

Using Digital Twin Technology in Production Planning and Control Process: An Application in Textile Industry

Aysel KOÇAK¹,  Aytaç YILDIZ², * 

¹Bursa Technical University, Graduate School of Education, Intelligent Systems Engineering, 16310, Yildırım/BURSA

²Bursa Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Industrial Engineering, 16310, Yildırım/BURSA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
Received: 2.09.2022
Revision: 13.10.2022
Accepted: 15.10.2022

Highlights

- JSON.
- MongoDB.
- Location Services.

Keywords

Industry 4.0
Digital twin
Intelligent manufacturing
Garment industry

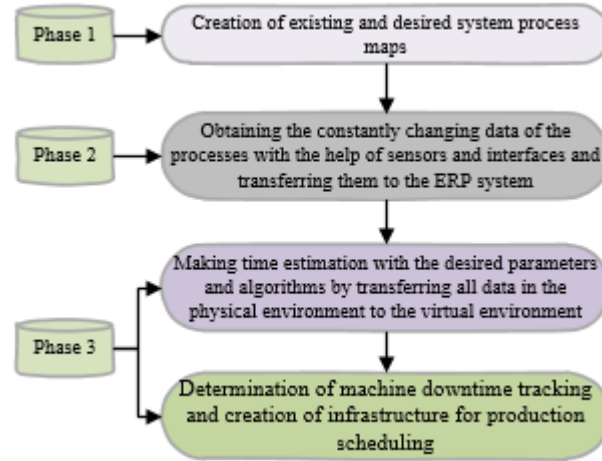


Figure A. The architecture of the developed system

Purpose: In the study, it is aimed to create the infrastructure of digital twin studies that will help analyze the production from every aspect by creating a virtual copy of the physical environment within the scope of the data digitization project of a company that is leading company operating in the garment industry.

Theory and Methods: In the study, the creation of existing and desired system process maps, ensuring that all data are kept in the database with interfaces, and the establishment of the desired physical and virtual system consisted of three phases. In the first phase, maps were created for all processes using the ensemble platform. In the second phase, the forms, programs, instructions and users used in the processes were examined and an ERP system was created to keep the data in the processes in the database. In the last phase, using the data generated in the system, the production time of the products was estimated with four different estimation algorithms in the Knime platform.

Results: A large amount of data has been obtained by transferring all processes to the ERP system. Using these data, the production time was estimated and the results obtained from the random forest regression model were determined as the most appropriate. Therefore, this model is integrated into the ERP system module. Machine downtime was tracked, thus ensuring efficient operation of the machines and the necessary infrastructure for production scheduling was established.

Conclusion: In this study, infrastructure studies have been created for a system that can decide on its own, and it is aimed to direct the work and production of the model in the virtual environment by processing the data taken from the physical environment in the following processes.



Using Digital Twin Technology in Production Planning and Control Process: An Application in Textile Industry

Aysel KOÇAK¹, Aytaç YILDIZ² *

¹Bursa Technical University, Graduate School of Education, Intelligent Systems Engineering, 16310, Yıldırım/BURSA

²Bursa Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Industrial Engineering, 16310, Yıldırım/BURSA

Abstract

In this study, it is aimed to examine the processes from end to end within the scope of the data digitization project in the production facility of a leading company operating in the garment industry and to make data-oriented process designs using new generation information technologies. Accordingly, it is targeted to create the necessary process infrastructures for making digital twin models, which is a newly developing and rapidly growing technology. In the study, first of all, process maps were created and the constantly changing data of the processes were obtained with the help of sensors and interfaces and transferred to the system. Then, by establishing a connection between the process-based times taken from the machines on the production line and the characteristics of the product to be produced, how long it will take for any product to be completed when it enters the process was estimated on the Knime platform using linear regression, polynomial regression, gradient boosting decision forest regression and random forest regression algorithms. According to the estimation results, it was determined that the random forest regression model had the highest R^2 and lowest error metric values, and this regression model was integrated into the ERP infrastructure. In addition, a production scheduling study was designed according to the estimated production times and various parameters on the line. The study is important in terms of establishing the infrastructure of a intelligent system that can decide on its own, and it is anticipated that it will contribute to the creation of the digital twins of the processes.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 2.09.2022
Düzeltilme: 13.10.2022
Kabul: 15.10.2022

Keywords

Industry 4.0
Digital twin
Intelligent manufacturing
Garment industry

Anahtar Kelimeler

Endüstri 4.0
Dijital ikiz
Akıllı üretim
Hazır giyim sektörü

Üretim Planlama ve Kontrol Süreçlerinde Dijital İkiz Teknolojisinin Kullanılması: Tekstil Sektöründe Bir Uygulama

Öz

Bu çalışmada, hazır giyim sektöründe faaliyet gösteren öncü bir firmanın üretim tesisinde, veri dijitalleştirme projesi kapsamında süreçlerin uçtan uca incelenmesi ve yeni nesil bilgi teknolojileri kullanılarak veri odaklı süreç tasarımlarının yapılması amaçlanmıştır. Buna bağlı olarak, yeni gelişen ve hızlı büyüyen bir teknoloji olan dijital ikiz modellerinin yapılabilmesi için gerekli olan süreç altyapılarının oluşturulması hedeflenmiştir. Yapılan çalışmada ilk olarak, süreç haritaları oluşturulmuş ve süreçlere ait sürekli değişen verilerin sensörler ve arayüzler yardımıyla elde edilerek sisteme aktarılması sağlanmıştır. Daha sonra, üretim hattındaki makinelerden alınan süreç bazlı süreler ile üretilecek ürüne ait nitelikler arasında bağlantı kurularak, herhangi bir ürünün sürece girdiğinde ne kadar sürede tamamlanacağı lineer regresyon, polinomal regresyon, gradyan destekli karar ormanı regresyonu ve rassal orman regresyon algoritmaları kullanılarak Knime platformunda tahmin edilmiştir. Yapılan tahmin sonuçlarına göre rassal orman regresyon modelinin, en yüksek R^2 ve en düşük hata metrik değerlerine sahip olduğu tespit edilmiş ve bu regresyon modeli ERP altyapısına entegre edilmiştir. Ayrıca, tahmin edilen üretim süreleri ve hat üzerindeki çeşitli parametrelere göre üretim çizelgeleme çalışması tasarımı yapılmıştır. Yapılan çalışma, kendi kendine karar verebilen akıllı bir sistemin altyapısının oluşturulması bakımından önemli olup süreçlerin dijital ikizlerinin oluşturulmasında katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Endüstri 4.0 devrimiyle ortaya çıkan bilgi ve iletişim teknolojileriyle birlikte büyük veri odaklı ürün tasarımları ve üretimleri dönemine gelinmiştir [1]. Bu dönemde, şirketlerin verileri kullanarak üretimlerini akıllı hale getirmeleri için üretim süreçleriyle bu teknolojilerini entegre etmeleri aşamalarında akıllı ara bağlantı, akıllı etkileşim, akıllı kontrol ve yönetim dahil olmak üzere bir dizi akıllı operasyon gerçekleştirmeleri gerekmektedir [2, 3]. Burada, temel bir üretim birimi olarak, sadece akıllı üretimin zorunlu talebi değil, aynı zamanda fiziksel ve sanal alanlar arasındaki etkileşim ve entegrasyonu sağlamak için bir teknoloji tabana ihtiyaç duyulmaktadır [3]. Bu bağlamda, gittikçe daha fazla işletme tarafından benimsenen bir kavram olan siber-fiziksel entegrasyona ulaşmak için yeni gelişen ve hızlı büyüyen bir teknoloji olan dijital ikiz teknolojisi benzersiz bir kolaylık sağlamaktadır [4, 5]. Dijital ikiz, ürünün gerçek fiziksel dünyadaki davranışlarını sergileyen sanal bir kopyasıdır. Sorunları tespit etmeye, yeni ayarları test etmeye, her türlü senaryoyu simüle etmeye, analiz edilmesi gereken şeyleri analiz etmeye, aslında hemen hemen fiziksel dünyada yapılmasına ihtiyaç duyulan her şeyin sanal ürün üzerinde yapılmasına yardımcı olmaktadır. Dijital ikiz esasen, herhangi bir fiziksel sistemin yapısını, bağlamını ve davranışını temsil eden verilerle, geleceğe yönelik öngörüler yapmayı sağlayan bir arayüz sunmaktadır. Bunlar, fiziksel dünyayı optimize etmek için kullanılabilir, operasyonel performansı ve iş süreçlerini önemli ölçüde geliştiren çok güçlü dijital nesnelere sahiptir. Ek olarak, bizler için fiziksel ve dijital dünya arasındaki köprüdür [6]. Dijital ikiz, süreçlere ait gerçek verileri kullanarak sanal ortamlar oluşturur ve hem ürünlerin hem de süreçlerin etkili bir şekilde yürütülmesinde kolaylıklar sağlamaktadır. Süreçlerin ya da ürünlerin dijital ikizlerinin oluşturulmasındaki en önemli aşamalardan biri tasarım, üretim, dağıtım, kullanım, bakım, yükseltme ve geri dönüşüm dahil olmak üzere bir ürünün yaşam döngüsünün farklı aşamalarında oluşan verilerin toplanması ve işlenmesidir [3].

Bundan dolayı bu çalışmada, hazır giyim perakende sektöründe faaliyet gösteren öncü bir firmanın veri dijitalleştirme projesi kapsamında, fiziksel ortamın sanal kopyasının oluşturulması ile üretimi her yönden analiz etmeye yardımcı olacak dijital ikiz çalışmalarının altyapısının oluşturulması amaçlanmıştır. Bunun için, mevcut ve olması istenen sistem süreç haritaları oluşturulmuş, tüm verilerin arayüzler ile veri tabanında tutulması sağlanmış, Knime platformu aracılığıyla dört farklı regresyon algoritması kullanılarak süre tahminlemesi yapılmış ve son olarak makine duruş takibi ve üretim çizelgeleme için başlangıç aşaması çalışması yapılmıştır.

Yapılan çalışmanın bundan sonraki bölümünde Endüstri 4.0 ve dijital ikiz teknolojisi anlatılmış, üçüncü bölümde çalışmada kullanılan materyal ve metod açıklanmış, dördüncü bölümde çalışmadan elde edilen bulgulara yer verilmiş ve son bölümde değerlendirmeler yapılmıştır.

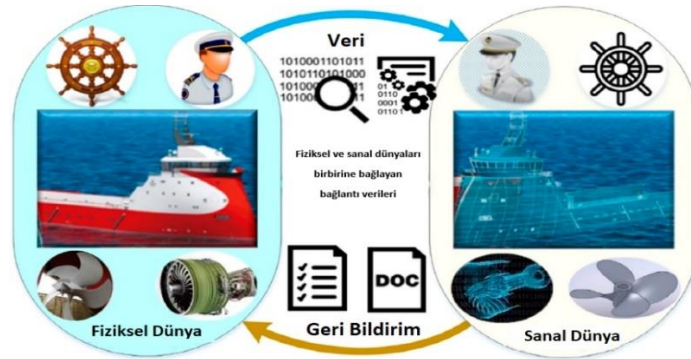
2. ENDÜSTRİ 4.0 VE DİJİTAL İKİZ (INDUSTRY 4.0 AND DIGITAL TWIN)

Endüstri 4.0'ın temelini; nesnelere internet (Internet of Things-IoT), büyük veri analitiği, siber güvenlik, bulut bilişim, artırılmış gerçeklik, simülasyon, otonom robotlar, eklemeli (katmanlı-3B) imalat gibi teknolojiler oluşturmaktadır [7, 8]. Bununla birlikte, akıllı üretime ulaşmak için üretim dünyası ile teknolojilerin entegre edilmesi zorluklardan birisidir. Bu entegreyi sağlayabilmek için sanal dünya, akıllı ara bağlantı, akıllı etkileşim, akıllı kontrol ve yönetim, vb. dahil olmak üzere bir dizi akıllı operasyonun gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, fiziksel ve sanal alanlar arasındaki etkileşim ve entegrasyonu sağlamak için bir teknolojik tabana ihtiyaç duyulmaktadır [3]. Gittikçe daha fazla işletme tarafından benimsenen bir kavram olan siber-fiziksel entegrasyona ulaşmak için dijital ikiz teknolojisi benzersiz bir yol sağlamaktadır [5].

