

Kitlesel İmalat Sistemlerinde Dijital İkiz Kullanılarak Gerçek Zamanlı Üretim Çizelgeleme ve Tekstil Sektöründe Bir Uygulama

Real Time Production Scheduling with Digital Twin in Mass Production Systems and an Application in Textile Industry

Alperen BAL¹ , Hilal GEVREK² , Sedefnur DEMİR² 

¹ American University of the Middle East, College of Engineering and Technology, Kuveyt

² Yalova Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 77200, Yalova, Türkiye

Öz

Üretim ortamının dinamik yapısı planlanmayı güçleştirmektedir. Gelişen teknolojiyle birlikte dijital ikiz, üretim süreçlerine etkin çözümler sunabilmek amacıyla artan bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada, kitlesele imalat sistemlerinde üretimin planlanması amacıyla simülasyon temelli dijital ikiz kullanılarak bir çizelgeleme modeli önerilmiştir. Böylece çözümü zor olan üretim çizelgeleme problemlerine yenilikçi ve uygulanabilir bir yaklaşım geliştirilmesi amaçlanmıştır. Üretim hattının bir kopyası olan ve gerçek zamanlı veri ile entegre edilmiş model, hammadde stokları, üretim süreleri, hazırlık süreleri, vardiya değişimleri ve mola zamanları, bakım ve arıza kaynaklı duruşlar gibi birçok üretim parametresini dikkate almaktadır. Önerilen yaklaşımın gerçek hayat uygulamasını göstermek amacıyla, kumaş imalatı yapan bir tekstil işletmesinde üretim hattının dijital ikizi oluşturulmuş ve örgü makineleri için işlerin sıraları belirlenmiştir. Model ile her bir siparişin zamanında tamamlanma olasılığı belirlenerek risk analizi yapılabilmektedir. Böylece yüksek riske sahip siparişler yeniden çizelgenerek olası gecikmelerden kaçınılabilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Dijital ikiz, kitlesele imalat, risk analizi, simülasyon, üretim çizelgeleme, tekstil

Abstract

The dynamic nature of production environment makes planning activities difficult. In parallel with the technological advancements, digital twin has been increasingly used in order to offer effective solutions to production processes. This study proposes a simulation-based digital twin scheduling model for production planning in mass production systems. Thus, we aim to propose an innovative and practical approach to production scheduling which is hard to implement on the shop floor. The model is the digital counterpart of the production line and is integrated with real time production data. It considers many production parameters such as raw material stocks, production cycle times, setup times, shifts and break times, maintenance, and downtimes. We provide a novel approach by combining process planning and scheduling together. In order to elaborate how the proposed model is applied to real life, we present step by step implementation of the digital twin in a fabric manufacturer textile company and determine production sequences of the jobs for knitting machines. The model makes risk analysis by considering the risk of not delivering the orders on due dates. Thus, potential delays can be avoided by rescheduling high-risk tasks.

Keywords: Digital twin, mass production, production scheduling, risk analysis, simulation, textile

I. GİRİŞ

Üretim ortamında nesnelere interneti, büyük veriye dayalı veri analitiği, bulut bilişim, eklemeli imalat, akıllı robotlar ve sanal gerçeklik gibi yeni nesil teknolojilerin hızlı bir şekilde kullanılmaya başlanmasıyla üretim yönetiminde ciddi bir dönüşüm yaşanmaktadır. Bu dönüşümü tetikleyen teknolojilerin önde gelenlerinden birisi de dijital ikizdir. Dijital ikiz, üretim ortamındaki fiziksel bir nesnenin veya sürecin dijital bir profilini oluşturarak, yani davranışlarını gerçek zamanlı veri ile modelleyerek performansını optimize etmeye yardımcı olur [1]. Endüstri 4.0'ın anahtar teknolojilerinden birisi olan dijital ikiz siber fiziksel sistemlerin uygulanabilmesi için en önemli aşamalardan birisi olarak kabul edilmektedir [2]. 2019 yılında yayınlamış olduğu bir raporda Deloitte [3] Amerika Birleşik Devletleri'ndeki üreticilerin %86'sının 2025'e kadar olan süreçte bahsedilen yeni nesil teknolojilerin fabrikalarda kullanımının rekabetin kilit unsuru olacağına inandığını belirtmektedir. Bunun yanında üreticilerin %83'ü bu teknolojilerin uygulanmasıyla ürünlerin üretim şeklinin değişeceğini düşünmektedir [3].

Son yıllarda dijital ikizin üretim alanında sıklıkla uygulandığı görülmektedir [4], [5]. Bu çalışmalar; arıza teşhisini [6], montajı [2], makine ve cihazların sanallaştırılmasını [7], üretim ortamında bilginin entegrasyonunu [8], üretim ortamındaki varlıkların simülasyonunu [9] kapsayan üretimin çeşitli aşamalarında görülmektedir. Dijital ikiz, toplu üretim planlarından günlük üretim çizelgelerinin oluşturulmasına kadar olan süreçleri kapsayan alanlarda uygulanabilir çözümler sunmaktadır.

İş çizelgeleme üretim ortamındaki en önemli optimizasyon problemlerinden birisidir. İş sırasını belirleyen bu problem klasik çizelgeleme yaklaşımı ile çözüldüğünde elde edilen sonucun gerçek hayatta uygulanması genellikle mümkün değildir [10]. Makinelerin sınırlı kullanılabilirliği ve gerçek zamanlı olarak yaşanan çeşitli sıkıntılar başlangıç planının dinamik olarak güncellenmesini ve yeniden çizelgeler oluşturulmasını gerektirmektedir. Makinelerin kullanılabilir olmaması, makine arızalarından ve makine bileşenlerinin yıpranmasından kaynaklanmaktadır. Çevrim süresindeki değişkenlikler ve acil işlerin gelmesi gibi diğer sıkıntılar ise oluşturulan ilk üretim çizelgesini etkilemektedir. Çizelgelerin sık yenilenmesi üretim planında sorunlar oluşturmakta ve kararsızlığa yol açmaktadır. Belirtilen sebepler nedeniyle bu çalışmada üretim çizelgelemede dijital ikizin önemini açıklamak ve kitlesel imalat sistemleri için ne şekilde kullanılabileceğine dair bir model geliştirmek amaçlanmıştır.

