

# ÜRETİM SİSTEMLERİNDE ENDÜSTRİ 4.0'IN ENVANTER MALİYETLERİNE ETKİSİ ÜZERİNE BİR SENARYO İNCELEMESİ

Araştırma Makalesi

Sedat BELBAĞ<sup>1</sup>  
Mustafa ÇİMEN<sup>2</sup>  
Mehmet SOYSAL<sup>3</sup>

BELBAĞ, S., ÇİMEN, M. ve SOYSAL, M., (2020), **Üretim Sistemlerinde Endüstri 4.0'ın Envanter Maliyetlerine Etkisi Üzerine Bir Senaryo İncelemesi**, Verimlilik Dergisi, Yıl: 2020, Sayı: 2, T. C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Yayını.

## ÖZET

Endüstri 4.0, artan küresel çaptaki rekabet ortamında üretim işletmelerinin nesnelere interneti, siber-fiziksel üretim sistemleri, üç boyutlu yazıcılar, akıllı makineler ve depolama sistemleri gibi teknolojileri kullanarak insan faktörünün ortadan kaldırıldığı tamamen otonom bir üretim anlayışını temsil etmektedir. Endüstri 4.0'ın gelişimi ile paralel olarak, akıllı üretim sistemleri başta yüksek verimlilik ve kapasite kullanım oranı gibi birçok açıdan geleneksel üretim sistemlerine üstünlük sağlamaktadır. Diğer yandan, akıllı üretim sistemlerinin kurulum aşamasında yüksek miktarda yatırım gerekmektedir. Düşük kapasite esnekliği akıllı üretim sistemlerinin önceden belirlenen kapasitenin üstündeki talepleri karşılamasını engelleyebilmektedir. Bu çalışma, akıllı üretim sistemi ile geleneksel üretim sistemini sonlu planlama ufkunda birden çok ürün üretimi ve sıra bağımlı hazırlık maliyeti varsayımlarını altındaki bir sipariş miktarı ve çizelgeleme problemini dikkate alarak karşılaştırmaktadır. Çalışmanın amacı, akıllı üretim sistemlerinin hangi durumlarda envanter maliyetleri açısından avantajlı, hangi durumlarda dezavantajlı hale geldiğini tespit etmektir. Yapılan analizler, akıllı üretim sistemlerindeki tam otomasyona sahip makineler ile verimlilikteki artıştan sağlanacak faydanın derecesinin doğru kapasite belirlenmesi ile yakından ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Endüstri 4.0, Akıllı Üretim Sistemi, Sipariş Miktarı ve Çizelgeleme Problemi, Sıra-Bağımlı Hazırlık Maliyeti.

<sup>1</sup> Sedat BELBAĞ, Arş. Gör. Dr., Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, İİBF, İşletme Bölümü. ORCID: 0000-0002-4136-2468

<sup>2</sup> Mustafa ÇİMEN, Dr. Öğr. Üyesi, Hacettepe Üniversitesi, İşletme Bölümü, Sayısal Yöntemler Anabilim Dalı. ORCID: 0000-0001-8155-9145

<sup>3</sup> Mehmet SOYSAL, Dr. Öğr. Üyesi, Hacettepe Üniversitesi, İşletme Bölümü, Üretim Yönetimi Anabilim Dalı. ORCID: 0000-0002-1570-660X

\* Makale Gönderim Tarihi: 15.11.2018 Kabul Tarihi: 14.12.2018

# A SCENARIO ANALYSIS ON THE EFFECT OF INDUSTRY 4.0 ON INVENTORY COSTS IN PRODUCTION SYSTEMS

## **ABSTRACT**

*In a growing competitive environment, Industry 4.0 represents a total autonomous production concept where companies take advantage of technologies such as internet of things, cyber-physical production systems, 3-D printers, smart machines and storage systems to eliminate human factor from production processes. In parallel with the development of Industry 4.0, smart production systems are superior to traditional production systems in various ways such as high productivity and capacity usage. Moreover, a considerable amount of investment is required in the configuration phase of smart production systems. Low capacity flexibility might prevent smart production systems to satisfy the demand that exceeds the predetermined capacity. This study compares the intelligent production system with the traditional production system by taking into account the order quantity and scheduling problem under the assumptions of multiple product production and sequence dependent preparation costs in the finite planning horizon. The study aims to determine the cases where smart production systems are advantageous and disadvantageous with respect to inventory costs. The analysis shows that the degree of benefit from the increase in productivity with fully automated machines in intelligent production systems is closely related to determining the correct capacity.*