2.1. Dijital İkiz (Digital Twin)

Sanayi ve ürün tasarımında yeni nesil bilgi teknolojilerinin ortaya çıkmasıyla birlikte, büyük veri odaklı ürün ve süreç tasarımı dönemi başladı. Buna bağlı olarak, fiziksel ve sanal dünyayı birbirine bağlayan, yeni gelişen ve hızlı büyüyen bir teknoloji olan dijital ikiz kavramı ortaya çıkmıştır [9]. NASA'nın işleme teknolojisi sonucunda ortaya çıkan dijital ikiz teknolojisi ilk olarak Grieves'in 2003 yılında Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (PLM) hakkındaki sunumunda ifade edilmiştir [10]. NASA tarafından geliştirilen dijital

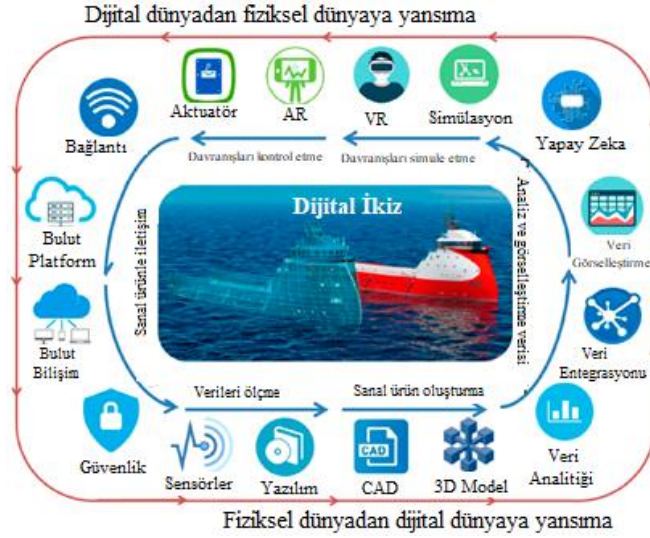
ikiz modeli, mevcut fiziksel modellerin geçmiş ve gerçek zamanlı verilerinin kullanılarak ikizinin ömrünü yansıtabilecek entegre, çok katmanlı, olasılıksal ve ultra gerçekçi simülasyon sistemi veya ürünler olduğunu kabul etmektedir [11]. Rosen vd. [12] dijital ikizin, otonom sistem davranışları ile fiziksel dünyadaki çevre arasında etkileşebilen bir model olduğunu söylemektedirler. Bununla birlikte, o zamanlar dijital ikiz kavramı teknoloji sınırlamaları nedeniyle yeterince olgun değildi. IoT, bulut bilişim, simülasyon teknolojisi ve diğer birçok teknolojinin gelişmesi ile birlikte, dijital ikiz kavramı olgunlaştı ve son zamanlarda dünya çapında büyük ilgi görmeye başladı [13]. Algılama, modelleme ve hesaplama gibi bilgi teknolojilerini kapsamlı bir şekilde kullanan dijital ikiz sanal ortamda, dijital formdaki fiziksel alanla tutarlı, yüksek kaliteli bir model oluşturur. Fiziksel alandaki bilgi, gerçek zamanlı geri bildirim ve veri bütünleşmesi sayesinde nesnelerin davranışlarını simüle edebilir, fiziksel alanı izleyebilir, teşhis edebilir, tahmin edebilir ve kararlar alarak fiziksel alan ve sanal alan arasındaki etkileşimi gerçekleştirebilir [14]. Dijital ikiz, sanal ortam ile fiziksel ortam arasındaki gerçek zamanlı etkileşim, yinelemeli operasyon, optimizasyon ve tam personel/süreç/iş verisi odaklı özelliklere sahip olduğundan, ürün geliştirme, tasarım, işletme, bakım, servis ve üretimin tüm yaşam döngüsü sürecinde yaygın olarak kullanılmaktadır. İmalat endüstrisi için dijital dönüşümü destekleyen anahtar etkinleştirme teknolojisi haline gelmiştir ve aynı zamanda endüstriyel internet uygulamasının da temelini oluşturmaktadır [15]. Dijital ikiz, bilgisayar destekli simülasyonlara dayanan tüm üretim döngüsündeki aşamaların yanı sıra üretim sistemlerinin sanal olarak devreye alınması, karar destek sistemleri davranış tahminleri ve tüm ürün yaşam döngüsü boyunca bilgi devamlılığını sağlamaya yardımcı olabilir [12, 16, 17, 18]. Bir ürünün genel dijital ikiz modeli, Şekil 1’de gösterildiği gibi fiziksel alandaki fiziksel varlıklar, sanal alanda sanal modeller ve fiziksel ve sanal dünyaları birbirine bağlayan bağlı veriler olmak üzere üç bölümden oluşur.



Şekil 1. Bir ürün için genel dijital ikiz modu [9]

Şekil 1’deki fiziksel dünya, kullanıcılar tarafından çalıştırılabilen gerçek ürünler olup üretim, kullanım, bakım, onarım, revizyon ve diğer işlemler sırasında farklı özellikte davranışlara ve performansa sahip birçok veri üretmektedir. Sanal dünya ise fiziksel ürünlerin sanal alandaki ayna görüntüleri ve eşlemesidir. Tüm yaşam döngüsü sürecini yansıtabilmesinin yanı sıra karşılık gelen fiziksel dünyanın durumunu ve davranışlarını simüle edebilir, izleyebilir, teşhis edebilir, tahmin edebilir ve kontrol edebilir. Sanal modeller sadece geometrik modelleri değil, aynı zamanda malzeme özellikleri, mekanik analiz, sağlık izleme gibi tüm kural ve davranışları da içerir. Bağlı veriler, fiziksel verilerin ve sanal verilerin entegrasyonu, füzyonu ve analizi sonrasında elde edilen bazı yeni verileri içerir. Tasarım ve üretim sürecinde, sanal modellerin parametreleri üretim hattına aktarılır ve sanal modeller gerçek fiziksel ürünlere dönüştürülür [6, 9]. Veri, dijital ikizin temelidir. Dijital ikiz için toplam eleman verilerini toplamak için sensörler, göstergeler, RFID etiketleri, okuyucular, kameralar, tarayıcılar vb. seçilmeli ve entegre edilmelidir. Veriler daha sonra gerçek zamanlı veya gerçek zamanlıya yakın bir şekilde iletilmelidir [19].

Mevcut bir fiziksel ürünün, tam fonksiyonel bir dijital ikizinin oluşturulması için Şekil 2’de gösterildiği gibi altı aşama (sanal ürünle iletişim, verileri ölçme, sanal ürün oluşturma, analiz ve görselleştirme, davranışları simüle etme, davranışları kontrol etme) gerçekleşir ve çeşitli teknolojik araçlar kullanılır.



Şekil 2. Dijital ikizin etkinleştirme teknolojisi [9]

Bu aşamalarla oluşturulan dijital ikiz ayrıca fiziksel ürün ve sanal ürünün birbirleriyle gerçek zamanlı iletişim kurmasını ve zaman içinde birbirleriyle iş birliği yapmasını sağlar [9]. Dijital ikiz, bir ürün veya yapının farklı dijital modellerin bir bileşimi olup daha yüksek fayda ve güvenilirlik sağlamaktadır.

2.2. Dijital İkiz Uygulamaları (Digital Twin Applications)

Dijital ikiz uygulamaları akıllı şehir, inşaat, sağlık, tarım, kargo taşımacılığı, sondaj platformu, otomobil, havacılık, üretim, elektrik vb. alanlarda bulunabilir. Nispeten yeni bir teknoloji olarak, dijital ikizin uygulanmasına önde gelen şirketler (örneğin, GE, PTC, Siemens, ANSYS, Dassault, vb.) öncülük etmiştir [20]. Dijital ikiz teknolojisinin, endüstride mevcut birincil uygulamaları kısaca aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.

Başlangıçta, hava sahası alanından gelen konsept, ABD Hava Kuvvetleri Araştırma Laboratuvarı tarafından hava taşıtında daha doğru bir yorgunluk tahmini oluşturmak için kullanılmıştır. Ayrıca, uçak yapısındaki hasar ve kusurları tespit etmek ve izlemek için uçak kanat modelini oluşturmak için de uygulanmıştır. Sonuçların geleneksel yöntemlerden daha yüksek verimlilik ve doğruluk gösterdiği onaylanmıştır [21]. Tüm dünyada ve Türkiye’de elektrifikasyon, otomasyon ve dijitalizasyon konularında çalışmalar yürüten ve dijital dönüşümün rehberi olmayı hedefleyen Siemens’in geliştirdiği dijital fabrika ile fabrika kurulmadan önce, tüm bileşenlerinin bilgisayar ortamında uygun yazılımlarla tasarlanarak fabrikanın çalıştırılması ve sonuçlarının değerlendirilmesi sağlanmaktadır. Böylelikle, fabrikanın kendisi ortada yokken fabrikanın nasıl çalıştığı öğrenilmekte ve en iyi çalışma sisteminin kurulması için gerekli önlemler alınabilmektedir [22]. Dassault, “Dijital İkiz Singapur” oluşturmak için 3B deneyim platformunu kullanmıştır. Sağlık alanında Sim&Cure, anevrizmaların tedavisi için hasta bazlı dijital ikiz geliştirmiştir. Tesla, otomobil ve tesis arasında eşzamanlı veri aktarımını sağlamak için her elektrikli otomobil için bir dijital ikiz geliştirmeye çalışmıştır [23]. General Electric ise uçakların yanısıra, ürün yaşam döngüsünde ürün sağlığını tahmin etmek için dijital ikiz teknolojisini kullanmış ve sonuç olarak operasyonları ve bakımları daha verimli hale getirmiştir [13]. Havacılık endüstrisinde, Airbus, Boeing, AFRL ve NASA, gerçek koşulları yansıtmak, kusurları belirlemek, olası hataları tahmin etmek ve uçak gövdesi bakım sorununu çözmek için dijital ikizi kullanmışlardır [24].