Önerilen simülasyon tabanlı dijital ikiz modeli ile süreçlerdeki değişkenlikler göz önünde bulundurularak dinamik bir üretim çizelgeleme yaklaşımı sunulmuştur. Makine bakım planları, çalışan vardiyaları ve yetkinlik düzeyleri, ham madde stokları gibi kısıtları göz önüne alan model, gerçek zamanlı veriye dayalı üretim çizelgeleri oluşturulabilmektedir. Ayrıca, çizelgelerin risk analizleri yapılarak, olasılıksal olarak önerilen planların gerçekleştirilebilirliği analiz edilebilmektedir. Simio Risk Planning and Scheduling (Simio-RPS) yazılımı kullanılarak geliştirilen modelin uygulaması kitlesel imalat yapan bir tekstil fabrikasında üretim hattının bir bölümünün dijital ikizi oluşturularak yapılmıştır.

Bu bölümün devamında yazın taraması yer almaktadır. Üçüncü bölümde ise ele alınan çizelgeleme probleminin ve önerilen dijital ikizin çerçevesi tanımlanmıştır. Dördüncü bölüm dijital ikizin gerçek hayat uygulamasını sunmaktadır. Makalenin son bölümünde ise sonuçlar ve gelecek çalışma önerileri bulunmaktadır.

II. YAZIN TARAMASI

Çizelgeleme problemleri; modelde kullanılan parametreler açısından deterministik (belirli) ya da stokastik (belirsiz) olarak, geliş süreci açısından durağan (statik) ya da dinamik olarak, modelde

kullanılan makine sayısı açısından tek makineli ya da çok makineli olarak değişen çeşitli kategorilerde ele alınmaktadır [11]. Genellikle sonlu sayıda makine ile modellenen çizelgeleme problemlerinde n iş sayısını, m ise makine sayısını temsil etmektedir [12].

Üretim sistemlerinin çizelgelenmesinde ilk olarak statik modeller geliştirilmiştir [13]. İlk matematiksel modelleme temelli yaklaşımlardan birisi Manne [14] tarafından önerilmiştir. Yıllar içerisinde gerçek hayat kısıtlarına göre birçok model ve çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Saraç ve Sipahioğlu [15] paralel makine çizelgeleme modelini çalışmıştır. Sırt çantası problemi temelli geliştirdikleri yaklaşımda kalıp kullanımlarını dikkate alan bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Akyol ve Saraç [16] kitlesel imalat yapan bir işletmede çizelgeleme problemini montaj hatlarının optimizasyonu için çalışmışlardır. Önerdikleri matematiksel modellerde tek makine ile çizelgeleme ve özdeş paralel makineler ile çizelgeleme problemlerine çözümler geliştirmişlerdir. Modellerin çözümü için GAMS yazılımını ve CPLEX çözücüsünü kullanmışlardır. Bulunan sonuçları mevcut üretim çizelgeleri ile kıyaslayarak performans değerlendirmesi yapmışlardır. Kasımoğlu vd. [17] makine hazırlık sürelerini modellerine dahil ederek paralel makineler için sıraya bağımlı bir çizelgeleme modeli geliştirmişlerdir. Önerdikleri modeli kitlesel imalat yapan bir işletmede uygulamışlardır. Modelin çözümü ile etkin sonuçlar üretilebilmiştir ancak çözüm süresi 10 saati bulmuştur. Yazarlar çizelgelenmesi gereken iş sayısı arttığında hızla artan çözüm süresi ve üretim ortamının dinamik yapısı nedeniyle modeli uygulamanın güçlüğüne vurgulamışlardır.

Çizelgeleme problemlerini tek amaçlı olarak modelleyen çalışmaların yanında çok amaçlı olarak modelleyen çalışmalar da bulunmaktadır. Kaya ve Fırlı [18], [19], esnek atölye tipi çizelgeleme problemi için çok amaçlı modeller geliştiren çalışmalar üzerine yayın taraması yapmışlardır ve farklı çözüm yaklaşımlarını değerlendirmişlerdir. Moradi vd. [20] esnek atölye tipi problem için önleyici bakım stratejilerini göz önüne alan çok amaçlı bir optimizasyon modeli geliştirmişlerdir. Bir amaç fonksiyonu üretim tamamlama süresini minimize ederken diğeri ise bakım sebebiyle sistemin kullanılabilir olmaması durumunu minimize etmektedir. Problemin çözümü için çeşitli çok amaçlı çözüm algoritmaları kullanılmış ve çözüm kalitesi için diğer çalışmalar ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Yılmaz ve Durmusoglu [21] hibrit imalat sistemleri için ortalama akış süresini, maksimum çalışan sayısını ve çalışan değişimini minimize eden bir model geliştirmişlerdir.

Gelişmiş modellerin çözümünün zorluğu sebebiyle araştırmacılar sezgisel çözüm algoritmalarından sıklıkla faydalanmışlardır. Eren ve Güner [11], toplam tamamlanma zamanını ve maksimum gecikme süresini

minimize eden paralel iki özdeş makineli çizelgeleme problemini ele almışlardır. Problemin NP-zor yapıda olması nedeniyle farklı sezgisel yöntemler ile büyük boyutlu problemlerin verimli bir şekilde çözümünü sağlamışlardır. Kaya ve Fırlalı [18], [19] yaptıkları çalışmada belirledikleri problem veri setleri için meta sezgisel yöntemler ile çözüm önerilerinde bulunmuşlardır. Sağır ve Okul [22] önerdikleri sıra bağımlı melez esnek akış tipi atölye çizelgeleme problemine hazırlık sürelerini dahil ederek sezgisel yaklaşım ile büyük ölçekli problem için çözüm geliştirmişlerdir.

