Zafarzadeh, Yongkuk Jeong, Yi Li, Wajid Ali Khilji, ve Magnus Wiktorsson., Employing digital twins within production logistics., 2020 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), 2020: 1-8.
- [34] Heng, Zhou, Yang Chunjie, ve Youxian Sun., A Collaborative Optimization Strategy for Energy Reduction in Ironmaking Digital Twin., IEEE Access 8 (2020): 177570-177579.
- [35] Howard, Daniel Anthony, Zheng Ma, Jesper Mazanti Aaslyng, ve Bo Nørregaard Jørgensen., Data Architecture for Digital Twin of Commercial Greenhouse Production., 2020 RIVF International Conference on Computing and Communication Technologies (RIVF), 2020: 1-7.
- [36] Hürkamp, André, ve diğerleri., Combining Simulation and Machine Learning as Digital Twin for the Manufacturing of Overmolded Thermoplastic Composites., Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2020; 4(3):92, 2020.
- [37] Jafari, Mohsen A., Esmat Zaidan, Ali Ghofrani, Khashayar Mahani, ve Farbod Farzan., Improving Building Energy Footprint and Asset Performance Using Digital Twin Technology., 4th IFAC Workshop on Advanced Maintenance Engineering, Services and Technologies - AMEST 2020 53, no. 3 (2020): 386-391.
- [38] Jeon, S. M., ve S. Schuesslbauer., Digital Twin Application for Production Optimization., 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2020: 542-545.
- [39] Jiewu, Leng, ve diğerleri., Digital twin-driven rapid reconfiguration of the automated manufacturing system via an open architecture model., Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 63 (2020): 101895.

- [40] Khan, Samir, Michael Farnsworth, Richard McWilliam, ve John Erkoyuncu., On the requirements of digital twin-driven autonomous maintenance., *Annual Reviews in Control* 50 (2020): 13-28.
- [41] Kholopov, V. A., S. V. Antonov, ve E. N. Kashirskaya., Application of the Digital Twin Concept to Solve the Monitoring Task of Machine-Building Technological Process., 2019 RusAutoCon, 2019: 1-5.
- [42] Kritzinger, Werner, Matthias Karner, Georg Traar, Jan Henjes, ve Wilfried Sihn., Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification., *IFAC PAPERSONLINE* 51, no. 11 (2018): 1016-1022.
- [43] Krüger, Suewellyn, ve Milton Borsato., Developing knowledge on Digital Manufacturing to Digital Twin: a bibliometric and systemic analysis., 29th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM 2019) 38 (2019): 1174-1180.
- [44] Kubota, Tsubasa, Reza Hamzeh, ve Xun Xu., STEP-NC Enabled Machine Tool Digital Twin., 53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems 2020 93 (2020): 1460-1465.
- [45] Kyu Tae, Park, Lee Jehun, Kim Hyun-Jung, ve Noh Sang Do., Digital twin-based cyber physical production system architectural framework for personalized production., *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 106 (2020): 1787-1810.
- [46] Lee, Jay, Behrad Bagheri, ve Hung-An Kao., Simulation-based Analysis of the Interaction of a Physical and a Digital Twin in a Cyber-Physical Production System., 9th IFAC/IFIP/IFORS/IISE/INFORMS Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control (IFAC MIM) 52, no. 13 (2019): 1331-1336.
- [47] Lim, Kendrik Yan Hong, Pai Zheng, Chun-Hsien Chen, ve Lihui Huang., A digital twin-enhanced system for engineering product family design and optimization., *Journal of Manufacturing Systems* 57 (2020): 82-93.
- [48] Liu, Chao, Léopold Le Roux, Carolin Körner, Olivier Tabaste, Franck Lacan, ve Samuel Bigot., Digital Twin-enabled Collaborative Data Management for Metal Additive Manufacturing Systems., *Journal of Manufacturing Systems*, 2020.
- [49] Liu, Chao, Pingyu Jiang, ve Wenlei Jiang., Web-based digital twin modeling and remote control of cyber-physical production systems., (*Robotics and computer-integrated manufacturing*, 2020, 64: 101956) 2020.