Gockel vd. [25] uçuş zamanını değerlendirmede dijital ikizi kullanarak gerçek zamanlı olarak hasar tespiti önerisinde bulunmuşlardır. Seshadri ve Krishnamurthy [26] uçak yapısal sağlık yönetimi için dijital ikize dayanan bir hasar karakterizasyonu yöntemini önermişlerdir. Bu durum, hasar yeri, büyüklüğü ve yönelimini tahmin etmede büyük ilerlemeler göstermiştir. Um vd. [27] modüler, çok satıcılı montaj hatlarında tak ve çalıştır özelliğini desteklemek için dijital ikizi temel alan evrensel bir veri modeli önermişlerdir. Zhang vd. [28] içi boş camın otomatik üretim hattı için dijital ikiz odaklı hızlı bir özelleştirme tasarımı ve optimizasyon yaklaşımı ortaya koymuşlardır. Magargle vd. [29] bir fren sistemi modelinde

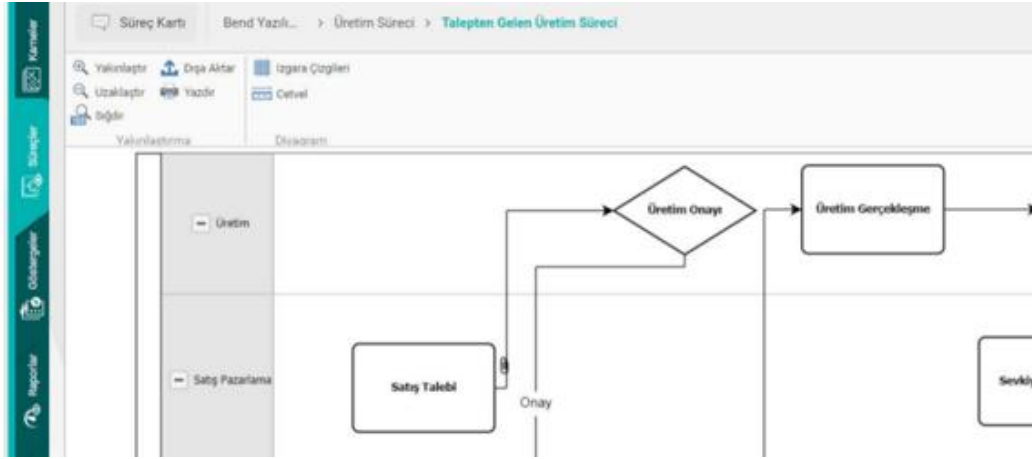
simülasyon tabanlı bir dijital ikiz modelin oluşturulmasını önermişlerdir. Vathoopan vd. [30] bir otomasyon modülünün dijital ikizini kullanan yeni bir modüler düzeltici bakım metodolojisini önermişlerdir. Coronado vd. [31] titanyum parçaların üretim çalışmasını izlemek için üretim yürütme sistemini kullanan bir vaka çalışmasıyla üretim kontrolü ve optimizasyonu için kullanılabilen bir atölye dijital modelini gerçekleştirmişlerdir. Cunbo vd. [32] karmaşık bir ürün montaj süreci için dijital ikiz tabanlı bir akıllı yönetim ve kontrol yöntemi önermişlerdir. Liau vd. [33] fiziksel süreçlerin iki yönlü kontrolünü sağlamak için enjeksiyonlu kalıplamanın tüm aşamalarını sanal modelleyerek, enjeksiyonlu kalıplama endüstrisine dijital bir ikiz uygulamışlardır. Botkina vd. [34] süreç planlaması için optimize edilmiş işleme çözümlerini geliştirmek için dijital ikiz modelini uygulamışlardır. Guivarch vd. [35] mekanik bileşenlerin hizmet ömrünü daha iyi tahmin etmek için helikopter güç sistemleri için bir dijital ikiz geliştirmişlerdir. Guo vd. [36] fabrika tasarımında kullanılmak üzere esnek dijital ikiz oluşturmaya ve buna uygun değişiklikleri gerçekleştirmeye yardımcı olmak için modüler bir yaklaşım önermişlerdir. Mukherjee ve DebRoy [37] 3B baskı makinesinin dijital ikizinin oluşturulması çalışmasını yapmışlardır. Chakshu vd. [38] birleştirilmiş kan akışı ve kafa titreşim modeli yardımıyla bir insan yüzünün videosundan karotis darlığının ciddiyetini tespit etmek için dijital ikiz tabanlı bir metodoloji önermişlerdir. Shim vd. [39] daha güvenilir karar verme için dijital ikiz model konseptini kullanarak yeni nesil bir köprü bakım sistemi önermişlerdir. Ghosh vd. [40] endüstri 4.0 üretim sistemleri için gizli Markov modellerini kullanarak dijital ikizlerin oluşturulmasını önermişlerdir. Önerilen dijital ikiz modeli taşlama işlemlerinde oluşan yüzey pürüzlülüğünün dijital ikizinin oluşturulmasına uygulanmıştır. Coraddu vd. [41] gemideki sensörlerden toplanan büyük miktarda bilgidan yararlanarak, geminin veri güdümlü bir dijital ikizini oluşturmuşlar ve deniz kirliliğinden kaynaklanan hız kaybını tahmin etmek için kullanmışlardır. Bao vd. [42] üretim proseslerinde dijital ikiz için bir modelleme ve operasyon yaklaşımı önermişlerdir. Luo vd. [43] CNC takım tezgahının güvenilir kestirimci bakımını gerçekleştirmek için dijital ikiz tarafından yönlendirilen hibrit bir yaklaşım önermişlerdir. Liu vd. [19] yaptıkları çalışmada, atölyelerin hızlı ve verimli bir şekilde süreç planları oluşturması için akıllı bir zamanlama yöntemi geliştirmede dijital ikiz ve süper ağın avantajlarını bütünleştirmişlerdir. Qian vd. [44] dijital ikiz oluşturma sürecinde veri modelleme ve dijital modelin doğrulanma sorununu çözmek için çok boyutlu veri modelleme ve model doğrulama yöntemlerini önermişlerdir. Suljagic ve Çelebi [45] yaptıkları çalışmada, düşük maliyetli bir robot kolunun dijital ikizini elde ettikten sonra gerçek zamanlı verilerle bir simülasyon uygulaması yapmışlardır. White vd. [46] akıllı şehir uygulamasında kullanılmak üzere İrlanda'daki Docklands bölgesinde bir dijital ikiz çalışması yapmışlardır. Burgos ve Ivanom [47] Covid-19 pandemisinin gıda perakende tedarik zincirleri ve dayanıklılıkları üzerindeki etkisini tespit edebilmek için gerçek hayattaki pandemi senaryolarına dayanarak, anyLogistix dijital tedarik zincirleri ikizinin yardımıyla tedarik zincirleri operasyonlarını ve performans dinamiklerini ayrık olay simülasyon modeli geliştirerek incelemişlerdir. Yi vd. [48] akıllı montaj süreci tasarımı için dijital bir ikiz referans modeli sunmuşlar ve üç katmanlı DT tabanlı akıllı montaj için bir uygulama çerçevesi önermişlerdir. Wang vd. [15] yaptıkları çalışmada, izole edilmiş makineleri birbirine bağlı bir sisteme bağlamak ve makine koşullarını gerçek zamanlı olarak izlemek için bir dijital ikiz çerçevesi önermişlerdir. Priyanka vd. [49] petrol boru hattı sisteminin risk olasılık oranını analiz etmek ve tahmin etmek için makine öğrenimi ve prognostik algoritmalar modeline dayalı dijital ikiz çerçeve yapısını sağlamayı amaçlamışlardır. Choi vd. [50] derin öğrenme ve dijital ikizi kullanan güvenlik bilincine sahip insan-robot iş birliği için yeni entegre bir karma gerçekliğe sahip bir sistem önermişlerdir. Bu çalışma, robotun dijital ikizi ve insan iskeletine dayalı basit ama etkili bir 3B uzaklık tabanlı güvenlik mesafesi hesaplama yöntemi önermektedir. Lari vd. [51] yapılan ölçümler ile belirli bölgelerin derinliğini simüle etmek için doğal kaynak bölgesi tükenmesi süreçlerinin ve gelecekteki eğilimlerin genel bir dijital ikizini oluşturma önerisinde bulunmuşlardır. Gao vd. [52] belirsiz liman sevkiyatı için dijital ikiz ile etkinleştirilmiş otomatik bir depolama sahası çizelgeleme çerçevesi önermişlerdir. Otomatikleştirilmiş depolama alanı çizelgelemesindeki dijital ikiz uygulamaların operatörlerin optimizasyon kararları almasına yardımcı olduğunu göstermiştir. Granacher vd. [53] karar vericilerin ihtiyaçlarını ve tercihlerini etkileşimli olarak optimizasyon tabanlı bir modele dönüştüren ve anlamlı çözümler üreten bir süreç ve enerji sistemi tasarımının dijital ikizini önermişlerdir. Yang vd. [54] bir iletim sisteminin performans düşüşünü tahmin etmek için dijital ikiz teknolojisi tarafından yönlendirilen bir hibrit yaklaşım çerçevesi sunmuşlardır. Fang vd. [55] deniz yapılarının çatlak büyüme eğilimini doğru bir şekilde tahmin etmek için dijital ikize dayalı açık deniz platformlarında yorulma çatlağı büyüme tahmin yöntemini önermişlerdir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Yapılan çalışmada, hazır giyim perakende sektöründe öncü olan bir firmanın veri dijitalleştirme projesi kapsamında, fiziksel ortamın sanal kopyasının oluşturulması ile üretimi her yönden analiz etmeye yardımcı olacak dijital ikiz çalışmalarının altyapısının oluşturulması amaçlanmıştır. Firmadaki veri dijitalleştirme projesi kapsamında yapılacak olan; mevcut ve olması istenen sistem süreç haritalarının oluşturulması, tüm verilerin arayüzler ile veritabanında tutulmasının sağlanması ve olması istenen fiziksel ve sanal sistemin kurulması çalışmaları üç fazdan oluşmaktadır. Bu fazların kapsamları aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

3.1. Birinci Faz Çalışması (First Phase Study)

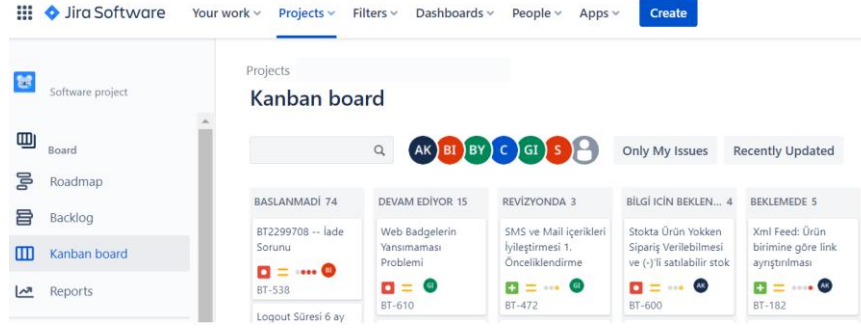
Üretim sahasında bulunan; ham madde depolama ve sevk, üretim hattı giriş ve çıkış, yarı mamul kabul, adresleme ve sevk süreçleri için mevcut ve olması gereken süreç haritaları işlemleri, süreç yönetim sistemi olan ve kurumların fonksiyonel odaklı yönetim anlayışından süreç odaklı yönetim anlayışına geçiş için mevcut süreçlerin modellenmesi, görsel olarak dokümanite edilmesi, süreç performans göstergelerinin belirlenmesi ve yönetilmesi gibi işlevler ile gerekli altyapıyı sağlayan ve Şekil 3'te bir bölümü gösterilen ensemble platformu üzerinde oluşturulmuştur. Ayrıca, ensemble platformuna tüm birimlerdeki çalışan bilgileri, görev tanımları ve talimatlar eklenerek tüm çalışanlar tarafından görüntülenebilmesi sağlanmıştır.



Şekil 3. Ensemble platformu süreç yönetim ekranı

3.2. İkinci Faz Çalışması (Second Phase Study)

Süreçlerde kullanılan form, program, talimat ve kullanıcılar incelenerek süreçlerdeki verinin veritabanında tutulabilmesi için bir kurumsal kaynak planlama (ERP) sistemi oluşturulmuştur. Yazılım projelerinde, bütçe ve zaman kısıtına uygun olarak müşteri gereksinimlerinin karşılanabilmesi için proje yönetimi büyük önem taşımaktadır. Yazılım projesinin kalitesini etkileyen en önemli unsurlardan birisi kullanılan proje yönetimi metodolojisidir. Çevik (agile) proje yönetimi, yazılım projelerinin geliştirilmesi için kullanılabilir yinelenmeli ve artırılmalı proje yönetim biçimidir. Piyasaya çok çabuk ürün çıkarabilmeyi, değişen isteklere hızlıca yanıt verebilmeyi ve en kısa sürede bir yazılım ürününü müşteri hizmetine sunabilmeyi amaçlaması açısından çevik metotlar avantajlı bulunmaktadır. Bu yüzden, bu çalışmada ERP sistemi oluşturulurken, proje yönetimi metodolojilerinden çevik metodu kullanılmıştır. Ayrıca, iş takibi, proje yönetimi, hata takibi, iş akış yönetimi ve raporlama gibi birçok işlemin online platform aracılığıyla yapılmasını ve tüm ekip tarafından görüntülenebilmesini sağlayan Jira proje takip platformu da çevik metodu ile birlikte kullanılmıştır. Buna bağlı olarak, projelerin girişi, proje ekibinin oluşturulması ve proje takibi Şekil 4'te gösterilen jira platformu aracılığıyla yapılmıştır. Böylelikle, ihtiyaçlara ve kurumsal yapılanmaya göre düzenlenebilen bir sistem oluşturulmuştur.