**Keywords:** Industry 4.0, Smart Production System, Lot-Sizing and Scheduling Problem, Sequence-Dependent Setup Cost.

## 1. GİRİŞ

Üretim süreçleri insanlık tarihi ile paralel ilerlemekle birlikte modern anlamdaki üretim faaliyetleri Birinci Endüstri Devrimi'ne dayanmaktadır. Birinci Endüstri Devrimi (Endüstri 1.0), 18. yüzyılın ortalarında İngiltere'de başlayarak, 19. yüzyılın başlarına doğru Amerika kıtasında etkisini göstermeye başlamıştır (Stevenson, 2015). Endüstri Devrimi öncesinde üretim faaliyetleri atölyelerde emek yoğun işgücüne dayalı ve düşük miktarlarda yapılmıştır. Buharlı makinelerin icadı sayesinde insana dayalı işgücü, makineye dayalı işgücüne dönüşmüştür. Böylece üretim hem nitelik hem de nicelik bakımından büyük bir dönüşüme uğramıştır. Bu dönemde yoğun talebi karşılamak amacıyla yüksek miktarlarda üretim yapılmıştır.

İkinci Endüstri Devrimi (Endüstri 2.0) teknolojide yaşanan gelişmeler neticesinde 19. yüzyılın ortalarında başlayıp 20. yüzyılın ortalarına kadar sürmüştür. Bu dönem içerisinde elektrik, elektronik ve mekanik alanlarında artan bir ivme ile teknolojik ilerlemeler kaydedilmiştir (Yin vd., 2018). Frederick Taylor'ın ortaya koyduğu "Bilimsel Yönetim" anlayışı, üretim sistemlerinin ne şekilde düzenlenmesi ve işlenmesi gerektiğini belirterek Henry Ford tarafından otomobil üretiminde başarıyla uygulama alanı bulmuştur. Üretim açısından yüksek miktarın yanında ürün çeşitliliği kavramı da önemli hale gelmiştir. Örnek olarak, Ford Model T isimli ve sadece siyah renkte üretilen otomobili sayesinde 1920'lere kadar pazarın üçte ikisini elinde bulundururken, müşterilerin farklı renkte otomobil ihtiyacına cevap vermemiştir. Farklı renklerde otomobil üretmediği için 1940'larda Ford'un toplam pazar payı yaklaşık olarak % 20'lere kadar gerilemiştir (Yin vd., 2018).

Teknolojide yaşanan hızlı gelişmeler başta petrol olmak üzere hammadde ve enerjiye olan ihtiyacı giderek arttırmıştır. Amerika'da 1970'lerde yaşanan petrol krizinden sonra küresel ekonomi hızla artan bir büyümeye girerek endüstride yeni bir devriminin yaşanmasına temel oluşturmuştur (Jänicke ve Jacob, 2009). Üçüncü Endüstri Devrimi (Endüstri 3.0) otomasyon ve iletişim teknolojilerinde yaşanan gelişmeler neticesinde yaklaşık olarak 1980'lerde başlayıp günümüze kadar devam etmektedir. İnternet, yapay zeka, bilgisayar, robot gibi teknolojiler üretim sistemlerinin yapısını ciddi şekilde değişime uğratmıştır. İnternet ve internete bağlı teknolojilerle birlikte iletişim ve ulaşım imkanlarının kolaylaşması, küresel anlamda entegre olmuş endüstri yapısına olanak sağlamıştır.

Üretim araçlarına internetin entegre edilmesi ile bu araçların aralarında iletişimi sağlayacak yazılımların geliştirilmesi günümüz endüstrisinin yeniden tanımlanmasına olanak sağlamıştır. Endüstri 4.0 kavramı ilk olarak 2011 Almanya Hannover Fuarı'nda gündeme gelmiş, sonrasında konu üzerine Henning Kagermann önderliğindeki çalışma grubu tarafından 2013

yılında bir rapor sunulmuştur. Bu rapora göre, Endüstri 4.0 artan küresel çaptaki rekabet karşısında üretim işletmelerinin yeni teknolojileri kullanarak tamamen otonom yapıda olacak bir üretim anlayışını benimsemesini temsil etmektedir.<sup>4</sup> Endüstri 4.0 kavramı içerisinde nesnelere interneti, siber-fiziksel üretim sistemleri, üç boyutlu yazıcılar, akıllı makineler ve depolama sistemleri gibi teknolojiler yer almaktadır (Pamuk ve Soysal, 2018).