- [50] Liu, Jinfeng, Xiangmeng Du, Honggen Zhou, Xiaojun Liu, L ei Li, ve Feng Feng., A digital twin-based approach for dynamic clamping and positioning of the flexible tooling system., 26TH CIRP CONFERENCE ON LIFE CYCLE ENGINEERING (LCE) 80 (2019): 746-749.
- [51] Lu, Yuqian, Chao Liu, Kevin Wang, Huiyue Huang, ve Xun Xu., Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues., *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020: 101837.
- [52] Lutters, Eric, ve Roy Damgrave., The development of Pilot Production Environments based on Digital Twins and Virtual Dashboards., 29TH CIRP DESIGN CONFERENCE 84 (2019): 94-99.
- [53] Lydon, G.P., S. Caranovic, I. Hischer, ve A. Schlueter., Coupled simulation of thermally active building systems to support a digital twin., *Energy and Buildings* 202 (2019): 109298.
- [54] Ma, Jun, ve diğerleri., A digital twin-driven production management system for production workshop., (*Int J Adv Manuf Technol*), no. 110 (2020): 1385-1397.
- [55] Madni, Azad M., Carla C. Madni, ve Scott D. Lucero., Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering., *Systems* 7, no. 1 (2019).
- [56] Makarov, Valery, Albert Bakhtizin, ve Gayane Beklaryan., Developing digital twins for production enterprises., *Business Informatics* 13, no. 4 (2019): 7-16.
- [57] Marcello, Fera, ve diğerleri., Towards Digital Twin Implementation for Assessing Production Line Performance and Balancing., *Sensors* 20, no. 1 (2020).
- [58] Melesse, Tsega Y., Valentina Di Pasquale, ve Stefano Riemma., Digital Twin Models in Industrial Operations: A Systematic Literature Review., *ISM* 2019, 42 (2020): 267-272.
- [59] Moi, Torbjørn, Andrej Cibicik, ve Terje Rølvåg., Digital twin based condition monitoring of a knuckle boom crane: An experimental study., *Engineering Failure Analysis* 112 (2020): 104517.
- [60] Negri, Elisa, Luca Fumagalli, ve Marco Macchi., A review of the roles of Digital Twin in CPS-based production systems., 27TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLEXIBLE AUTOMATION AND INTELLIGENT MANUFACTURING, FAIM2017 11 (2017): 939-948.
- [61] P. Aivaliotis, K. Georgoulas, Z. Arkouli, S. Makris., Methodology for enabling Digital Twin using advanced physics-based modelling in predictive maintenance., (*Procedia CIRP*, Volume 81, 2019) 2019: 417-422.
- [62] P.K. Rajesh, N. Manikandan, C.S. Ramshankar, T. Vishwanathan, C. Sathishkumar., Digital Twin of an Automotive Brake Pad for Predictive Maintenance., *Digital Twin of an Automotive Brake Pad for Predictive Maintenance*, *Procedia Computer Science*, Volume 165, 2019: 18-24.
- [63] Park, Kyu Tae, ve diğerleri., Design and implementation of a digital twin application for a connected micro smart factory., *INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTER INTEGRATED MANUFACTURING* 32, (2019): 596-614.
- [64] Pasquale, Valentina Di, Chiara Franciosi, Raffaele Iannone, Ilaria Malfettone, ve Salvatore Miranda., Human error in industrial maintenance: A systematic literature review., *XXII Summer School "Francesco Turco" - Industrial Systems Engineering* 2017, 2017.
- [65] Preuveneers, Davy, Wouter Joosen, ve Elisabeth Ilie-Zudor., Robust Digital Twin Compositions for Industry 4.0 Smart Manufacturing Systems., 2018 IEEE 22nd International Enterprise Distributed Object Computing Workshop (EDOCW), 2018: 69-78.
- [66] Qi, Qinglin, Fei Tao, Ying Zuo, ve Dongming Zhao., Digital Twin Service towards Smart Manufacturing., 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems 72 (2018): 237-242.