Şekil 4. Jira platformu proje yönetim ekranı

Bu fazda; sahada el terminali, tablet ve televizyon kullanılırken ofiste bilgisayar ve yazıcılar kullanılmıştır. ERP sisteminin oluşturulması süreçler bazında gerçekleştirilmiş olup Systems Analysis and Program Development Graphical User Interface (SAP GUI), Systems Analysis and Program Development FIORI, web ve android uygulamalar kullanılmıştır. Raporlama ve dashboard araçları olarak Business Warehouse (BW), Power Business Intelligence (Power BI) ve Systems Analysis and Program Development Objects Business Intelligence (SAP BI) kullanılmıştır.

3.3. ÜÇÜNCÜ FAZ ÇALIŞMASI (THIRD PHASE STUDY)

Fiziksel ortamdaki tüm verilerin sanal ortama aktarılması sağlanarak istenilen parametreler ve algoritmalar ile süre tahminleme, duruş takibi ve üretim çizelgeleme gibi çalışmalar ile haberleşebilen ve kendi kendine karar verebilen bir sistem inşası için altyapı çalışması yapılmıştır. Makinelere sensörler vasıtasıyla ve çalışanlardan arayüzler ile alınan veriler ERP sisteminde depolanarak büyük bir veri elde edilmesi sağlanmıştır. Elde edilen büyük veri ile farklı özelliklere sahip bir ürünün üretiminin ne kadar sürede tamamlanabileceği sonucuna ulaşmak için tahminleme çalışması yapılmıştır. Tahminleme çalışmasında; verinin işlenmesi, yorumlanması, görselleştirilmesi ve raporlanmasını sağlayan bir veri analiz platformu kullanılmıştır. Knime platformunda bulunan ve sayısal tahminlemede kullanılabilen lineer regresyon, polinomal regresyon, rassal orman regresyon algoritması ve gradyan destekli karar ormanı regresyonu olmak üzere dört algoritma seçilmiştir. Bu algoritmalarla model kurularak veri seti için üretim süresi tahminlemesi yapılmıştır.

4. BULGULAR (FINDINGS)

4.1. Birinci Faz Çalışmasından Elde Edilen Bulgular (Findings from the First Phase Study)

4.1.1. Ham Madde Depolama ve Sevk Süreçleri (Raw Material Storage and Shipping Processes)

Bu aşamada, ham maddelerin, üretilecek ürünlere göre satın alma işlemi tamamlandıktan sonra depolama alanına alış, kalite kontrol, adresleme, stoklama ve üretim yapılacak sahalara sevk işlemleri yapılmaktadır. Bu aşamada mevcut süreçler incelenmiş ve olması istenen süreçler Tablo 1’de verildiği gibi belirlenmiştir.

Tablo 1. Ham madde depolama ve sevk süreçlerinin incelenmesi

Mevcut Süreç	Olması İstenen Süreç
Ham maddeler termin tarihi referans alınarak satın alınır.	Ham maddelerinin termin tarihi referans alınarak satın alınması.
Ham madde kabul için manuel olarak kapasite yönetimi yapılarak tedarikçilere mail üzerinden randevu verilmektedir.	Ham madde kabulde kapasite yönetiminin ve randevu sürecinin sistemselsel olarak yapılması.
Verilen randevu tarih ve saatinde fiziksel ve sistemselsel alış işlemi gerçekleştirilir.	Tedarikçi tarafından alınan randevu tarih ve saatinde fiziksel ve sistemselsel alış işleminin alt ve üst tolerans değerleri arasında gerçekleştirilmesi.

	Tolerans değerlerinin sistem tarafından satın alma siparişi miktarına göre kontrol edilmesi ve toleransı aşan durumlar için yönetici onayına düşmesi.
Kalite kontrol işlemi yapılarak kontrol formu doldurulup ilgili kişilere iletilir.	4 puan kalite kontrol sistemi kullanılarak sonuçların kontrol esnasında sisteme saha görevlisi tarafından girilmesi. Girilen kalite kontrol sonuçlarına göre onay alınması gereken ham maddelerin ilgili kişinin sistem üzerinden onayına düşmesi ve tüm sonuçlar ile onaylarının veritabanında tutulması.
Sonuç onayı gerekiyor ise adresleme için ilgili kişi onayı beklenir.	Barkod adresleme sistemi ile kalite kontrolsüz de olsa adresleme yapılabilmesi.
Kalite kontrolden geçen veya onay alan ham maddeler raflara konularak manuel adreslenir.	Kalite kontrol işlemi tamamlanmayan ham maddenin üretime sevk edilememesi.
Üretime çıkış için ilgili kişiler tarafından hazırlama emri verilir.	Üretime çıkış için ilgili üretici ve miktar seçimi ile sistem üzerinden hazıredim yapılması. Hazıredimin ilgili birime sistemsel çıkış işlemi ile sevk edilmesi.
Çıkış işlemi için adresteki ham madde bulunarak ilgili birime sevk irsaliyesi ile teslim edilir	Sevk irsaliyesinin sistem tarafından yazdırılması.

4.1.2. Üretim Hattı Giriş ve Çıkış Süreçleri (Production Line Entry and Exit Processes)

Bu aşamada ise ham maddeler, üretim hattı doluluğu ve üretim terminlerine göre üretim alanlarına gönderilip ön işlemlerden geçmesi sağlanır. Ön işlemler tamamlanıp gerekli onaylar alındıktan sonra ham madde üretim proseslerinde, üretim özelliklerine göre işlenir ve yarı mamul olarak torbalanır. Bu aşamada da mevcut süreçler incelenmiş ve olması istenen süreçler Tablo 2’de verildiği gibi belirlenmiştir.

Tablo 2. Üretim hattı giriş ve çıkış süreçlerinin incelenmesi

Mevcut Süreç	Olmaması İstenen Süreç
İlgili çıkışa istinaden ham madde kabul edilir.	Ham madde kabulünün barkod okutma yapılarak üretim stoğuna alınması.
Çıkış irsaliyesine göre iş talimatı çıktısı alınır.	Barkod okutma ile ham maddeye ait tüm sipariş bilgilerinin sistemde görüntülenebilmesi.
Ham maddede ölçüm yapılarak sonuçlar iş talimatına el ile yazılır.	Ham maddeye ait tüm ölçümlerin saha görevlisi tarafından sistemsel giriş yapılması.
Ölçümlere göre kalıp çizimleri yapılır ve veriler iş talimatına el ile yazılır.	Giriş yapılan ölçülere göre kalıp çizimlerinin yapılarak ilgili bilgilerin sistemsel giriş yapılması.
Yapılan ölçümlere göre müşteriden excel formu ile onay alınır.	Giriş yapılan bilgilere göre müşteriye otomatik mail düşmesi ve sistemsel onayın verilmesi.
Onay işleminden sonra ham madde üretim hattına girerek 3 farklı procesten geçer.	Verilen onayın üretim birimine otomatik mail ile iletilmesi. Onay gelen kayıtları saha personelinin görerek yapılan işlemleri kayıt yapabileceği bir sistemin kurulması.
Proseslerde yapılan işlemler manuel olarak iş talimatı ve ilgili defterlere kayıt edilir.	Üretim çizelgelemesinin sistem tarafından yapılmasının sağlanması. Ekipman bakım, onarım ve duruş takibinin yapılabilmesi.
Yarı mamul operasyonlara göre torbalanarak sevk birimine teslim edilir.	Üretilecek ürün detayının saha personeli tarafından görülebilmemesinin sağlanması.
Yarı mamul üretim hattından çıktıktan sonra gerçekleşen bilgiler müşteriye mail ile iletilir.	Gerçekleşen veriler ile planlanan verilerin haberleşmesi sağlanarak bir karar destek sistemi kurulması ve hat dengelemenin belirlenen kriterlere göre sistem tarafından otomatik olarak yapılmasının sağlanması.

4.1.3. Yarı Mamul Kabul ve Sevk Süreçleri (Semi-Finished Product Acceptance and Dispatch Processes)

Burada, yarı mamul, üretim termin süresine göre adreslenerek stoklanır ve termini yaklaşanlar için randevu sistemi ile sevk planlanır. Bu aşamada mevcut süreçler incelenmiş ve olması istenen süreçler Tablo 3’te verildiği gibi belirlenmiştir.

Tablo 3. Yarı mamul kabul ve sevk süreçlerinin incelenmesi

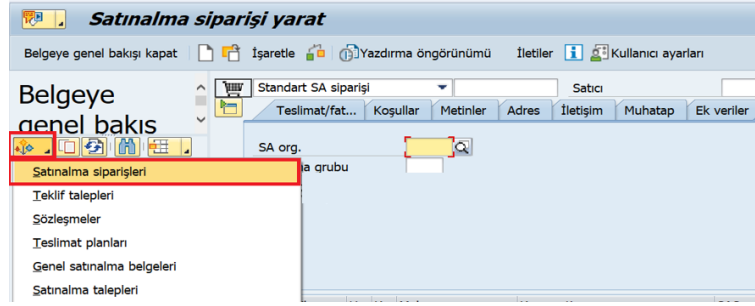
Mevcut Süreç	Olması İstenen Süreç
Üretim hattından çıkan yarı mamuller Excel formu doldurularak teslim alınır.	Üretim hattından çıkan yarı mamullerin sistemsel olarak kabul edilmesinin sağlanması.
Yarı mamuller operasyon bazında sepetlere konur ve ürün bilgilerinin bulunduğu excel formları sepetlere yapıştırılır. Sepetler saha personeli tarafından raflara yerleştirilir ve stok formu doldurulur.	Yarı mamullerin sepetlere ve raflara sistemsel olarak adreslenmesinin sağlanması.
Stok girişi yapacak personele form iletilerek excele giriş yapılması sağlanır.	Tüm form ve excellerin sistem üzerine aktarılması ve sistemsel raporlama yapılmasının sağlanması.
Sevk olacak yarı mamul için ilgili kişi mail üzerinden randevu talep formu ile randevu talebini iletir.	Stokların anlık olarak görülmesi ve system üzerinden randevu talebinin oluşturulmasının sağlanması.
Randevu bilgisine göre hazırlanacak ürünler listenelenip saha personeline iletilir.	Saha personelinin raf adreslerindeki ürünleri görerek işlem yapmasının sağlanması.
Personel sahayı gezerek ürünleri bulur ve sepetleri sevk alanına çeker.	
Ürünlerin irsaliyesi kesilerek ilgili randevu için araca yüklemesi gerçekleştirilir.	
Sevk olan yarı mamul bilgileri sevk kağıdına yazılarak stok listesinden çıkış yapacak personele iletilir.	İlgili randevu talebine göre sevk işleminin yapılarak stoktan düşme sağlanması.
Sevk olan yarı mamuller stok Excelinden çıkarılarak stokun güncellenmesi sağlanır.	
Belirli periyotlar ile randevu talep edecek birime stok raporu hazırlanarak mail üzerinden iletilir.	

4.2. İkinci Faz Çalışması (Second Phase Study)

Mevcut ve olması istenen süreç haritaları oluşturulduktan sonra bu fazda tüm süreçlerin ERP'ye aktarım çalışmaları yapılmıştır.