Endüstri 4.0, geleneksel üretim sistemlerine göre işletmelere önemli rekabet avantajları sağlamaktadır. Birincisi, Endüstri 4.0 kaynakların verimli ve etkin bir şekilde kullanılmasına olanak vermektedir (Kagermann vd., 2013). İkinci olarak, işletmeler birbirleri ile sürekli iletişim halinde bulunan makineler sayesinde değişen üretim ihtiyaçlarını düşük maliyetlere katlanarak karşılayabilmektedir (Brettel vd., 2014). Üçüncü olarak, gelişen bu teknolojiler, üretim süreçlerinden elde edilen gerçek zamanlı verileri hızlı ve tutarlı karar verme sürecinde kullanılabilir hale getirebilmektedir (Zheng vd. 2018). Dördüncüsü, Endüstri 4.0 öncesi karar verme sürecinde yöneticiler ön plana çıkarken, akıllı makine, operatör ve mobil cihazlar arasındaki anlık iletişimin gelişmesi ile birlikte karar verme süreci makinelere devredilebilmektedir (Yin vd., 2018). Çalışanlar basit düzeydeki görevleri yerine getirmektense akıllı üretim sistemi içerisinde yer alan makinelerin idaresini gerçekleştirebilmektedir.

Endüstri 4.0'ın sağladığı avantajlara rağmen akıllı bir üretim sistemi oluşturmak çeşitli zorlukların üstesinden gelmeyi gerektirmektedir. Yüksek derecede otomasyona sahip akıllı üretim sistemlerinin kurulması için gereken yatırım miktarı oldukça fazladır. Bu sebeple, yüksek yatırımın parasal açıdan geri dönüşü uzun vadeli olacaktır. Bir diğer zorluk ise, yüksek derecede otomasyona sahip üretim sistemlerinde insan faktörü ortadan kalktığı için kapasite esnekliğinin azalma ihtimalidir. Her ne kadar akıllı üretim sistemlerinin kullanımı verimlilik ve kapasite kullanım oranında artışlara neden olabilecek olsa da, önceden belirlenmiş kapasite, beklenmedik talep artışları karşısında yetersiz kalabilir. Bu çalışmada akıllı üretim sistemlerinin sağladığı yüksek verimlilik ve kapasite kullanım oranına rağmen, kapasite esnekliğindeki muhtemel azalma durumunun envanter maliyetlerine olası etkileri incelenmektedir.

Söz konusu inceleme, sonlu planlama ufkunda birden çok ürün üretimi ve sıra bağımlı hazırlık maliyeti varsayımlarını dikkate alan bir sipariş miktarı ve çizelgeleme problemi vasıtasıyla tam otomasyona sahip akıllı bir üretim sistemi ile insan faktörü ve otomasyonun bir arada kullanıldığı bir üretim sisteminin<sup>5</sup> karşılaştırılmasıdır. Bahsedilen iki üretim sisteminin

---

<sup>4</sup> <https://www.cleverism.com/industry-4-0/>, Erişim Tarihi: 29.08.2018.

<sup>5</sup> Buradan itibaren geleneksel üretim sistemi olarak anılacaktır.

karşılaştırılabilmesi için bir Sayısal Modele ihtiyaç duyulmaktadır. Her iki üretim sistemi için dikkate alınan sipariş miktarı ve çizelgeleme problemi Tam Sayılı Doğrusal Programlama kullanılarak modellenmiş ve Benzetim Yöntemi kullanılarak karşılaştırılmıştır. Çalışmanın amacı, insansız üretim kabiliyetine sahip akıllı üretim sistemlerinin hangi durumlarda kapasite esnekliğinin düşmesine rağmen envanter maliyetleri açısından avantajlı olduğunu, hangi durumlarda dezavantajlı hale geldiğini tespit etmektir.

Çalışmanın geri kalan kısmı şu şekilde yapılandırılmıştır. İkinci bölümde ilgili probleme ilişkin literatür incelenmiştir. Üçüncü bölüm problemin tanımını ve önerilen modelleri içermektedir. Dördüncü bölümde örnek bir problem üzerinde Endüstri 4.0'a uyum sağlamanın faydalarını ortaya koyan sayısal analizler yapılmaktadır. Son bölümde, çalışmaya ait sonuçlar ortaya koyularak ileriki çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Endüstri 4.0'ın temel amacı; verimliliği, etkinliği ve enerji tasarrufunu arttırarak işletmelere küresel pazarda rekabet avantajı sağlamaktır (Vuksanovic vd., 2016). Önümüzdeki 5-10 yıl içerisinde üretim tesislerinin Endüstri 4.0'a uyumlu hale getirilmesi ile elde edilen verimlilik artışının Almanya'daki üretim sektörü gelirinin 90 milyar avrodan 150 milyar avroya çıkarması ve maliyetlerde % 25'lere varan tasarruf sağlaması beklenmektedir (Rüßmann vd., 2015). Endüstri 4.0 içerisinde yer alan nesnelerin interneti, bulut depolama teknolojisi, robotlar ve 3-boyutlu yazıcı gibi teknolojilerle donatılmış akıllı üretim sistemleri bahsedilen verimlilik artışının temelini oluşturmaktadır.