Bu modeller kitlesel imalat yapan sistemlerin üretim hatları için çözümler sunabilse de, bu modellerin beklenmedik durumlar ile başa çıkabilme kabiliyetleri kısıtlıdır. Gelişen teknolojiler ile birlikte çizelgelemede yeni yaklaşımlar uygulanmaya başlanmıştır. Böylece, büyük veri, yapay zeka ve dijital ikiz gibi teknolojilerden faydalanan modeller verimli çizelgeler üretebilmek amacıyla araştırmacılar tarafından önerilmeye başlanmıştır. Zhang vd. [23] radyo frekansı ile tanımlama (RFID) cihazlarını kullanarak gerçek zamanlı bir üretim çizelgeleme yöntemi önermişlerdir. Bu amaçla her makinenin kapasitesini ve kullanılabilirliğini değerlendirebilmek için gerçek zamanlı üretim bilgilerini toplamışlardır. Freitag ve Hildebrandt [24] üretim sistemlerinde iş ataması yapmak için simülasyon tabanlı çok amaçlı bir sezgisel yöntem önermişlerdir. Yarı iletken endüstrisinde uygulanan model ile verimli sonuçlar üretmişlerdir. Ji ve Wang [13] veri analitiği yaklaşımı ile büyük veriyi kullanarak makineler iş atamayı sağlayan bir çizelgeleme modeli geliştirmişlerdir. Model aynı zamanda süreç planlama ile çizelgelemeyi birleştirerek işlem gören parçalardaki kusurlu parça oranını düşürmeyi amaçlamaktadır. Kan vd. [25] endüstriyel nesnelerin interneti (IIoT) teknolojisini kullanarak büyük ölçekli makineler için bir arıza teşhis yöntemi önermişlerdir. Böylece bu yöntem ile makine çizelgelemeyi optimize etmeyi amaçlamışlardır. Türker vd. [26] simülasyonu kullanarak çizelgeleme performansını değerlendirmek için sanal modeller geliştirmişlerdir ve bu modeller ile geciken işlerin sayısı, ortalama bekleme süresi, iş istasyonlarının kullanımı ve üretim süresi gibi performans göstergelerini değerlendirmişlerdir. Zhang vd. [27] yaptıkları çalışmada dijital ikizden faydalanarak iki aşamalı üretim çizelgeleme yöntemi önermiştir. İlk olarak dijital ikiz tabanlı makine kullanılabilirliği tahmini, arıza tespiti ve performans değerlendirmesi yapmışlardır. Ardından, dijital ikiz ile geliştirilmiş bir dinamik çizelgeleme modeli sunmuşlardır. Elde ettikleri sonuçlar ile iş tamamlama sürelerinde ve gecikmelerde önemli ölçüde iyileştirmeler sağlamışlardır.

Çizelgeleme yıllara dayanan geniş bir yazına sahip olmasına rağmen yeni nesil bilgi ve iletişim teknolojilerinin kullanımı bu alanda yapılması gereken

güncel çalışmalara ihtiyaç doğurmuştur. Özellikle son yıllarda yapılan araştırmalara bakıldığında bu teknolojilerden faydalanan yeni modellerin araştırmacıların ilgisini çektiği görülmektedir. Erişilen literatür incelendiğinde kitlesel imalat sistemlerinde süreç planlama ile çizelgelemeyi birleştirerek simülasyon tabanlı dijital ikiz ile çizelgeleme yapan çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle, çalışmada gerçek veriye dayalı olarak üretim çizelgeleri oluşturabilen ve üretim risklerini analiz edebilen dijital ikiz modeli önerilmesi amaçlanmıştır.

III. PROBLEMİN TANIMLANMASI

Problemin yaşandığı üretim işletmesi tamamen pamuklu ve pamuk-polyester karışımı kumaşların imalatını gerçekleştirmektedir. Çeşitli tiplerde üretilen kumaşlar, kumaş topları halinde müşterilere gönderilmektedir. İşletmede çizelgeleme, işlerin müşteriye teslim zamanları ve müşteri önceliği gözetilerek herhangi bir gecikmeyi mümkün olduğunca önleyecek şekilde planlama sorumlusunun tecrübelerine dayalı olarak yapılmaktadır. Bu süreçte herhangi bir sistematik yaklaşım kullanılmamaktadır. İşletmede sipariş tipi üretim yapılmaktadır ve günlük kumaş üretim kapasitesi 45 tondur. İşletme, 24 saat esasına göre 3 vardiya olarak çalışmaktadır. Kumaş (son ürün) üretiminde her tipteki kumaş, içeriğinde farklı tipte ve oranlarda iplik (hammadde) barındırmaktadır. İnterlok, ribana, süprem, iki iplik ve üç iplik olmak üzere bu 5 farklı tipteki kumaşlardan her biri ilgili makinede işlem görmektedir. İmalat işlemini gerçekleştiren 5 farklı tipte 147 adet makine bulunmaktadır. İnterlok ve ribana ile süprem ve iki iplik aynı makinelerde işlenebilmektedir. Üç iplik ise yalnızca üç iplik makinesinde işlenebilmektedir. Makinelerde ürün değişimi hazırlık süresi gerektirmektedir. Bu nedenle işletme benzer işlerin mümkün olduğunca arka arkaya çizelgenmesini istemektedir.

Sıklıkla yeni siparişler geldiği ve sipariş iptalleri olabildiği için üretim planındaki devamlı şekilde değişiklikler yapılması gerekmektedir. Ancak bu değişiklikler yapılırken verimli bir plan oluşturulamamaktadır. Aynı zamanda çalışan verimlilik faktörünün örme makinesi kurulum ve bakım sürelerine olan etkisi dolayısıyla çalışana göre üretim süreleri uzayabilmekte, fazla fire oluşmakta ve makinelerde üretim yavaşlamaktadır. Üretimde bir aksama olması durumunda ise tekrar bir teslim tarihi belirlemek ve tüm senaryolara hazırlıklı olabilmek genellikle mümkün olmamaktadır.

İşletmedeki bir diğer büyük problem kaynağını stok kontrolündeki yetersizlik oluşturmaktadır. İşletme nihai ürün (kumaş) stoğu tutmamaktadır. Buna karşın hammadde stoğu tutmaktadır ve özellikle en çok kullanılan hammaddelerin sürekli stokta bulunması istenmektedir. Bu durumda hammadde stoklarının

kontrolünün sağlanması firma için oldukça önemli bir husustur.

Örgü makinelerinde işlemler tamamlanan ürünlere kalite kontrolü yapılmaktadır ve ardından tartım işlemi uygulanmaktadır. Tartım işlemi yapılan ürüne barkod bilgisi eklenerek ürün teslimata gönderilmektedir. Örgü makinelerine işlemlerin atanmasını sağlayan simülasyon tabanlı dijital ikiz modelinin uygulama adımları Şekil 1'de gösterilmektedir.