4.2.1. Ham Madde Depolama ve Sevk Süreçleri ERP Aktarımı (Raw Material Storage and Dispatch Processes ERP Transfer)

Ham madde satın alma siparişlerinin oluşturulabilmesi için sisteme ham madde tanımları ve tedarikçi firma bilgileri eklenmiştir. SAP satın alma siparişi oluşturma ekranı ham madde ve tedarikçi seçimi seçenekleri eklenerek, satın alınacak miktar ve ödenecek ücret bilgilerinin girilmesi ile oluşturulmuştur. Tüm kayıtlar kullanıcı bazında tutularak onay süreçleri kullanıcı bilgisi üzerinden ilerlemiştir. Tedarikçi ile entegrasyon çalışması yapılarak sipariş ve fiyat bilgilerinin iletilmesi sağlanmıştır. Tedarikçi tarafından randevu alınabilecek randevu sistemi geliştirilmiş olup depolama kapasitesi her birim için sipariş yoğunluğuna göre değişkenlik gösterebilecek şekilde tasarlanmıştır. Tedarikçiden gelen ürünler lojistik birimine teslim edildiğinde entegrasyon ile sipariş detay bilgileri alınmış ve fiili olarak az ya da fazla gelme durumları için onay süreci işletilmiştir. Onay süreci için sisteme tolerans değerleri verilmiş olup gelen sipariş bilgilerinin aralığa uymaması durumunda satın alma siparişini oluşturan ilgili kişinin onayına sistemsel olarak düşmekte ve onay işleminden sonra ham madde kabul gerçekleştirilebilmektedir. Yapılan satın alma siparişi oluşturma ve onay ekranı Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Satın alma siparişi oluşturma ve onay ekranı

Ham madde satın alındıktan sonra tedarikçi firma tarafından depolama alanına getirilir ve depo girişi yapılır. Depo girişinden sonra satın alma siparişinin durumu kalite kontrolle girecek olarak güncellenir ve el terminali ile ham madde üzerindeki barkod okutma işlemi yapılarak raf alanına yönlendirilir. Ham madde hata kontrolü Şekil 6’da verilen ışıklı kalite kontrol makinelerinde yapılmaktadır.



Şekil 6. Kalite kontrol makinesi

Kalite kontrol işlemi proses doluluğuna göre örneklem seçimi yapılarak yürütülmektedir. Yapılan kontrol sonrası elde edilen değerlere göre Tablo 4’te gösterilen hata puanları verilir.

Tablo 4. Kalite kontrol sistemi hata puanları

Kumaş hata uzunluğu	Hata puanı
0-3 inç arası	1
3-6 inç arası	2
6-9 inç arası	3
9 inç yukarısı	4
Delik ve açıklık 1 inç ya da daha düşük	2
Delik ve açıklık 1 inç üzeri	4

Sonrasında, 4 puanlık kalite kontrol sistemi için arayüz ile saha personelinin işlem bilgilerinin girişini yapacağı Şekil 7’de gösterilen bir uygulama geliştirilmiştir. Kalite kontrol makinesindeki sensörler ile tabletteki uygulamanın haberleşmesi sağlanarak ilgili bilgilerin alınması sağlanmıştır. 4 puanlık sisteme göre kalite kontrolden geçen satın alma siparişinin durumu puan bilgisine göre “uygun”, “kusurlu” veya “uygunsuz” olarak güncellenmektedir. Kalite kontrol işlemi yapılmadan ve durumu uygunsuz olarak görünen ham maddeler için çıkış işlemine sistem tarafından izin verilmemektedir.

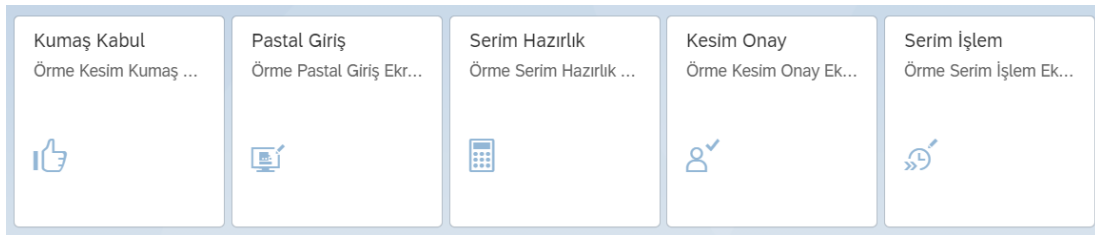


Şekil 7. Kalite kontrol yazılım uygulaması

Çıkış işlemi için ilgili kişi tarafından ham maddeler siparişe bağlanır ve ilgili üretim yeri için sistemsel çıkış talebinde bulunur. Yapılan talep lojistik birimi tarafından toplu olarak rezervasyon ekranından takip edilir. Çıkış işlemi yapılacak ham maddeler el terminali ile toplanarak sistemden barkotlu sevk irsaliyeleri alınır ve ilgili birime teslim edilir. Sistem ile ham madde kabul süresi, adresleme süresi, kapasite doluluk oranı, kalite kontrol oranı, sevk süresi ve hazırlama süresi gibi bilgiler raporlama araçlarıyla raporlanabilmektedir.

4.2.2 Üretim Hattı Giriş ve Çıkış Süreçleri ERP Aktarımı (Production Line Entry and Exit Processes ERP Transfer)

Çıkış işlemi yapılan sevk irsaliyesindeki barkod okutulmuş üretim birimine sistemsel giriş yapılır ve ham madde için yapılan ölçüm bilgileri saha personeli tarafından sisteme girilir. Burada, herhangi bir kâğıt çıktı alınmasına gerek olmadan tüm işlemler sahadaki tablet, bilgisayar ve televizyon üzerinden takip edilebilmektedir. Yapılan bu faaliyetlerin proses bazlı işlem ekranları Şekil 8’de gösterilmektedir.



Şekil 8. Proses bazlı işlem ekranları

Bu aşamada, ölçüm bilgileri girilen ham maddeler ilgili kişilere sistemsel olarak onaya gönderilir ve onay gelmeden sistemsel olarak işleme alınması mümkün olmamaktadır. Onay gelen siparişler onay ekranına düşmekte ve durumu onaylandı olarak görülmektedir. Durumu onaylı olan siparişler onay tarihine ve termin bilgisine göre sistem tarafından sıralanarak üretim hattı girişindeki birinci ekrana yansır. Sonrasında, hat doluluk ve çalışan bilgisine göre sistem tarafından üretim çizelgeleme yapılır ve hatta çalışan kişilerin önüne üretim yapılacak siparişler Şekil 9’da gösterilen üretime alınacak sipariş bilgilendirme ekranına düşer. Her bir üretim hattındaki görevli personel tarafından tablet ile ilgili sipariş için *üretim başladı* olarak durumu güncellenir. Tablet ekranında personelin ihtiyacı olan tüm bilgiler görüntülenebilmektedir. Siparişin durumu “*üretim başladı*” olarak güncellendiğinde sipariş bilgilendirme ekranından kaybolmakta ve üretim çizelgeleme ekranı da güncellenmektedir.

SerimID	PastalID- gerber	Parti	Satıcı Partisi	Pastal Beden Sayısı	En	Malzeme Kodu	Malzeme Tanım	Model Adı	MS Mik.	YMM
12290	165-23107-MTRJ-175A	21Y3489869	17769-1-1-3	Pastal Beden Sayısı	En	1030123655	30/1 Penye LQJ BLA SUP EMPRM	GPJ,COOKING-B 21K 3010	3.408	3.40
12288	115-34942-SYH-187	21Y3237668	2988	Pastal Beden Sayısı	En	1030063171	30/1 PNY PAM LYC SUP DÜZ CVL LCW YENİ Sİ	TYT,KUŞAK-ALT 21Y 3010	11.340	11.3

Şekil 9. Üretime alınacak sipariş bilgilendirme ekranı

Birinci prosesdeki işlem bittiğinde siparişin durumu “*üretim bitti*” olarak güncellenir ve gerçekleşen verinin makineden alınması sağlanır. İşlemler tüm prosesler için aynı şekilde girilir. Gerçekleşen verilerin makineler üzerinden alınarak ilgili siparişe aktarılması ve listelenmesi Şekil 10’da verilen üretim bilgi görüntüleme ekranında gösterilmektedir.

Status	Serim Başl	Serim Başl	Serim Bti	Serim Bti	Kullanı...	Model Adı	Üretim Sp	Renk	Müşteri sprş...	Mştr.spr...	İplik ...	Kumaş Kalı
SR	14.06.2021	22:25:07	14.06.2021	23:03:58		UK.BDY,DARLY-1W 21K 30...	1202049671	FFB	1010100795	100	220	122
SRMF	14.06.2021	22:25:07	14.06.2021	22:25:54		UK.BDY,DARLY-1W 21K 30...	1202049671	FFB	1010100795	100	220	122
SRMF	14.06.2021	22:25:07	14.06.2021	22:25:31		UK.BDY,DARLY-1W 21K 30...	1202049671	FFB	1010100795	100	220	122
SRMF	16.06.2021	09:14:42	16.06.2021	09:15:15		UK.BDY,DARLY-1W 21K 30...	1202049671	FFB	1010100795	100	220	122

Şekil 10. Üretim bilgi görüntüleme ekranı

Sonrasında, proses ve kullanıcı bazlı tüm bilgilerin sistemde tutularak günlük, haftalık ve aylık performansların görüntülenebileceği ekran Şekil 11'deki gibi oluşturularak ilgili birimlere konumlandırılmıştır.

İşe Gelen Personel Sayısı		Serim Kg				Toplam Adet			Serim Sayısı			14. HAFTA		Serim Kg	
PAZARTESİ	80	10. HAFTA	125.000	850.000	250	14. HAFTA	130.000	870.000	200	PAZARTESİ	25.000	PAZARTESİ	25.000	SALI	20.000
SALI	82	11. HAFTA	130.000	900.000	300	12. HAFTA	135.000	910.000	350	ÇARŞAMBA	30.000	ÇARŞAMBA	30.000	PERŞEMBE	28.000
ÇARŞAMBA	85	13. HAFTA	130.000	790.000	250	14. HAFTA	130.000	870.000	200	CUMA	24.000	CUMARTESİ		PAZAR	MESAI
PERŞEMBE	80														
CUMA	78														
CUMARTESİ															
PAZAR															

Serim Personeli	Gerçekleşen Kg					Serim		
	10. HAFTA	11. HAFTA	12. HAFTA	13. HAFTA	14. HAFTA	10. HAFTA	11. HAFTA	12. HAFTA
ÖRME KESİM/HANE SEFİ	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	100	100	1
İŞ GELİŞTİRME MÜHENDİSİ	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	100	100	1
OPERASYON DİSTER GÖRÜŞÜSÜ	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	100	100	1
ÜRETİM PASTAL UZMANI	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	100	100	1
MAKİNE BAKIM TEKNİSYENİ	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	100	100	1
CUTTİK ELEMANI	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	100	100	1
CUTTİK YARDIMCI ELEMANI	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	100	100	1
KURMAK SAKUL VE KESİME SEVK ELEMANI	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	100	100	1
MAKASTAR	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	100	100	1
PASTAL SERİM ELEMANI	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	100	100	1
PASTAL SERİM YARDIMCI ELEMANI	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	100	100	1
TANIM METOLARNA ELEMANI	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	100	100	1
HİEMETLİ	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	100	100	1

Serim Personeli	PAZARTESİ			SALI			ÇARŞAMBA			Kg
	Kg	Serim Sayısı	Adet	Kg	Serim Sayısı	Adet	Kg	Serim Sayısı	Adet	
MUSTAFA BAYAZIT	2.500	15	20.000	2.500	15	20.000	2.500	15	20.000	2.500

Şekil 11. Performans gösterge raporu ekranı

Proseslerde yarı mamul için Şekil 12'deki QR kodlu barkod yazdırması yapılarak üretime ait tüm bilgiler QR kod içerisinde tutulmuştur. Yarı mamuller QR kodları ile paketlenerek sevk birimine teslim edilir. Oluşturulan QR sistemiyle onay süresi, proses bazlı çevrim süresi, kullanıcı bazlı işlem süresi, üretim gün süresi ve makine duruş oranı gibi bilgiler ölçülebilmektedir.