Akıllı üretim sistemleri sahip oldukları ileri düzeyde otomasyon sayesinde üretimde yüksek verimlilik ve esnek üretim süreçlerine olanak sağlamaktadır (Kagermann vd., 2013). Akıllı üretim sisteminde yer alan robot, siber fiziksel üretim sistemleri ve akıllı taşıma sistemleri kapasite kullanım oranını en üst düzeye taşıyacaktır. Akıllı üretim sistemleri otomasyonun sağladığı maliyet faydası insan faktörünün ortadan kalkmasından dolayı işçilik maliyetinde kalmaksızın, hazırlık, üretim ve envanter maliyetlerindeki azalmadan da kaynaklanmaktadır (Smunt ve Meredith, 2000). Geleneksel üretim sistemlerinden farklı olarak akıllı üretim sistemlerinde, üretim süreçlerini ilgilendiren stratejik, taktiksel ve operasyonel kararlar insan faktörü olmaksızın aralarında sürekli iletişim halindeki akıllı makineler tarafından verilecektir (Brettel vd., 2014).

Tüm bu avantajlara rağmen Endüstri 4.0'a uyumlu akıllı üretim sistemleri oluşturabilmek için gereken ilk yatırım miktarı oldukça yüksektir. Ayrıca akıllı üretim sistemleri, verimlilik ve kapasite kullanım oranını olumlu yönde

etkileyebilse de, yatırım maliyetinin yüksek olması nedeniyle akıllı üretim sistemlerinin, kapasite esnekliğini olumsuz yönde etkileyebilme olasılığı bulunmaktadır. Endüstri 4.0 üretimdeki insan faktörünü sıfıra ya da sıfıra yakın bir düzeye indirdiği için özellikle kısa ve orta vadeli öngörülemez kapasite değişikliğinde insan faktöründen faydalanma neredeyse olanaksız hale gelmektedir. Bu durumda kapasite değişikliği yapmak için tüm sistemin yeniden tasarımına kadar varacak düzenlemeler ve yüksek miktarda ek yatırımlar gerekebilir. İnsan faktörünün ortadan kalkması ile azalan kapasite esnekliği, sipariş miktarının ne olacağı ve hangi sırayla üretimin gerçekleştirileceği kararlarını doğrudan etkileyebilmektedir.

Yukarıda bahsedilen kararlar literatürde sipariş miktarı ve çizelgeleme problemi altında ele alınmaktadır. Drexl ve Kimms (1997) ile Zhu ve Wilhelm (2006) sipariş miktarı ve çizelgeleme problemi ile ilgili kapsamlı literatür taramaları sunmaktadır. Bu problemi inceleyen çalışmalar; üretim, elde bulundurma, ceza ve hazırlık maliyetlerini yaygın olarak dikkate almaktadır. Sipariş miktarı ve çizelgeleme problemindeki hazırlık maliyetlerine ilişkin temel varsayımlar ise hazırlık maliyetinin göz ardı edilmesi, sıra bağımsız ve sıra bağımlı (bir ürünün üretiminden başka bir ürünün üretimine geçerken katlanılan hazırlık maliyetinde bir değişiklik olması) olması şeklinde sıralanabilir. Hazırlık maliyeti literatürdeki çalışmalarda, i) bir dönemde sadece dönem başında üretim hazırlığı yapılarak dönem sonuna kadar başka bir üretime izin verilmemesi (Fleischmann, 1990), ii) dönem başında bir ürün için hazırlık yapıldıktan sonra dönem içerisinde sadece bir kere başka bir ürün üretimi için yeniden hazırlık yapılması (Haase, 1994), iii) bir dönem içerisinde birden çok makine hazırlığı yapılabilmesi (Haase, 1996) gibi varsayımlar altında dikkate alınmıştır. Akıllı üretim sistemleri teknolojik üretim araçları sayesinde birden çok ürünü üretebilme kabiliyetine sahip olabilmektedir. Böylece, bir dönem içerisinde farklı ürünlere yönelik talepleri karşılayabilmek için üretim araçları birçok kez hazırlanabilir. Literatürde birçok çalışma (örn. Fleischmann, 1994; Haase ve Kimms, 2000; Gupta ve Magnusson, 2005; Almada-Lobo vd., 2007; Almada-Lobo vd., 2010) geleneksel üretim sistemlerinde karşılaşılan sıra bağımlı sipariş miktarı ve çizelgeleme problemine yönelik çözüm önerileri sunmaktadır. Bahsedilen problem karmaşıklık seviyesi arttıkça çözüm süresi de üssel olarak artan problem (NP-hard) olarak tanımlanmaktadır (Almada-Lobo vd., 2007).