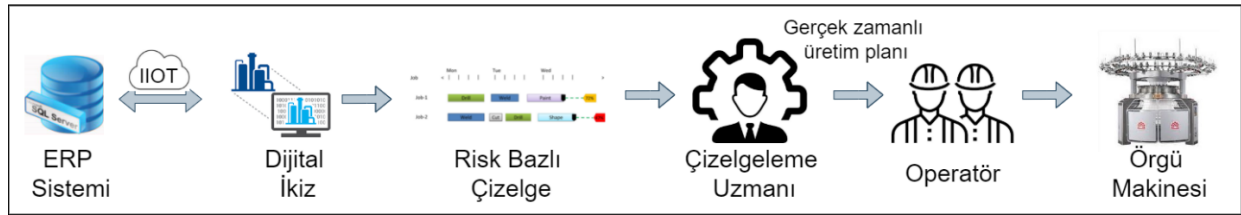
Dijital ikizin istenildiği şekilde çalışabilmesi için gerçek zamanlı veri ile entegrasyonunun sağlanması gerekmektedir. Böylece kurumsal kaynak planlama sistemi (ERP)'ye entegre hale gelen dijital ikiz ile iptal edilen ya da üzerinde herhangi bir değişiklik yapılan siparişler olması durumunda ilgili tablolar anlık olarak modelde güncellenerek, yenilenen çizelgeler ile siparişlere yeni teslim tarihi atanabilmektedir. Ayrıca önerilen dijital ikizin elde ettiği çıktıların fiziksel fabrikadaki üretim çıktıları ile karşılaştırılması ve modelin doğrulanması önem arz etmektedir. Bu sayede elde edilen sonuçların fiziksel fabrikanın tam bir temsili olması sağlanmaktadır. Ayrıca model ile risk

bazlı çizelgeler üretilerek senaryolar test edilebilmektedir.

Gerçekleştirilen çalışmada temel hedef belirtilen üretim problemlerinin üstesinden gelmektir. Bu sayede alınan siparişlerin gerçek zamanlı olarak üretim planı oluşturulabilmekte, siparişler için risk analizi yapmak mümkün hale gelmekte, stok kontrolü sağlanabilmekte, üretim tamamlanma süresi ve diğer tüm performans göstergelerinde iyileştirmeler yapılabilmektedir.

Çalışmada ele alınan çizelgeleme probleminin aşağıdaki varsayımları bulunmaktadır:

- Makinelerin ve işlemlerin tamamı başlangıçta hazırdır.
- Bir makine aynı anda yalnızca bir iş yapabilir.
- Bir iş yalnızca bir makineye atanabilir.
- Özdeş olmayan makineler bulunmaktadır.
- İşler arasında öncül ve ardıl ilişkiler yoktur.
- Bir makinede yapılmaya başlanan iş, makine arızası olmadıkça durdurulamaz.
- Birim işlem çevrim süresi ve makine hazırlık sürelerinin dağılımları önceden bilinmektedir.



Şekil 1. Dijital ikizin üretime uygulanma adımları

IV. UYGULAMA

İşletmedeki örgü makineleri için üretim çizelgelerinin oluşturulmak istendiği çalışmada yaşanan en büyük güçlüklerden biri dinamik üretim ortamında verimli ve etkin olarak üretim planları oluşturabilmektir. Geliştirilen model işletmenin kumaş örme bölümünde uygulanmıştır. Modelde çalışanlar için vardiya bilgileri, verimlilik faktörleri, mola saatleri ve makineler için bakım çizelgeleri tanımlanmıştır. Makineler için arıza ve onarım süreleri rassal değişkenler olarak tanımlanmıştır. Tüm hammaddeler için yeniden sipariş noktası ve yeniden sipariş miktarı değerleri hammadde kıtlığına göre belirlenmiştir. Dijital ikiz uygulama adımları Şekil 2'de gösterilmiştir.

1. *adım: Gerçek zamanlı veri entegrasyonu:* Firmanın üretim bilgileri SQL Server veri tabanı yönetim sisteminde tutulmaktadır. Geliştirilen dijital ikiz modeli, işletmenin sipariş ve stok bilgilerine erişim sağlamak amacıyla kurumsal kaynak planlama sistemi ile entegre edilmiştir. Firmanın veri tabanında yapılan değişiklikler anlık olarak dijital ikize düşmektedir. Dolayısıyla siparişin iptal edilmesi, miktarında değişiklik yapılması gibi durumlarda çizelgeleme güncel veriler doğrultusunda yapılmaktadır.

2. *adım: Stok kontrolü:* İnterlok, ribana, süprem, iki iplik ve üç iplik olmak üzere 5 farklı kumaş tipi baz alınmıştır. Kumaşları birbirinden farklı kılan temel sebep hammadde içeriğidir. Dolayısıyla her bir kumaşa gerekli hammadde bilgileri tanımlanmıştır. Bu sayede stok kontrolünü sağlamak mümkün hale gelmiştir. Dijital ikizin sunmuş olduğu çizelgelerden işletmenin tüm siparişler için belirlemiş olduğu teslim tarihlerinin ne kadar güvenilir olduğunu görmek mümkün hale gelmektedir. Stoklar için sunulan grafik ve tablolar yardımıyla işletmenin stoklar üzerindeki hakimiyetini sağlamak mümkün hale gelmektedir.

3. *adım: Siparişlerin makinelere atanması:* Belli kumaş tipleri yalnızca belli makinelerde işlenebilmektedir. Tablo 1'de bu durum özetlenmiştir. Bu özel durum, dijital ikize Simio RPS'in sağlamış olduğu fonksiyonlardan olan Math.If'in çoklu seçim koşulu ile tanımlanmıştır.

Tablo 1. Kumaşların işlem görebileceği makine türleri

Kumaş Tipi	İşlem Görebileceği Makine Türü
İnterlok (Interlock)	ÖM1, ÖM2
Ribana (Rib)	ÖM1, ÖM2
Süprem (Single Jersey)	ÖM3, ÖM5
İki İplik (Two Yarn Fleece)	ÖM3, ÖM5
Üç İplik (Three Yarn Fleece)	ÖM4

Siparişin özelliğine göre bazı siparişlerin tamamlanması oldukça uzun zaman alabilmektedir. Tablo 1’de de belirtildiği üzere aynı makinelerde işlem görebilen kumaş tipleri bulunmaktadır. Aynı makinede farklı bir kumaş tipinin işlem görebilmesi için belirli ayarların yapılması gerekmektedir. Bu kurulum (iş geçiş süresi) için gerekli süreler saat cinsinden Tablo 2’de belirtilmiştir.

Tablo 2. Makinelerdeki kumaş tipi değişimlerinde gerekli hazırlık süreleri

	İnterlok	Ribana	Süprem	İki İplik	Üç İplik
İnterlok	0	8	-	-	-
Ribana	8	0	-	-	-
Süprem	-	-	0	4	-
İki İplik	-	-	4	0	-
Üç İplik	-	-	-	-	0

Kurulum, çalışanlar tarafından yapılmakta olup çalışanlara atanan verimlilik değerlerine göre kurulum süresi değişkenlik gösterebilmektedir. Benzer şekilde işlem süreleri de makinelere atanan verimlilik değerine göre değişkenlik gösterebilmektedir.