- [67] Qiao, Qianzhe, Jinjiang Wang, Lunkuan Ye, ve Robert X. Gao., Digital Twin for Machining Tool Condition Prediction., 52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems (CMS), Ljubljana, Slovenia 81 (2019): 1388-1393.
- [68] Qingfei, Min, Lu Yangguang, Liu Zhiyong, Su Chao, ve Wang Bo., Machine Learning based Digital Twin Framework for Production Optimization in Petrochemical Industry., *International Journal of Information Management*, 49, 502-519.
- [69] Qiu, Chan, Shien Zhou, Zhenyu Liu, Qi Gao, ve Jianrong Tan., Digital assembly technology based on augmented reality and digital twins: a review., *Virtual Reality & Intelligent Hardware* 1, no. 6 (2019): 597-610.
- [70] Rasheed, Adil, Omer San, ve Trond Kvamsdal., Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective., *IEEE Access* 8 (2020): 21980-22012.
- [71] Riedelsheimer, Theresa, Lisa Dorfhuber, ve Rainer Stark., User centered development of a Digital Twin concept with focus on sustainability in the clothing industry., 27th CIRP Life Cycle Engineering Conference (LCE2020) *Advancing Life Cycle Engineering* 90 (2020): 660-665.
- [72] Rosen, Roland, Georg von Wichert, George Lo, ve Kurt D. Bettenhausen., About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing., 15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing 48, no. 3 (2015): 567-572.
- [73] Schützer, Klaus, Júlia de Andrade Bertazzi, Carolina Sallati, Reiner Anderl, ve Eduardo Zancul., Contribution to the development of a Digital Twin based on product lifecycle to support the manufacturing process., 29th CIRP Design Conference 2019, 84, 82-87.
- [74] Souad Rabah, Ahlem Assila, Elio Khouri, Florian Maier, Fakreddine Ababsa, Valéry bourny, Paul Maier, Frédéric Mérienne., Towards improving the future of manufacturing through digital twin and augmented reality technologies., 28th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2018), June 11-14, 2018, Columbus, OH, USA *Global Integration of Intelligent Manufacturing and Smart Industry for Good of Humanity*, 2018: 460-467.
- [75] Söderberg, Rikard, Kristina Wärmefjord, Johan S. Carlson, ve Lars Lindkvist., Toward a Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production., *CIRP Annals* 66, no. 1 (tarih yok): 137-140.
- [76] Tatyana Golovina, Andrey Polyenin, Alexander Adamenko, Elena Khegay, Vladimir Schepinin., Digital Twins as a New Paradigm of an Industrial Enterprise., *International Journal of Technology (IJTech)*, 11, 6, 2020, 1115-1124.
- [77] Theodor, Borangiu, Oltean Ecaterina, Răileanu Silviu, Anton Florin, Anton Silvia, ve Iacob Iulia., Embedded Digital Twin for ARTI-Type Control of Semi-continuous Production Processes., *Service Oriented, Holonic and Multi-agent Manufacturing Systems for Industry of the Future*, 2019: 113-133.
- [78] Thomas, Dickopf, Apostolov Hristo, Müller Patrick, Jens C. Göbel, ve Forte Sven., A Holistic System Lifecycle Engineering Approach – Closing the Loop between System Architecture and Digital Twins., 29th CIRP Design Conference 2019, 84, 2019, 538-544.
- [79] Uhlemann, Thomas H. -J., Christian Lehmann, ve Rolf Steinhilper., The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0., 24TH CIRP CONFERENCE ON LIFE CYCLE ENGINEERING, 61, 2017, 335-340.
- [80] Vachálek, Ján, Lukás Bartalský, Oliver Rovný, Dana Šišmišová, Martin Morháč, ve Milan Lokšík., The digital twin of an industrial production line within the industry 4.0 concept., 2017 21st International Conference on Process Control (PC), 2017: 258-262.
- [81] Vathoopan, Milan, Maria Johny, Alois Zoitl, ve Alois Knoll., Modular Fault Ascription and Corrective Maintenance Using a Digital Twin., 16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2018 51, no. 11 (2018): 1041-1046.