Söz konusu problemde ele alınması gereken bir diğer konu ise, çeşitli beklenmedik durumlardan kaynaklanan (arıza, hatalı üretim, uzun temin süresi vb.) üretim hedeflerinde yaşanabilecek olası sapmalardır. İnsan faktörünün yoğun bir şekilde kullanıldığı geleneksel üretim sistemlerinde üretim hedeflerinden sapma sıkça karşılaşılan bir durum iken, tam otomasyona sahip akıllı üretim sistemlerinde üretim hedeflerinden çok

nadir olarak sapma beklenmektedir. Yine de, ne kadar mükemmel tasarlanırsa da akıllı üretim sistemlerinde de donanımsal ve/veya yazılımsal kaynaklı aksaklıkların üretim hedeflerini etkilemesi olasılık dâhilindedir. Akıllı üretim sistemlerinde kapasite değişikliğine ihtiyaç az olsa da, üretim hedeflerinde yaşanan sürekli sapmalar sebebiyle kısa sürede kapasite değişimine gidilmesi oldukça zor ve maliyetli bir süreç olacaktır.

Bunlara ek olarak, akıllı üretim sistemlerinde insan faktörünün ortadan kaldırılarak karar verme sürecinin makinelere devredilmesi, akıllı makinelerin sipariş miktarı ve çizelgeleme problemi çözümünde kullanabileceği Karar Destek Modellerinin geliştirilmesini gerektirmektedir. Bildiğimiz kadarıyla sıra bağımlı sipariş miktarı ve çizelgeleme problemi literatürde geleneksel üretim sistemleri açısından sıkça ele alınmasına rağmen tam otomasyona sahip akıllı üretim sistemlerine yönelik çözüm önerileri sunulmamıştır. İnsan faktörünün ortadan kaldırılarak karar verme yetkisinin sadece makinelere devredildiği bir sistemde optimal kararların elde edilmesini sağlayacak karar destek sistemlerinin varlığı hayati bir önem arz etmektedir.

Bu çalışmanın literatüre olan katkısı; i) tam otomasyona sahip akıllı üretim sistemi ile geleneksel üretim sisteminde karşılaşılan sipariş miktarı ve çizelgeleme probleminin çözümü için matematiksel modellerin önerilmesi, ii) insansız akıllı üretim sistemlerinin üretim hedeflerindeki sapmalardan kaynaklanan kapasite değişimi ihtiyacına bağlı olarak envanter maliyetleri açısından hangi durumlarda insan faktörünün kullanıldığı geleneksel üretim sistemlerine göre hangi durumlarda avantajlı hangi durumlarda dezavantajlı konuma geldiğinin ortaya konmasıdır.

### **3. PROBLEMİN TANIMI**

Bu çalışma sipariş miktarı ve çizelgeleme probleminde, sonlu planlama ufku varsayımı altında birden çok ürünün optimal olarak üretim miktarı ve sırasını belirlemeyi amaçlamaktadır. Üretim tesisi belirli bir kapasite kısıtı altında birden çok ürünü üretebilmektedir. Üretim tesisi her dönem başında herhangi bir maliyete katlanmaksızın bir çeşit ürünü üretebilmek için hazırdır. Üretim tesisi birden çok ürün üretebildiği için makineler dönem içerisinde bir ürünün üretiminden başka bir ürünün üretimine yönelik hazırlanabilir. Böyle bir durumun gerçekleşmesi bir hazırlık maliyeti ortaya çıkarılmalıdır. En son üretilen ürün için yapılan makine hazırlığı bir sonraki dönem başına aktarılmaktadır.

Her bir birim ürünün aynı maliyet ile üretildiği varsayılmıştır. Envanter durumu periyodik olarak her dönem başı kontrol edilmekte, dönem sonunda elde bulunan ürünler belli bir elde bulundurma maliyetine katlanılarak bir sonraki döneme aktarılmaktadır. Ürünlerin talepleri Poisson

dağılımına sahiptir ve her bir ürünün talep ortalamaları birbirinden farklıdır. Planlama ufkunun başında, her dönem için gerçekleşecek talepler önceden bilinmektedir. Talepler dönem başındaki ürünler ile dönem içerisinde üretilen ürünlerin toplamı ile karşılanabilmektedir. Eğer o dönemdeki talebin tamamı karşılanamazsa, ceza maliyetine katlanılmaktadır. Karşılanamayan talepler daha sonraki dönemlere aktarılmaktadır.