- 4. adım: Çizelgelerin elde edilmesi:* Tüm adımların gerçekleşmesi sonucunda siparişlerin çizelgeleme başlangıç, bitiş tarihleri makinelerin tüm duraksamaları (kurulum ve boşta bekleme zamanları), kullanım oranları ve süreç darboğazları belirlenebilmektedir. Elde edilen grafikler, şemalar ve tablolar ile üretimdeki akışı incelemek ve yorumlamak oldukça kolay hale gelmektedir.
- 5. adım: Kalite kontrol:* Üretimi tamamlanan siparişler kalite kontrol sürecine girmektedir. Kumaşlar bu süreç için tanımlanan sürede kalite kontrolden geçerek bir sonraki adıma veya ikinci kalite kumaş bölümüne

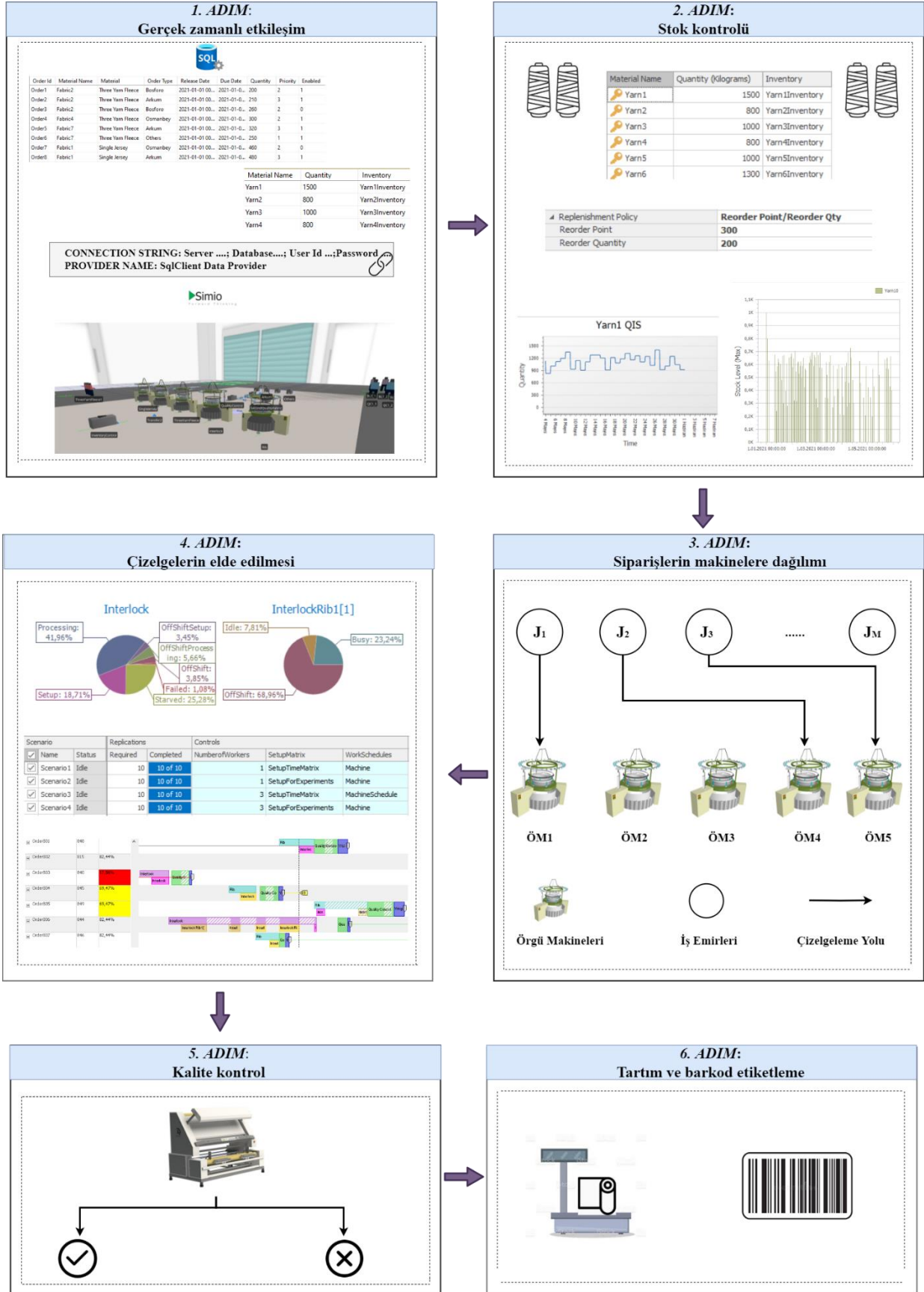
gitmektedir. İstatistiksel değerlendirmeler sonucunda fabrikadaki ürünlerin %95’i kalite kontrolden geçerken %5’i geçemeyip ikinci kalite kumaş bölümüne gitmektedir. Bir sipariş için yapılan kalite kontrol işleminde aynı anda 3 çalışan iş görmektedir. Dijital ikize tanımlanan işgören aynı anda yalnızca 1 siparişin kalite kontrolünü yapabilecek şekilde kısıtlandırılmıştır.

- 6. adım: Tartım ve barkod etiketleme:* Kalite kontrolden onay alan tüm ürünler son işlem olan tartım ve barkod etiketleme kısmına gelerek işgörene tanımlanan süre içerisinde tartım ve barkod etiketleme işlemini gerçekleştirmektedir. Bu kısımda da bir sipariş aynı anda 3 çalışan tarafından yapılacak şekilde tanımlanmıştır. Son olarak, tüm siparişlerin müşterilere teslim edileceği tarih belirlenerek sipariş veren firmalara göre teslimatının yapılması için uygun şekilde araçlara yüklemesi yapılmaktadır. Böylelikle süreç tamamlanmaktadır.