- [82] Wagner, Raphael, Benjamin Schleich, Benjamin Haefner, Andreas Kuhnle, Sandro Wartzack, ve Gisela Lanza., Challenges and Potentials of Digital Twins and Industry 4.0 in Product Design and Production for High Performance Products., 29th CIRP Design Conference 2019, 08-10 May 2019, Póvoa de Varzim, Portugal 84 (2019): 88-93.
- [83] Wang, Ben, Liting Yuan, Xinyi Yu, ve Linlin Ou., Construction and Optimization of Digital Twin Model for Hardware Production Line., *IECON 2020*, 2020: 4756-4761.
- [84] Wang, Yunrui, ve Zhengli Wu., Digital twin-based production scheduling system for heavy truck frame shop., *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2020.
- [85] Weichao Luo, Tianliang Hu, Yingxin Ye, Chengrui Zhang, Yongli Wei., A hybrid predictive maintenance approach for CNC machine tool driven by Digital Twin., *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 65, October 2020, 101974, 2020.
- [86] Werner, Andreas, Nikolas Zimmermann, ve Joachim Lentens., Approach for a Holistic Predictive Maintenance Strategy by Incorporating a Digital Twin., 25th International Conference on Production Research *Manufacturing Innovation: Cyber Physical Manufacturing* 39 (2019): 1743-1751.
- [87] Wihan Booyse, Daniel N. Wilke, Stephan Heyns., Deep digital twins for detection, diagnostics and prognostics., *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 140, 2020, 106612, 2020.
- [88] Williams, Richard, John Ahmet Erkoynucu, Tariq Masood, ve Rok Vrabec., Augmented reality assisted calibration of digital twins of mobile robots., 4th IFAC Workshop on Advanced Maintenance Engineering, Services and Technologies 53, no. 3 (2020): 203-208.
- [89] Xuemin, Sun, Bao Jinsong, Li Jie, Zhang Yiming, Liu Shimin, ve Zhou Bin., A digital twin-driven approach for the assembly-commissioning of high precision products., *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61, 2020: 101839.

- [90] Yaqoob, Ibrar, Khaled Salah, Mueen Uddin, Raja Jayaraman, Mohammed Omar, ve Muhammad Imran., Blockchain for Digital Twins: Recent Advances and Future Research Challenges., (IEEE Network, 34(5)) 2020: 290-298.
- [91] Yu-ming, Qi, Xie bing, ve Deng San-peng., Research on Intelligent Manufacturing Flexible Production Line System based on Digital Twin., 2020 35th Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC), 2020: 854-862.
- [92] Zhang, Chao, Guanghui Zhou, Jun He, Zhi Li, ve Wei Cheng., A data- and knowledge-driven framework for digital twin manufacturing cell., 11th CIRP Conference on Industrial Product-Service Systems 83 (2019): 345-350.
- [93] Zhang, Ganghong, Chao Huo, Libin Zheng, ve Xinjun Li., An Architecture Based on Digital Twins for Smart Power Distribution System., 2020 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Big Data (ICAIBD), 2020:29-33.
- [94] Zhang, Haijun, Guohui Zhang, ve Qiong Yan., Digital twin-driven cyber-physical production system towards smart shop-floor., JOURNAL OF AMBIENT INTELLIGENCE AND HUMANIZED COMPUTING 10, no. 11 (2019): 4439-4453.
- [95] Zhang, Haijun, Qiong Yan, ve Zhenghua Wen., Information modeling for cyber-physical production system based on digital twin and AutomationML., The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020: 1927–1945.
- [96] Zhang, Y. F., Y. Q. Shao, J. F. Wang, ve S. Q. Li., Digital Twin-based Production Simulation of Discrete Manufacturing Shop-floor for Onsite Performance Analysis., 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2020: 1107-1111.
- [97] Zheng, Pai, ve Kendrick Yan Hong Lim., Product family design and optimization: a digital twin-enhanced approach., 53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems 2020 93 (2020): 246-250.
- [98] Zhuang, Cunbo, Jianhua Liu, ve Hui Xiong., Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor., International Journal.