TORBA-202110057900

Şekil 12. Paket takip QR kodları

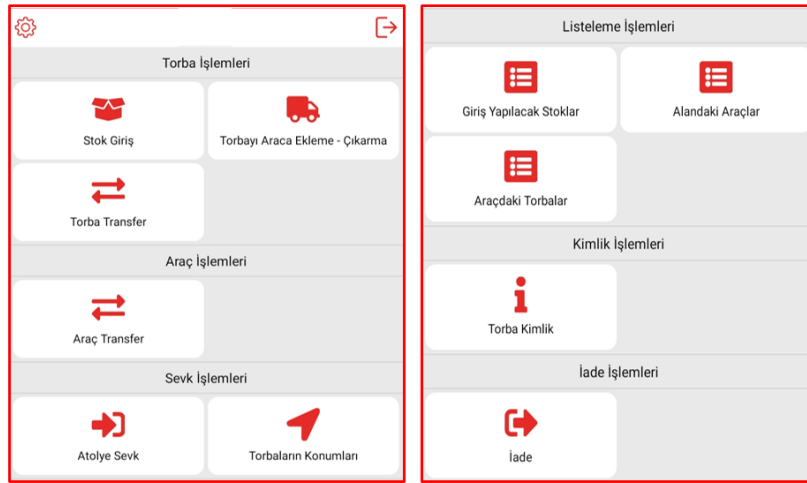
4.2.3. Yarı Mamul Kabul ve Sevk Süreçleri ERP Aktarımı (Semi-Finished Product Acceptance and Dispatch Processes ERP Transfer)

QR kodlar el terminali ile okutularak yarı mamul sevk biriminin stoğuna alınır ve yarı mamuller operasyon bazında sepetlere adreslenir. Sistem yarı mamul için operasyon bilgisini kontrol ederek yalnızca ilgili operasyona ait sepetlere adreslenmesine izin vermektedir. Bir sepete başka bir siparişe ait yarı mamul paketi eklenmek istendiğinde uyarı vererek siparişlere ait paketlerin karışmasını önlemektedir. Sepetler alınarak el terminali ile raflara adreslenir. Her bir operasyon için farklı raf alanları olup operasyon tipine uymayan sepetler ilgili raflara adreslenememektedir. Burada kullanılan araç ve alan QR kodları Şekil 13'te gösterilmektedir.



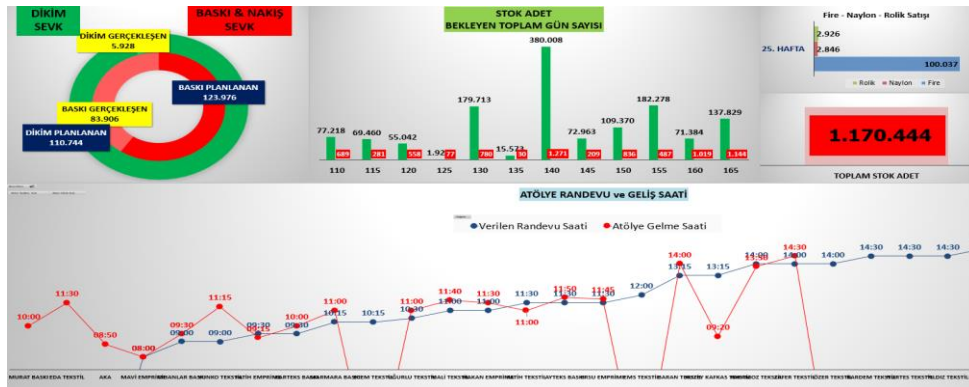
Şekil 13. Sepet ve adres QR kodları

Stokta görünen yarı mamul sevki için ilgili kişi ilgili firma için sistemden randevu talebini yapar. İlgili randevu bilgisine göre saha personeli Şekil 14’teki uygulamadan el terminaline sepetleri okutarak sevk alanına transfer sağlar.



Şekil 14. Saha personeli app uygulaması

Her bir sepet ve paket QR kodu okutması el terminali ile gerçekleştirilerek kontrol listesi oluşturulur ve sevk irsaliyesi kesilir. Sevk ve kontrol listesi bilgileri otomatik mailer ile ilgili kişilere yönlendirilir. Randevu ve sevk alacak araç bilgileri Şekil 15’teki dashboard ile sahadaki personele yansıtılarak işlem kolaylığı ve sevk süresinin minimuma indirilmesi hedeflenmiştir.



Şekil 15. Sevk süreçleri dashboard ekranı

Tüm işlemler kullanıcı bazlı yapılmakta ve sistem üzerinden takip edilmektedir. Sistem ile kapasite doluluk oranı, stok bekleme gün süresi, sevk süresi ve adresleme süresi gibi bilgiler raporla araçlarıyla raporlanabilmektedir.

4.3. Üçüncü Faz Çalışması (Third Phase Study)

Bu faz çalışmasında, tüm süreçlerin kurumsal kaynak planlama ERP sistemine aktarımı yapıldıktan sonra sistemde oluşan veriler ile süre tahminleme, makine duruş takibi ve üretim çizelgeleme çalışmaları yapılmıştır.

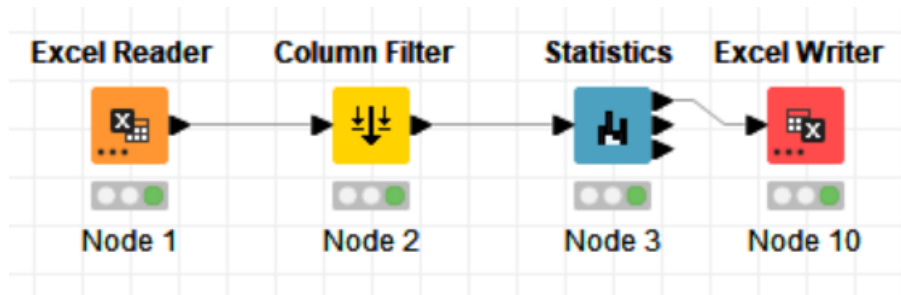
4.3.1. Süre Tahminleme (Time Estimation)

Üretim hattındaki makinelerden alınan proses bazlı süreler ile üretilecek ürüne ait nitelikler arasında bağlantı kurularak herhangi bir ürünün prosese girdiğinde ne kadar sürede tamamlanacağı dört farklı algoritma ile Knime platformunda denenmiştir. Bunun için kayıtlara ait; tedarik, klasman, kumaş, serim yönü, personel ismi, makine hızı, adet, toplam ağırlık ve süre ile ilgili bilgiler sistemden alınmış ve bir kısmı Tablo 5’de verilen 2000 adet veriden oluşan veri seti oluşturulmuştur.

Tablo 5. Örnek veri seti

RowID	Tedarik	Klasman	Kumaş	Serim Yönü	Personel İsmi	Makine Hızı	Adet Aralık	Top Ağırlık	Süre (Dk)
Row0	Kız Çocuk	Tayt	LYC SUP	Kapak	Personel4	Yavaş	0-1000	133	48
Row1	Bebek	Swt	3IP	Tek	Personel4	Hızlı	2000-3000	672	74
Row2	Erkek Büyük	Kk.Tsh	SUP	Kapak	Personel8	Hızlı	2000-3000	570	85
Row3	Bayan Büyük	Tnk	LYC SUP	Kapak	Personel2	Orta	0-1000	370	50
Row4	Kız Çocuk	Kk.Tsh	SUP	Kapak	Personel5	Hızlı	2000-3000	241	68
Row5	Yenıdoğan	Tulum	LYC SUP	Tek	Personel10	Yavaş	4000-5000	426	81
Row6	Erkek Büyük	Kk.Tsh	SUP	Kapak	Personel11	Orta	2000-3000	461	119
Row7	Erkek Büyük	Sort	SUP	Kapak	Personel5	Hızlı	1000-2000	438	73
Row8	Erkek Büyük	Kk.Tsh	TTP	Kapak	Personel5	Hızlı	2000-3000	541	67
Row9	Garnı	Garnı	RIB	Kapak	Personel4	Yavaş	0-1000	136	25
Row10	Erkek Büyük	Kk.Tsh	SUP	Kapak	Personel11	Hızlı	0-1000	181	44
Row11	Bayan Büyük	U.Kol	LYC SUP	Kapak	Personel2	Yavaş	0-1000	321	56
Row12	Erkek Büyük	Kk.Tsh	SUP	Kapak	Personel11	Hızlı	1000-2000	273	65
Row13	Erkek Büyük	Kk.Tsh	SUP	Kapak	Personel5	Hızlı	1000-2000	375	84
Row14	Erkek Büyük	Kk.Tsh	TTP	Kapak	Personel4	Hızlı	0-1000	155	53
Row15	Bebek	Kk.Tsh	SUP	Tek	Personel8	Hızlı	4000-5000	327	110
Row16	Erkek Çocuk	Swt	3IP	Kapak	Personel9	Hızlı	0-1000	161	33
Row17	Kız Çocuk	U.Kol	3IP	Kapak	Personel8	Hızlı	0-1000	160	28
Row18	Bayan Büyük	U.Kol	LYC SUP	Kapak	Personel2	Yavaş	0-1000	328	57
Row19	Erkek Büyük	Sort	SUP	Kapak	Personel7	Orta	1000-2000	350	77
Row20	Bayan Büyük	Atlet	VIS SUP	Kapak	Personel2	Yavaş	1000-2000	454	53

Veri seti knime platformuna alınarak istatistiksel değerleri Şekil 16’daki “statistics” modülü kullanılarak çıktığı alınmış olup elde edilen sonuçlar Tablo 6’da verilmiştir.

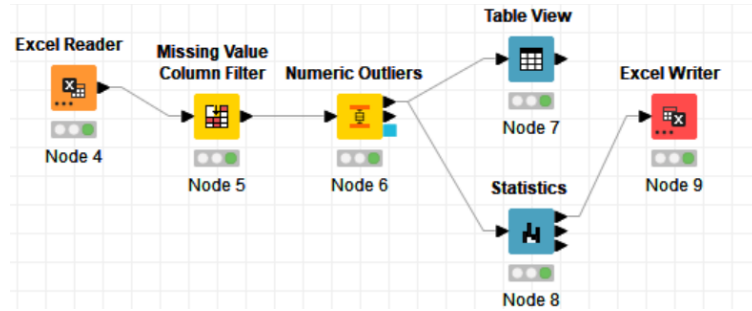


Şekil 16. Knime statistics modülü

Tablo 6. Knime istatistik sonuçları

Kolon	Min.	Max.	Ortalama	Standart sapma	Varyans	Skewness	Kurtosis	Genel toplam
Süre (Dk)	10	171	59,706	25,637	657,256	1,1196	1,9634	16419,383

Veriler alındıktan sonra temizleme, eksik verilerin tamamlanması, aykırı verilerin bulunması ve ilişkisiz olan alanların veri setinden çıkarılması gibi ön hazırlık çalışmaları Şekil 17’de gösterildiği gibi yapılmıştır.



Şekil 17. Knime ön işleme yapılmış veri ve statistics modülü

Ön hazırlık çalışmalarının ardından alınan istatistik değerleri Tablo 7’de verilmiştir. Eksik verilerin tamamlanması ve aykırı verilerin veri setinden çıkarılması ile standart sapma ve varyans gibi değerlerin düştüğü görülmüştür. Böylelikle, ön hazırlık yapılan veri seti süre tahminleme algoritmalarında kullanılmıştır.