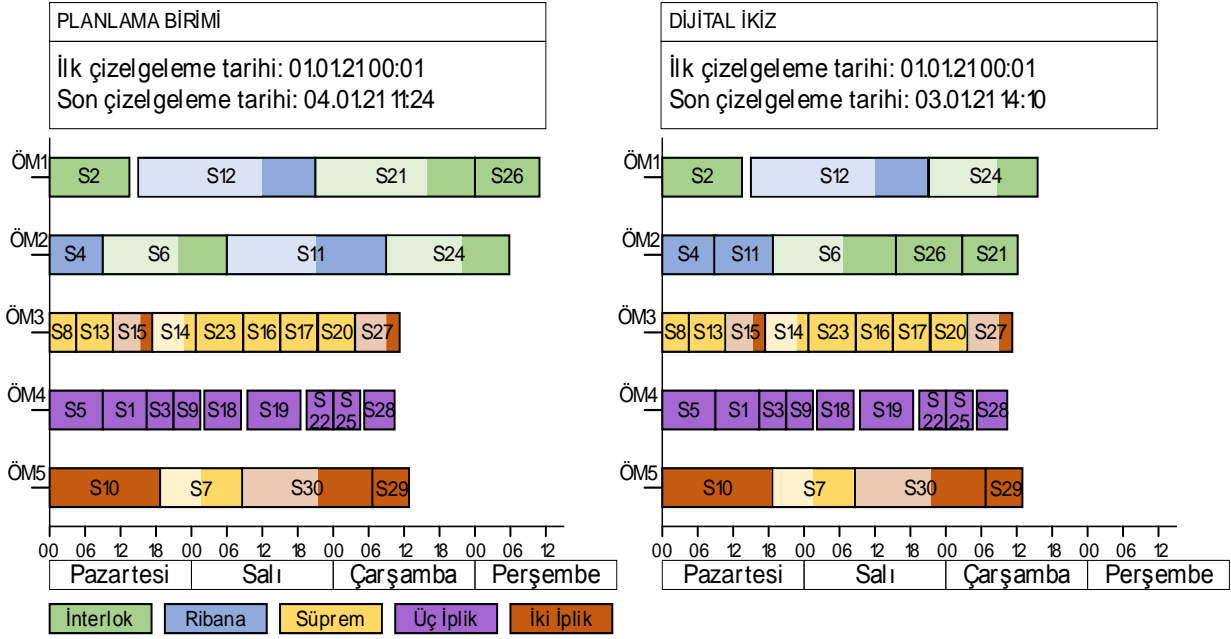
4.1. Modelin Çıktıları

Geliştirilen simülasyon tabanlı dijital ikiz modelinin başarısını gösterebilmek için öncelikle firma kayıtlarından alınan küçük ölçekli bir sipariş için çizelge oluşturulmuştur. Daha sonra yüksek sayıda sipariş içeren bir üretim için modelin verimliliği araştırılmıştır. Küçük ölçekli modelde makinenin işlem süreleri belirlenen dağılımlara uygun rastgele değişkenler olarak tanımlanmıştır. Modelin bu değerlerle çalıştırılması sonucunda elde edilen çıktı değerlerinin, işlenen sipariş sayısının, işlem süresinin ve üretilen çizelgeye göre doğru sonuçların olup olmadığı kontrol edilmiştir. Simülasyonun belirtilen periyotlar için çalıştırılması sonucunda çıktı değerleri doğrulanarak prototip model oluşturulmuştur. Bu prototip modelde örnek modeldeki kontrollere ek olarak çalışanın doğru makinede çalışıp çalışmadığı, siparişlerin sisteme girdiği tarih, kurulum ve işlem görme süreleri kontrol edilmiştir. Ayrıca stok miktarlarının belirtilen noktada ve miktarda artıp azalması simülasyon boyunca gözlemlenmiştir. Bu şekilde modelin doğrulanması ve geçerliliği sağlanmıştır.

Şekil 3’te 30 siparişten oluşan planlama sorumlusu tarafından uygulanmış örnek bir çizelge dijital ikiz ile çalıştırılmış ve elde edilen yeni çizelge karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Şekilde S harfi sipariş numaralarını, sipariş renkleri üzerindeki opak kısımlar makine kurulum sürelerini temsil etmektedir. 5 farklı tipteki örme makinesi için iş ataması yapılan kumaş tipleri farklı renklerle gösterilmiştir. Siparişler arasındaki boşluklar makinelerde işler arasındaki gerekli olan bakım sürelerinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 2. Üretim sürecine dijital ikizin uygulama adımları



Şekil 3. Planlama sorumlusu tarafından tecrübeye dayalı olarak ve dijital ikiz ile gerçek zamanlı veri kullanılarak oluşturulan iş çizelgeleri

Şeklin sol tarafında planlama biriminin kayıtlarından alınan gerçekleşmiş üretim görülmektedir. Bu üretim planı 83 saat 24 dakikada tamamlanmıştır. Dijital ikiz ile elde edilen çizelgede interlok ve ribana makinelerindeki işlerin bazılarının yerleri değişmiş ve ürün değişimi nedeniyle oluşan hazırlık süreleri (opak beyaz renk ile gösterilen kısımlar) azalmıştır. Böylelikle üretim süresi kısalmıştır. Böylece aynı miktardaki sipariş 62 saat 10 dakikada tamamlanabilir hale gelmiştir.

Az sayıdaki siparişlerde planlama sorumlusu tarafından tecrübeye dayalı hazırlanan çizelgeler kullanılabilir olsa da büyük ölçekli siparişlerde bunu yapmak mümkün değildir. Tablo 4'te 2 aylık üretim periyodu için işletmenin veri tabanından alınan 1180 adetlik siparişin planlama birimi tarafından uygulanmış hali ve dijital ikiz ile oluşturulan üretim çizelgesinin karşılaştırmalı analizi sunulmuştur.