Bahsedilen sipariş miktarı ve çizelgeleme problemi akıllı üretim sistemi ve geleneksel üretim sistemi olmak üzere iki farklı üretim sistemi açısından ele alınmaktadır. Akıllı üretim sistemi tam otomasyona sahip olmakla birlikte insan faktörünün üretim ve karar süreçlerinden tamamen çıkarıldığı varsayılmaktadır. Akıllı üretim sisteminin bir dönem içerisinde beklenmeyen arızalar dışında maksimum kapasitesi kadar üretim yapabildiği varsayılmıştır. Taleplerin kapasitesinin üzerinde gelmesi durumunda insan faktörü ortadan kaldırıldığı için fazla mesai gibi olanaklardan faydalanamamaktadır. Geleneksel üretim sistemi gerek otomasyonu gerekse insan faktörünü bir arada bulundurmaktadır. Bu sistem önceden belli bir kapasiteye sahip olmasına rağmen, beklenmeyen talep artışlarına karşı fazla mesaiden faydalanabilmektedir.

Akıllı ve geleneksel üretim sistemlerinde çeşitli sebeplerden dolayı her dönem üretim hedeflerinde sapmalar meydana gelebilme ihtimali bulunmaktadır. Üretim hedeflerinde sapma gerçekleşmesi dönem sonunda ürünlere olan taleplerin tamamen karşılanamamasına neden olabilmektedir. Akıllı üretim sisteminde üretim süreçleri tam otomasyona sahip oldukları için üretim hedeflerindeki sapmaların düşük oranda gerçekleştiği varsayılmıştır. Geleneksel üretim sisteminde ise, üretim süreçlerinde insan faktörü yoğun bir şekilde kullanıldığı için üretim hedeflerindeki sapma miktarının akıllı üretim sisteminde gerçekleşmesi olası sapma miktarından daha yüksek olduğu kabul edilmiştir. Fazla mesai durumunda, üretim hedeflerinin tamamen karşılandığı varsayılmıştır. Her iki üretim sistemi için önerilen Tam Sayılı Programlama Modellerinde kullanılan parametre ve değişkenler Çizelge 1’de verilmiştir.

**Çizelge 1. Matematiksel Modelde Kullanılan Notasyon**

Sembol	Açıklama
$P$	Ürün çeşidi kümesi $\{1,2, \dots,  P \}$
$T$	Planlama ufku $\{1,2, \dots,  T \}$
$\phi_{p,p'}$	$p$ ürününden $p'$ ürününe geçmek için üretim hazırlık maliyeti
$u$	Birim üretim maliyeti
$\beta$	Birim fazla mesai üretim maliyeti
$\alpha_p$	$p$ ürünü için birim ceza maliyeti
$h$	Birim elde bulundurma maliyeti



$d_{p,t}$	$t$ döneminde $p$ ürünü için oluşan talep miktarı
$c$	Toplam üretim kapasitesi
$m$	Fazla mesai ile üretebileceği ürün miktarının oranı
$k_p$	Planlama ufkunun başında $p$ ürünü için stok miktarı
$Q_{p,t}$	$t$ döneminde $p$ ürünün üretim miktarı
$\theta_{p,t}$	$t$ döneminde $p$ ürünün fazla mesai ile üretim miktarı
$\eta_{p,t}$	$p$ ürünü için $t$ döneminin sonunda karşılanamayan talep miktarı
$\pi_{p,t}$	$p$ ürünü için $t$ döneminin sonunda elde kalan stok miktarı
$I_{p,t}$	$p$ ürünü için $t$ döneminin başında stok miktarı
$Y_{p,t}$	$t$ döneminin başında $p$ ürünü için üretim hazırlığı yapıp yapılmadığı, 0-1 değişkeni
$S_{p,p',t}$	$t$ döneminde $p$ ürününden $p'$ ürününe geçmek için üretim hazırlık maliyetine katlanılıp katlanmadığı, 0-1 değişkeni
$v_{p,t}$	Yapay değişken

Akıllı üretim sisteminde karşılaşılan sipariş miktarı ve çizelgeleme problemi için Tam Sayılı Programlama Modeli şu şekildedir:

Minimize (en küçükle)

$$\text{Min } Z = \sum_t \sum_p \left[ u Q_{p,t} + \sum_{p':p \neq p'} \phi_{p,p'} S_{p,p',t} + h \pi_{p,t} + \alpha_p \eta_{p,t} \right] \quad (1)$$

subject to (kısıt seti altında)

$$I_{p,0} = k_p \quad \forall p \in P, \quad (2)$$

$$\eta_{p,t} \geq d_{p,t} - I_{p,t} - Q_{p,t} \quad \forall p \in P, t \in T, \quad (3)$$

$$\pi_{p,t} \geq I_{p,t} + Q_{p,t} - d_{p,t} \quad \forall p \in P, t \in T, \quad (4)$$

$$I_{p,t+1} = I_{p,t} + Q_{p,t} - d_{p,t} \quad \forall p \in P, t \in T, \quad (5)$$

$$\sum_p Q_{p,t} \leq c \quad \forall t \in T, \quad (6)$$

$$Q_{p,t} \leq c \left( \sum_{p':p \neq p'} S_{p',p,t} + Y_{p,t} \right) \quad \forall p \in P, t \in T, \quad (7)$$

$$\sum_p Y_{p,t} = 1 \quad \forall t \in T, \quad (8)$$

$$Y_{p,t} + \sum_{p':p \neq p'} S_{p',p,t} = Y_{p,t+1} + \sum_{p':p \neq p'} S_{p,p',t} \quad \forall p \in P, t \in T, \quad (9)$$

$$\sum_{p':p \neq p'} S_{p,p',t} \leq 1 \quad \forall p \in P, t \in T, \quad (10)$$

$$\sum_{p':p \neq p'} S_{p',p,t} \leq 1 \quad \forall p \in P, t \in T, \quad (11)$$

$$v_{p,t} + (S_{p,p't} |P|) - |P| + 1 \leq v_{p',t} \quad \forall p, p' \in P; p \neq p', t \in T \quad (12)$$

$$1 \leq v_{p,t} \leq |P| \quad \forall p \in P, t \in T, \quad (13)$$

$$\pi_{p,t} \geq 0 \quad \forall p \in P, t \in T, \quad (14)$$

$$\eta_{p,t} \geq 0 \quad \forall p \in P, t \in T, \quad (15)$$

$$Q_{p,t} \geq 0 \quad \forall p \in P, t \in T, \quad (16)$$

$$Y_{p,t} \in \{0,1\} \quad \forall p \in P, t \in T, \quad (17)$$

$$S_{p,p't} \in \{0,1\} \quad \forall p, p' \in P; p \neq p', t \in T, \quad (18)$$

$$v_{p,t} \geq 0 \quad \forall p \in P, t \in T. \quad (19)$$

Amaç fonksiyonu (1) üretim, hazırlık, elde bulundurma ve ceza maliyetlerinin toplamını minimize etmektedir. (2)-(5) numaralı kısıtlar envanter kararları ile ilişkilidir. (2) numaralı kısıt planlama ufkunun başında her bir üründen ne kadar mevcut olduğunu göstermektedir. (3) numaralı kısıt dönem sonunda her bir ürün için karşılanamayan ürün miktarını hesaplamaktadır. (4) numaralı kısıt dönem sonunda her bir ürün için bir sonraki döneme aktarılan ürün miktarını belirlemektedir. (5) numaralı kısıt bir sonraki döneme aktarılacak envanter miktarını hesaplamaktadır.

(6)-(7) numaralı kısıtlar kapasite ile ilişkilidir. (6) numaralı kısıt her dönem için bir tesiste üretilen toplam ürün miktarının kapasiteyi aşmasını engellemektedir. (7) numaralı kısıt ise, her dönem bir ürünün eğer tesis o ürünü üretmek için dönem başında ya da dönem içerisinde hazırlandıysa kapasite sınırının altında üretilmesini garantilemektedir.

(8)-(9) numaralı kısıtlar her dönem üretim sırasını belirlemek ile birlikte tesisin hangi ürün üretimi için hazırlık yaptığı bilgisini bir sonraki dönem aktarmaktadır. (8) numaralı kısıt tesisin her dönem başında sadece bir ürünün üretilmesi için hazırlık yapılmasını garanti altına almaktadır. (9) numaralı kısıt eğer tesis dönem başında belli bir ürünün üretilmesi veya dönem içinde başka bir üründen o ürünün üretilmesi için tekrardan hazırlanmışsa, bir sonraki dönem tesis ya en son üretilen ürünü üretme kabiliyetine sahip olur ya da aynı dönem içinde tesiste bir başka ürünün üretilmesi için hazırlık yapılmasını sağlar.