Tablo 7. Knime ön işleme yapılmış veri istatistik sonuçları

Kolon	Min.	Max.	Ortalama	Standart sapma	Varyans	Skewness	Kurtosis	Genel toplam
Süre (Dk)	10	119	57,317	21,704	471,088	0,5070	-0,2708	15303,883

Ön hazırlıktan alınan veri setinin *test* ve *eğitim* verileri olarak bölünmesi için Knime Analytics içerisinde bulunan “Partitioning” modülü kullanılmıştır. Eğitim veri seti kullanılarak dört adet model oluşturulmuş ve oluşturulan model diğer veri setleri ile çalıştırılarak sonuçlar incelenmiştir. Modeller lineer regresyon, polinomal regresyon, gradyan destekli regresyon ağaçları ve rassal orman regresyon algoritması kullanılarak oluşturulmuştur. Modeller ile numerik değere sahip süre (dk) kolonu tahminleme çalışması yapılmıştır. Bu modellerin eğitilmesi ve test edilmesi yine Knime Analytics üzerinde bulunan modüller ile yapılmıştır. Model oluşturma ve test işlemi tamamlandıktan sonra Knime üzerinden bulunan “scorer” modülü kullanılarak başarı oranları çıkarılmıştır. Değişkenler arasındaki doğrusal ilişki var olup olmadığı ve algoritmanın modelimize uygunluğunun tespiti için ilk olarak Şekil 18’de gösterilen Knime Linear Regression modülü ile lineer regresyon algoritması modele uygulanarak tahminleme yapılmış ve scorer modülünden başarı oranları alınmıştır. Knime Linear Regression modülünde veri setinde sayısal değerlere sahip olan Toplam Ağırlık ve Süre (Dk) arasındaki ilişkiye bakılarak test verisindeki Süre (Dk) sayısal değerinin tahminlenmesi sağlanmıştır. Daha sonra, Knime Polynomial Regression modülü kullanılarak polinomal regresyon algoritması ile tahminleme yapılmış ve scorer modülünden başarı oranları alınmıştır. Knime Polynomial Regression modülünde de aynı şekilde veri setinde sayısal değerlere sahip olan Toplam Ağırlık ve Süre (Dk) arasındaki ilişkiye bakılarak test verisindeki Süre (Dk) sayısal değerinin tahminlenmesi sağlanmıştır. Üçüncü olarak hem regresyon hem de sınıflandırma problemlerinde başarılı bir makine öğrenmesi algoritması olan gradyan destekli karar ormanı regresyonu algoritması modele uygulanmıştır. Knime Gradient Boosted Trees Regression modülü kullanılarak tahminleme yapılmış ve scorer modülünden başarı oranları alınmıştır. Knime Gradient Boosted Trees Regression modülünde veri setinde bulunan nümerik ve nominal değerler birlikte kullanılarak test verisindeki süre (Dk) sayısal değerinin tahminlenmesi sağlanmıştır. Son olarak birden fazla karar ağacını kullanarak daha uyumlu modeller üretebilen ve isabetli tahminlerde bulunmaya yarayan rassal orman regresyon algoritması modele uygulanmıştır. Knime Random Forest Regression modülü kullanılarak tahminleme yapılmış ve scorer modülünden başarı oranları alınmıştır. Knime Random Forest Regression veri setinde bulunan nümerik ve nominal değerler birlikte kullanılarak test verisindeki süre (Dk) sayısal değerinin tahminlenmesi sağlanmıştır.

Algoritmalar için oluşturulan modellerin tahminleme sonuçlarının değerlendirilmesinde R^2 , MAE, MSE, RMSE ve MAPE performans metrikleri kullanılmıştır. Tüm algoritmalar için oluşturulan modellerden elde edilen değerlendirme sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Tüm modellerden elde edilen performans değerlendirme metrikleri sonuçları

Performans Değerlendirme Metrikleri	Lineer Regresyon	Polinomal Regresyon	Gradyan Destekli Karar Ormanı Regresyonu	Rassal Orman Regresyonu
R^2	0,339	0,301	0,256	0,384
MAE	18,018	17,189	16,506	14,637
MSE	618,792	529,120	530,386	385,607
RMSE	24,876	23,003	23,03	19,637
MAPE	0,282	0,419	0,296	0,364

Tablo 8'de yer alan özet tablodaki verilere göre en yüksek R^2 değeri 0,384 ile rassal orman regresyonu modelinden elde edilmiştir. Aynı zamanda 14,687 MAE, 385,607 MSE ve 19,637 RMSE değerleri ile en düşük hata metrikleri de rassal orman regresyonu modelinden elde edilmiştir. Dolayısıyla bu değerlerin en düşük olduğu modelin, veri setiyle en iyi uyumu sağlayacağı öngörüldüğü için yapılan tahminleme çalışmaları için en iyi uyumu rassal orman regresyonu modelinin sağladığı tespit edilmiştir. Bundan dolayı rassal orman regresyonu algoritması ERP sistemi planlama modülü içerisine aktarılmıştır. Böylelikle, sistemde proses ve ürün niteliği bazında tutulan veriler üretim devam ettikçe sahadan alınmakta ve sanal ortamda büyük veri olarak depolanmaktadır. Böylelikle, algoritma büyük veriden beslenerek veri hacmi arttıkça daha doğru bir tahminleme sunmaktadır.

4.3.2. Makine Duruş Takibi (Machine Downtime Tracking)

Üretim hattında yer alan makineler üzerindeki sensörler ve makine operatörleri aracılığı ile Şekil 18'de gösterilen ERP makine duruş, bakım ve onarım modülü oluşturularak makine ile ilgili çalışma hızı, çalışma süresi, bekleme süresi gibi verilerin ilgili ürün ve hat için tutulması sağlanmıştır. Hat duruşu verileri daha sonraki çalışmalarda üretim çizelgeleme modülünde hat dengeleme ve çizelgelemede kullanılacaktır.

Şekil 18. ERP makine duruş, bakım ve onarım modülü

4.3.3. Üretim Çizelgeleme (Production Scheduling)

Uygulamadaki çizelgeleme çalışmasında, 5 hat ve 3 iş için alınan tahminleme süreleri ve hat doluluğu gibi veriler referans alınarak üretim çizelgeleme çalışması yapılmıştır. Çalışma yapılırken ham madde kalite kontrol sonucu, hatta çalışan personel, makine bakım ve arızaları, standart zaman ve hat doluluğu gibi parametreler sistem üzerinden alınarak üretim hattında üretilen ürünlerin tahmin edilen sürelerine bu parametrelere özel ağırlıklandırma yapılarak hat doluluğu hesaplanmıştır. Hat doluluk durumuna ve hat üzerinde çalışan personel bilgisine göre ürünlerin çizelgelemesinin sistem tarafından yapılıp çalışan personelin ekranlarına bilgilerin iletilmesi sağlanmıştır. Çalışmada üretim hattında tamamlanma zamanı,

toplam akış zamanı ve makinelerin toplam boş bekleme zamanının minimum olacak şekilde sonuçlar elde edilmesi amaçlanmıştır. Ancak, çizelgeleme çalışmasının geliştirme çalışmaları devam etmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bilgi teknolojilerinin hızlı gelişimi ile birlikte, son yıllarda tüm sektörlerde ürünlere yönelik üretim görevlerinin sayısı önemli ölçüde artmış ve bu da ürün verilerinin miktarında hızlı bir artışa neden olmuştur. Bu devasa miktardaki verinin gerçek zamanlı olarak toplanması ve sınıflandırılması ve bu verilerin süreç izlenebilirliğini ve ürün tasarımı ve sürecinin sürekli iyileştirilmesini sağlamak için yapısal olarak yönetilmesi ve analiz edilmesi temel veri yönetimi konuları haline gelmiştir. Verilerin artmasıyla birlikte artan dijitalleşme herkes tarafından benimsenen bir durum haline gelmiştir. Özellikle IoT, bulut bilişim, büyük veri analitiği ve yapay zeka gibi yeni nesil bilgi teknolojilerinin ortaya çıkmasıyla birlikte dijitalleşme süreci de büyük ölçüde hızlanmıştır. Dijitalleşme sürecindeki verileri kullanan teknolojilerden biri de dijital ikizdir. Dijital ikiz, çift yönlü etkileşimler yoluyla birbirleriyle karşılıklı olarak iletişim kuran, teşvik eden ve birlikte gelişen organik bir fiziksel varlık ve bunun dijitalleştirilmiş temsili anlamına gelmektedir. Dijital ikizde fiziksel dünyadaki varlıklar, davranışlar ve ilişkiler, aslına uygun sanal modeller oluşturmak için bütünsel olarak dijitalleştirilir. Oluşturulan bu sanal modeller ise fiziksel dünyadaki gerçek dünya verilerine bağlı olmaktadır. Dijital ikiz, makinelerin veya sistemlerin sanal kopyalarını oluşturarak endüstride devrim yaratmakta ve birçok şirket tarafından sorunları tespit etmek ve verimliliği artırmak için halihazırda kullanılmaktadır. Ayrıca dijital ikiz sistemleri, müşteri taleplerini hızlı bir şekilde anlamada, modellerdeki zayıflıkları erken belirlemede ve hatta tahmin etmede, değişen çevreye zamanında yanıt vermek için üretim süreçlerini kontrol etmede ve tesisi optimize etmek için değerli önerilerde bulunmada yardımcı olabilen ürün tasarımı ve üretiminde yaygın olarak uygulanmaktadır. Dijital ikizin, sistem mimarilerinin mevcut ve gelecekteki koşullarını temsil etme, tahmin etme ve yönetme konusunda potansiyel olarak geniş bir uygulama beklentisine sahip olduğu kanıtlanmıştır. Dijital ikizin üretimdeki bu başarısı nedeniyle, tüm sektörlerde dijital gelişmeyi desteklemek için siber-fiziksel model oluşturmaya yönelik çeşitli çalışmalar yapılmaktadır.

Bu çalışmada, hazır giyim sektöründe faaliyet gösteren öncü bir firmanın bir üretim tesisinde, süreçlerin dijital ikiz modelinin oluşturulabilmesi için altyapı geliştirme çalışmaları yapılmıştır. Yapılan çalışmada ilk olarak, tüm süreçlerde süreç haritaları oluşturularak süreç geliştirme çalışmaları sistem üzerine aktarılmıştır. Sürekli değişen verilerin sensörler ve arayüzler ile alınması, işlenmesi, depolanması ve raporlanması sağlanarak manuel yürütülen süreçlerin sistem üzerinden takip edilmesi ve yönetilmesi sağlanmıştır. Makine öğrenmesi yöntemlerinden olan lineer regresyon, polinomal regresyon, gradyan destekli karar ormanı regresyonu ve rassal orman regresyon algoritmaları kullanılarak bir ürünün üretim süresi tahmin edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen model sonuçlarında en yüksek R^2 ve en düşük MAE, MSE ve RMSE hata metrik değerlerine sahip olan rassal orman regresyon algoritması en uygun algoritma olarak tespit edilmiştir. Daha sonra rassal orman regresyonu modeli ERP altyapısına entegre edilmiştir. Tahminleme ile ürünler için klasman ve tedarik bazında standart süreler elde edilmesi sağlanmış olup bu standart süreler ile maliyetlendirme, verimlilik ölçme, raporlama ve performans değerlendirme gibi çalışmalar yapılmıştır. Tahminlemeyle, farklı niteliklere sahip herhangi bir ürün üretim hattına girdiğinde makine öğrenmesi algoritması ile üretim süresinin tahminlenmesi sağlanmıştır. Bu durum daha önce üretilmemiş çeşitlilikteki ürünler için de maliyetlendirme ve üretim planlama gibi çalışmaların yapılabilmesini sağlamıştır. Tahmin edilen üretim süreleri ve hat üzerindeki çeşitli parametrelere göre üretim çizelgeleme çalışması tasarımı yapılmış olup geliştirme ve testlerden sonra uygulamaya alınacak olup hat doluluğuna göre sistemin kendi kendine karar vererek üretim çizelgeleme yapması öngörülmektedir. Çizelgeleme çalışmasından sonra sistemin termin ve üretim süresine göre otomatik sevk planlama yapması sağlanıp uçtan uca kendi kendini yönetebilen bir sistem kurulması hedeflenmektedir. Makine bakım ve onarım modülünün kullanılmaya başlanması ile duruş takibinin yapılması sağlanarak önleyici bakım ile verimlilikte artış hedeflenmiştir.