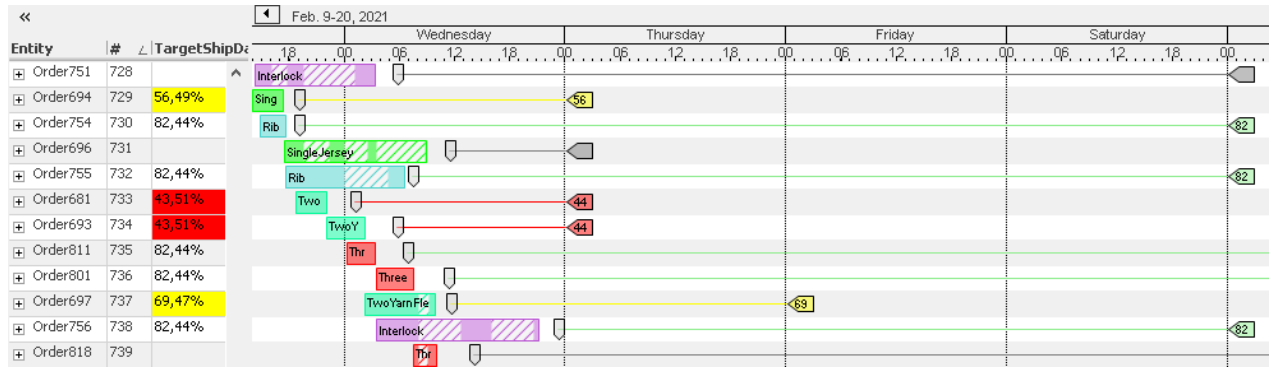
Sonuçların değerlendirilmesinde kullanılan ana performans göstergelerine bakıldığında dijital ikiz ile oluşturulan üretim çizelgesi toplam üretim süresini 2020,98 saatten 1637 saate düşürerek %19'lük bir gelişme sağlamıştır. Makine kullanım oranları ise %26 oranında artış göstermiştir ve makineler bazında daha dengeli bir kullanım oranı elde edilmiştir. Sistemden alınan siparişlerden toplamda 22 tanesi sonradan müşteri tarafından iptal edilmiştir. Kalan 1158 siparişten %19,49'u müşteriye teslim tarihinden sonra teslim edilmiştir. Buna karşın oluşturulmuş olan modelde siparişlerin yalnızca %2,49'u müşteriye geç teslim edilmiştir. Ayrıca önerilen model ile büyük ölçekli siparişlerin çizelgelenmesi sağlanmakta ve siparişlerin gerçekleştirilebilirlik riski analiz edilebilmektedir. Böylece üretimde olabilecek

aksaklıklar göz önünde bulundurularak hangi siparişlerin teslimatta gecikeceği öngörülmektedir. Şekil 3, iş emirleri için üretim planını ve risk analizlerini göstermektedir. Siparişler örme makinelerinde işlem görmekte, ardından kalite kontrol ve tartım işlemlerini tamamladıktan sonra teslimata gönderilmektedir.

Şekil 4'te taralı olarak gösterilen kısımlar arıza, bakım, vardiya değişimi gibi çeşitli nedenlerden kaynaklanan beklemleri göstermektedir. Arıza kayıtlarına bakıldığında makinelerin ortalama olarak 720 saatte bir arıza verdiği ve tamir süresinin üçgensel dağılıma uyduğu (random.triangular(7,8,9)) tespit edilmiştir. Bunun yanında, makineler çalışırken her yarım saatte bir durdurularak makinelerde temizlik işlemi yapılmaktadır. Siparişler için üretim çizelgesine bakıldığında 696, 751 ve 818 numaralı siparişler (Order 696, Order751 ve Order 818) için bir risk görünmemektedir. 751 numaralı siparişte İnterlok üretimi ÖM1'de tamamlandıktan sonra kalite kontrol ve tartım işlemlerinden geçerek siparişin teslimatı yapılabilecektir. 681 ve 693 numaralı siparişler (Order681 ve Order693) %43,51 olasılık ile istenilen tarihte tamamlanabilecektir. Her bir siparişin tamamlanma olasılığı ilgili sütunda görülebilmektedir. Böylece bu çizelgeden kırmızı renk ile işaretlenen 681 ve 693 numaralı siparişlerin büyük olasılıkla istenilen zamanda teslim edilemeyeceği anlaşılmaktadır. Sarı renk ile işaretlenen 694 ve 697 numaralı siparişler (Order694 ve Order697) orta düzeyde riske sahiptir. 754, 755, 756, 801 ve 811 numaralı siparişler ise düşük riske sahiptir ve yüksek ihtimalle istenilen tarihte tamamlanabilecektir.

Tablo 4. Büyük ölçekli siparişlerde sonuçların karşılaştırılması

Planlama yaklaşımı	Üretim süresi (saat)	Makine kullanım oranı (%)					İş gecikmeleri (%)				
		ÖM1	ÖM2	ÖM3	ÖM4	ÖM5	İnterlok	Ribana	Süprem	İki İplik	Üç İplik
Planlama birimi	2020,98	69,02	50,79	70,23	57,87	49,79	7,50	8,59	1,00	2,40	0,00
		Ortalama (%): 59,54					Toplam (%): 19,49				
Dijital ikiz	1637,00	73,02	72,43	79,03	74,76	77,48	1,03	1,29	0,00	0,17	0,00
		Ortalama (%): 75,34					Toplam (%): 2,49				

**Şekil 4.** İş emirlerinin tamamlanma olasılıklarını gösteren üretim çizelgesi

V. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada üretim çizelgelerinin oluşturulması ve çizelge risklerinin analiz edilmesi için dijital ikiz temelli bir yaklaşım önerilmiştir. Geçmiş sipariş verileri ile doğrulanan model, anlık olarak sipariş verisini alıp çizelgeler üretebilir düzeydedir. Önerilen çözümün en büyük avantajlarından bir tanesi üretim ortamındaki değişkenlikleri dikkate alarak uygulanabilir çizelgeler oluşturmasıdır. Böylece birçok kısıt ve büyük problem boyutu nedeniyle gerçek hayata uygulanamayan çizelgeleme modellerine alternatif bir çözüm sunulabilmektedir. Ayrıca, risk analizi ile üretimde olabilecek aksaklıklar göz önünde bulundurularak hangi siparişin teslimatta gecikebileceği öngörülmektedir. Çizelgelerin dijital ikiz ile üretilmesindeki en önemli hususlardan başlıcaları uzman kimselerce (çizelge uzmanı) modelin oluşturulması gerekliliği ve firma veri tabanında verilerin düzgün olarak tutulmasıdır. Aksi takdirde hatalı bir çalışmanın işletme bazında uygulamaya geçirilmesi durumunda küçük hatalar işletme için çok büyük zararlara neden olabilecektir.

Literatürde bu çalışmada kullanılan problem boyutundan büyük ölçekli problemler çalışılmıştır. Dolayısıyla model daha büyük ölçekli problemler için test edilebilir ve performansını değerlendirilebilir. Ayrıca model sipariş verilerini gerçek zamanlı olarak kullanabilse de ekipman erişilebilirlikleri gerçek zamanlı değildir. Dijital ikiz modeli bu verinin de entegrasyonu ile geliştirilebilir. Bir başka aşama olarak hammadde ve çalışan maliyetleri modele eklenebilir. Böylece dijital ikize hedef maliyet ve kısıtlar

tanımlanarak toplam maliyeti minimize eden çizelgeler elde edilebilir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

TEŞEKKÜR

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) bu çalışmayı 2209-B Üniversite Öğrencileri Sanayiye Yönelik Araştırma Projeleri Desteği Programı kapsamında 1139B412000737 başvuru numaralı proje ile desteklemiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Kumaş, E. & Erol, S. (2021). Endüstri 4.0'da anahtar teknoloji olarak dijital ikizler. *Politeknik Dergisi*, 24(2), 691–701.
- [2] Zhuang, C., Liu, J. & Xiong, H. (2018). Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 96(4), 1149–1163. doi: 10.1007/s00170-018-1617-6.
- [3] Wellener, P., Shepley, S., Dollar, B., Laaper, S., & Manolian, H. (2019). Deloitte and MAPI Smart Factory Study. https://deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/6276_2019-Deloitte-and-MAPI-Smart-Factory-Study/DI_2019-Deloitte-and-MAPI-Smart-Factory-Study.pdf.
- [4] Tao, F, Zhang, M., Liu, Y. & Nee, A.Y.C. (2018). Digital twin driven prognostics and health

- management for complex equipment. *CIRP Ann.*, 67(1), 169–172. doi: 10.1016/j.cirp.2018.04.055.
- [5] Tao, F., Zhang, H., Liu, A. & Nee, A.Y.C. (2019). Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Trans. Ind. Informatics*, 15(4), 2405–2415. doi: 10.1109/TII.2018.2873186.
- [6] Tao, F., Zhang, M. & Nee, A.Y.C. (2019). Digital Twin Driven Smart Manufacturing. Academic Press.
- [7] Lu, Y. & Xu, X. (2018). Resource virtualization: A core technology for developing cyber-physical production systems. *J. Manuf. Syst.*, 47, 128–140. doi: 10.1016/j.jmsy.2018.05.003.
- [8] Urbina Coronado, P.D., 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. *J. Manuf. Syst.*, 48, 25–33. doi: 10.1016/j.jmsy.2018.02.002.
- [9] Schluse, M., Priggemeyer, M., Atorf, L. & Rossmann, J. (2018). Experimentable Digital Twins-Streamlining Simulation-Based Systems Engineering for Industry 4.0. *IEEE Trans. Ind. Informatics*, 14(4), 1722–1731. doi: 10.1109/TII.2018.2804917.
- [10] Saraç, T., Erten, K. & Yılmaz, E. (2018). Kaynak Makinelerinin Vardiya Bazında Çizelgenmesi Problemi İçin İki Aşamalı Bir Çözüm Yaklaşımı. *Endüstri Mühendisliği*, 29(1–2), 2–14.
- [11] Eren, T. & Güner, E. (2002). Tek ve paralel makinalı problemlerde çok ölçütlü çizelgeleme problemleri için bir literatür taraması. *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, 17(4), 37–69.
- [12] Pinedo, M.L. (2016). Scheduling: theory, algorithms, and systems. 5. baskı. Cham. Springer.
- [13] Ji, W. & Wang, L. (2017). Big data analytics based fault prediction for shop floor scheduling. *J. Manuf. Syst.*, 43, 187–194. doi: 10.1016/j.jmsy.2017.03.008.
- [14] Manne, A.S. (1960) On the Job-Shop Scheduling Problem. *Oper. Res.*, 8(2), 219–223. doi: 10.1287/opre.8.2.219.
- [15] Sipahioglu, A. & Saraç, T. (2009) The performance of the modified subgradient algorithm on solving the 0-1 quadratic knapsack problem. *Informatica*, 20(2), 293-304. doi: 10.15388/informatica.2009.251.
- [16] Akyol Özer, E. & Saraç, T. (2012). Plastik parçalar üreten bir fabrikanın montaj hatlarının çizelgenmesi. *Endüstri Mühendisliği*, 23(2), 28–41.
- [17] Kasımoğlu, S., Demir, G., Yaz, B.P. & Utku, D.H. (2021). An Application: A Model with Sequence Dependent Setup Times for Parallel Machines for the Die House Station in a White Goods Manufacturing Company. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, 4(1), 33–44.
- [18] Kaya, S. & Fırlalı, N. (2013). Multi Objective Flexible Job Shop Scheduling Problems. *Sigma*, 31(4), 605–623.
- [19] Kaya, S. & Fırlalı, N. (2016). Esnek atölye tipi çizelgeleme problemlerinin meta sezgisel yöntemler ile çözümüne yönelik bir inceleme. *SAÜ Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, 20(2), 223-224.
- [20] Moradi, E., Fatemi Ghomi, S.M.T. & Zandieh, M. (2011). Bi-objective optimization research on integrated fixed time interval preventive maintenance and production for scheduling flexible job-shop problem. *Expert Syst. Appl.*, 38(6), 7169–7178. doi: 10.1016/j.eswa.2010.12.043.
- [21] Yılmaz, O.F. & Durmusoglu, M.B. (2019). Multi-objective scheduling problem for hybrid manufacturing systems with walking workers. *Int. J. Ind. Eng. Theory Appl. Pract.*, 26(5), 625–650.
- [22] Sağır, M. & Okul, H.D. (2020). Restricted Enumeration And Machine Grouping Based Approach for Hybrid Flexible Flow Shop Scheduling Problems With Sequence-Dependent Setup Times. *Journal of Industrial Engineering (Turkish Chamber of Mechanical Engineers)*, 31(3).
- [23] Zhang, Y., Huang, G.Q., Sun, S. & Yang, T. (2014). Multi-agent based real-time production scheduling method for radio frequency identification enabled ubiquitous shopfloor environment. *Comput. Ind. Eng.*, 76(1), 89–97. doi: 10.1016/j.cie.2014.07.011.
- [24] Freitag, M. & Hildebrandt, T. (2016). Automatic design of scheduling rules for complex manufacturing systems by multi-objective simulation-based optimization. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, 65(1), 433–436. doi: 10.1016/j.cirp.2016.04.066.
- [25] Kan, C., Yang, H. & Kumara, S. (2018). Parallel computing and network analytics for fast Industrial Internet-of-Things (IIoT) machine information processing and condition monitoring. *J. Manuf. Syst.*, 46, 282–293. doi: 10.1016/j.jmsy.2018.01.010.
- [26] Turker, A.K., Aktepe, A., Inal, A.F., Ersoz, O.O., Das, G.S. & Birgoren, B. (2019). A decision support system for dynamic job-shop scheduling using real-time data with simulation. *Mathematics*, 7(3), 278. doi: 10.3390/math7030278.
- [27] Zhang, M., Tao, F. & Nee, A.Y.C. (2021). Digital Twin Enhanced Dynamic Job-Shop Scheduling. *J. Manuf. Syst.*, 58, 146–156. doi: 10.1016/j.jmsy.2020.04.008.