Sistemden sürekli beslenen büyük veri ile daha doğru bir tahminleme yapılacağı öngörülmektedir. Tahmin edilen süreler ile her bir ürün için standart süre belirlenmiş olup bu standart süreler ile maliyetlendirme, performans değerlendirme ve işletme verimliliğinin ölçülmesi gibi çalışmalar yapılmıştır. Sonuç olarak, bu çalışmada kendi kendine karar verebilecek bir sistem için altyapı çalışmaları oluşturulmuş olup bundan

sonraki süreçlerde fiziksel ortamdan alınan verilerin işlenmesiyle sanal ortamdaki modelin çalışması ve üretimi yönlendirmesi hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Karagöz, A., Yıldız, A. (2019). Dijital ikiz teknolojisinin üretim ve tasarım sistemlerinde kullanılması. 5. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi, 21-22 Aralık, İstanbul, Türkiye.
- [2] Carolis, A., Macchi, M., Negri, E., Terzi, S. (2017). Guiding manufacturing companies towards digitalization a methodology for supporting manufacturing companies in defining their digitalization roadmap. In 2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), IEEE, 487-495.
- [3] Tao, F., Zhang, M. (2017). Digital twin shop-floor: a new shop-floor paradigm towards smart manufacturing. IEEE Access, 5, 20418-20427.
- [4] Cattaneo, L., Macchi, M. (2019). A digital twin proof of concept to support machine prognostics with low availability of run-to-failure data. IFAC-PapersOnLine, 52(10), 37-42.
- [5] Barricelli, B. R., Casiraghi, E., Fogli, D. (2019). A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications. IEEE access, 7, 167653-167671.
- [6] 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.
- [7] Kiraz, A., Canpolat, O., Ozkurt, C., Taskin, H., Sarp, E. (2020). Examination of the criteria affecting Industry 4.0 with structural equation model and a pilot study. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 35(4), 2183-2196.
- [8] Bortolini, M., Ferrari, E., Gamberi, M., Pilati, F., Faccio, M. (2017). Assembly system design in the industry 4.0 era: a general framework. IFAC-PapersOnLine, 50(1), 5700-5705.
- [9] Tao, F., Sui, F., Liu, A., Qi, Q., Zhang, M., Song, B., ... Nee, A. Y. (2019). Digital twin-driven product design framework. International Journal of Production Research, 57(12), 3935-3953.
- [10] Grieves, M. (2014). Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. White paper, 1, 1-7.
- [11] Glaessgen, E., Stargel, D. (2012). The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles. In 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference, 1818.
- [12] Rosen, R., Von Wichert, G., Lo, G., Bettenhausen, K. D. (2015). About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. IFAC-PapersOnLine, 48(3), 567-572.
- [13] Qi, Q., Tao, F. (2018). Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360-degree comparison. IEEE Access, 6, 3585-3593.
- [14] Tao, F., & Qi, Q. (2019). Make more digital twins. Nature, 573, 490-491.
- [15] Wang, K. J., Lee, Y. H., Angelica, S. (2021). Digital twin design for real-time monitoring—a case study of die cutting machine. International Journal of Production Research, 59(21), 6471-6485.
- [16] Abramovici, M., Göbel, J. C., Dang, H. B. (2016). Semantic data management for the development and continuous reconfiguration of smart products and systems. CIRP Annals, 65(1), 185-188.
- [17] Schluse, M., Rossmann, J. (2016). From simulation to experimentable digital twins: Simulation-based development and operation of complex technical systems. In 2016 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE), IEEE, 1-6.

- [18] Kraft, E. M. (2016). The air force digital thread/digital twin-life cycle integration and use of computational and experimental knowledge. In 54th AIAA aerospace sciences meeting, 0897.
- [19] Liu, Z., Chen, W., Zhang, C., Yang, C., Cheng, Q. (2021). Intelligent scheduling of a feature-process-machine tool supernetwork based on digital twin workshop. *Journal of manufacturing systems*, 58, 157-167.
- [20] Schleich, B., Anwer, N., Mathieu, L., Wartzack, S. (2017). Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals*, 66(1), 141-144.
- [21] Tuegel, E. J., Ingraffea, A. R., Eason, T. G., Spottswood, S. M. (2018). Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin. *International Journal of Aerospace Engineering*, 154798.
- [22] Lee, J., Kao, H. A., Yang, S. (2014). Service innovation and smart analytics for industry 4.0 and big data environment. *Procedia Cirp*, 16, 3-8.
- [23] Qi, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y., ... Nee, A. Y. C. (2021). Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 3-21.
- [24] Zheng, Y., Yang, S., Cheng, H. (2019). An application framework of digital twin and its case study. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(3), 1141-1153.
- [25] Gockel, B., Tudor, A., Brandyberry, M., Penmetsa, R., Tuegel, E. (2012). Challenges with structural life forecasting using realistic mission profiles. In 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structural dynamics and materials conference, 1813.
- [26] Seshadri, B. R., Krishnamurthy, T. (2017). Structural health management of damaged aircraft structures using digital twin concept. In 25th AIAA/AHS Adaptive Structures Conference, 1675.
- [27] Um, J., Weyer, S., Quint, F. (2017). Plug-and-Simulate within modular assembly line enabled by digital twins and the use of automationML. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 15904-15909.
- [28] Zhang, H., Liu, Q., Chen, X., Zhang, D., Leng, J. (2017). A digital twin-based approach for designing and multi-objective optimization of hollow glass production line. *IEEE Access*, 5, 26901-26911.
- [29] Magargle, R., Johnson, L., Mandloi, P., Davoudabadi, P., Kesarkar, O., Krishnaswamy, S., ... Pitchaikani, A. (2017). A simulation-based digital twin for model-driven health monitoring and predictive maintenance of an automotive braking system. In Proceedings of the 12th International Modelica Conference, Prague, Czech Republic, May 15-17, 132, 35-46.
- [30] Vathoopan, M., Johnny, M., Zoitl, A., Knoll, A. (2018). Modular fault ascription and corrective maintenance using a digital twin. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1041-1046.
- [31] Coronado, P. D. U., Lynn, R., Louhichi, W., Parto, M., Wescoat, E., Kurfess, T. (2018). Part data integration in the Shop Floor Digital Twin: Mobile and cloud technologies to enable a manufacturing execution system. *Journal of manufacturing systems*, 48, 25-33.
- [32] Cunbo, Z., Liu, J., Xiong, H. (2018). Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 96(1-4), 1149-1163.
- [33] Liau, Y., Lee, H., Ryu, K. (2018). Digital Twin concept for smart injection molding. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 324(1), IOP Publishing, 012077.
- [34] Botkina, D., Hedlind, M., Olsson, B., Henser, J., Lundholm, T. (2018). Digital twin of a cutting tool. *Procedia Cirp*, 72, 215-218.

- [35] Guivarch, D., Mermoz, E., Marino, Y., Sartor, M. (2019). Creation of helicopter dynamic systems digital twin using multibody simulations. *CIRP Annals*, 68(1), 133-136.
- [36] Guo, J., Zhao, N., Sun, L., Zhang, S. (2019). Modular based flexible digital twin for factory design. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(3), 1189-1200.
- [37] Mukherjee, T., DebRoy, T. (2019). A digital twin for rapid qualification of 3D printed metallic components. *Applied Materials Today*, 14, 59-65.
- [38] Chakshu, N. K., Carson, J., Sazonov, I., Nithiarasu, P. (2019). A semi-active human digital twin model for detecting severity of carotid stenoses from head vibration—A coupled computational mechanics and computer vision method. *International journal for numerical methods in biomedical engineering*, 35(5), e3180.
- [39] Shim, C. S., Dang, N. S., Lon, S., Jeon, C. H. (2019). Development of a bridge maintenance system for prestressed concrete bridges using 3D digital twin model. *Structure and Infrastructure Engineering*, 15(10), 1319-1332.
- [40] Ghosh, A. K., Ullah, A. S., Kubo, A. (2019). Hidden Markov model-based digital twin construction for futuristic manufacturing systems. *AI EDAM*, 33(3), 317-331.
- [41] Coraddu, A., Oneto, L., Baldi, F., Cipollini, F., Atlar, M., Savio, S. (2019). Data-driven ship digital twin for estimating the speed loss caused by the marine fouling. *Ocean Engineering*, 186, 106063.
- [42] Bao, J., Guo, D., Li, J., Zhang, J. (2019). The modelling and operations for the digital twin in the context of manufacturing. *Enterprise Information Systems*, 13(4), 534-556.
- [43] Luo, W., Hu, T., Ye, Y., Zhang, C., Wei, Y. (2020). A hybrid predictive maintenance approach for CNC machine tool driven by digital twin. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 65, 101974.
- [44] Qian, W., Guo, Y., Cui, K., Wu, P., Fang, W., Liu, D. (2021). Multidimensional data modeling and model validation for digital twin workshop. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 21(3), 031005.
- [45] Suljagic, H., Celebi, N. (2021). Obtaining a digital twin of a low-cost robot arm. *Proceedings of the 6th International Student Symposium 1- Engineering Sciences*, 118-126.
- [46] White, G., Zink, A., Codecá, L., Clarke, S. (2021). A digital twin smart city for citizen feedback. *Cities*, 110, 103064.
- [47] Burgos, D., Ivanov, D. (2021). Food retail supply chain resilience and the COVID-19 pandemic: A digital twin-based impact analysis and improvement directions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 152, 102412.
- [48] Yi, Y., Yan, Y., Liu, X., Ni, Z., Feng, J., Liu, J. (2021). Digital twin-based smart assembly process design and application framework for complex products and its case study. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 94-107.
- [49] Priyanka, E. B., Thangavel, S., Gao, X. Z., Sivakumar, N. S. (2021). Digital twin for oil pipeline risk estimation using prognostic and machine learning techniques. *Journal of Industrial Information Integration*, 100272.
- [50] Choi, S. H., Park, K. B., Roh, D. H., Lee, J. Y., Mohammed, M., Ghasemi, Y., Jeong, H. (2022). An integrated mixed reality system for safety-aware human-robot collaboration using deep learning and digital twin generation. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 73, 102258.

- [51] Lari, K. S., Davis, G. B., Rayner, J. L. (2022). Towards a digital twin for characterising natural source zone depletion: A feasibility study based on the Bemidji site. *Water Research*, 208, 117853.
- [52] Gao, Y., Chang, D., Chen, C. H., Xu, Z. (2022). Design of digital twin applications in automated storage yard scheduling. *Advanced Engineering Informatics*, 51, 101477.
- [53] Granacher, J., Nguyen, T. V., Castro-Amoedo, R., Maréchal, F. (2022). Overcoming decision paralysis-A digital twin for decision making in energy system design. *Applied Energy*, 306, 117954.
- [54] Yang, X., Ran, Y., Zhang, G., Wang, H., Mu, Z., Zhi, S. (2022). A digital twin-driven hybrid approach for the prediction of performance degradation in transmission unit of CNC machine tool. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 73, 102230.
- [55] Fang, X., Wang, H., Li, W., Liu, G., Cai, B. (2022). Fatigue crack growth prediction method for offshore platform based on digital twin. *Ocean Engineering*, 244, 110320.