(10)-(13) numaralı kısıtlar üretim sırasının döngüsel olmasını ve böylece modelin optimal sonuçtan uzaklaşmasını engellemektedir. Burada Nemhauser ve Wolsey (1988)'in çalışmasında gezgin satıcı probleminde kullandığı aynı yöntem modele entegre edilmiştir. (14)-(19) numaralı kısıtlar ise karar değişkenlerinin üzerindeki değersel kısıtlardır.

Geleneksel üretim sisteminde karşılaşılan sipariş miktarı ve çizelgeleme problemi için tam sayılı programlama modeli temelinde akıllı üretim sistemi için önerilen modele oldukça benzemekle birlikte fazla mesai varsayımı açısından bazı değişiklikler yapılması gerekmektedir. Bu sebeple bir önceki modelin amaç fonksiyonu ve kısıtlarında şu değişiklikler yapılmalıdır.

$$\text{Min } Z = \sum_t \sum_p \left[ u Q_{p,t} + \sum_{p':p \neq p'} \phi_{p,p'} S_{p,p',t} + h \pi_{p,t} + \alpha_p \eta_{p,t} + \beta \theta_{p,t} \right] \quad (20)$$

Yeni amaç fonksiyonu (20) üretim, hazırlık, elde bulundurma, ceza ve fazla mesai üretim maliyetlerinin toplamını minimize etmektedir.

$$\eta_{p,t} \geq d_{p,t} - I_{p,t} - Q_{p,t} - \theta_{p,t} \quad \forall p \in P, t \in T, \quad (21)$$

$$\pi_{p,t} \geq I_{p,t} + Q_{p,t} - d_{p,t} \quad \forall p \in P, t \in T, \quad (22)$$

$$I_{p,t+1} = I_{p,t} + Q_{p,t} + \theta_{p,t} - d_{p,t} \quad \forall p \in P, t \in T, \quad (23)$$

(21)-(23) numaralı kısıtlar (3)-(5) envanter kısıtlarının fazla mesai ile üretilen ürün miktarının eklenmesi ile yeniden düzenlenmiş halidir. (21) numaralı kısıt dönem sonunda her bir ürün için karşılanamayan ürün miktarını hesaplamaktadır. (22) numaralı kısıt dönem sonunda her bir ürün için bir sonraki döneme aktarılan ürün miktarını belirlemektedir. (23) numaralı kısıt bir sonraki döneme aktarılacak envanter miktarını hesaplamaktadır.

$$\sum_p \theta_{p,t} \leq mc \quad \forall t \in T, \quad (24)$$

(24) numaralı kısıt her dönem fazla mesai ile üretilen toplam ürün miktarının fazla mesaiye uygulanan kapasite sınırını aşmasını engellemektedir.

$$\theta_{p,t} \leq mc \left( \sum_{p':p \neq p'} S_{p',p,t} + Y_{p,t} \right) \quad \forall p \in P, t \in T, \quad (25)$$

(25) numaralı kısıt her dönem bir fazla mesai ile üretilen ürünün eğer tesis o ürünü üretmek için dönem başında ya da dönem içerisinde hazırlandıysa fazla mesaiye uygulanan kapasite sınırının altında üretilmesini garantilemektedir.

$$\theta_{p,t} \geq 0 \quad \forall p \in P, t \in T, \quad (26)$$

(26) numaralı kısıt ise karar değişkenlerinin üzerindeki değersel kısıtlardır.

#### 4. SAYISAL ANALİZ

Bu bölümde akıllı üretim sistemi ve geleneksel üretim sistemi, üretim hedeflerindeki sapmalardan kaynaklanan kapasite değişimi ihtiyacına bağlı olarak envanter maliyetleri açısından karşılaştırılacaktır. İlk olarak, temel

bir örnek olay oluşturulmuş ve bahsedilen her iki üretim sistemi üretim hedeflerindeki sapma öncesi ve sonrası durumlar açısından karşılaştırılmıştır. Daha sonra duyarlılık analizinde, örnek olayda kullanılan toplam kapasite miktarı ve birim fazla mesai üretim maliyeti parametreleri<sup>6</sup> değiştirilerek her iki üretim sistemi, üretim hedeflerindeki sapmalardan kaynaklı envanter maliyetleri açısından karşılaştırılmıştır.

Her iki üretim sisteminde verilen üretim kararları Devingen Planlama Ufku (Rolling Horizon) varsayımı altında yapılmaktadır. Daha açık bir ifade ile talebin bilindiği belli bir sayıdaki dönem için üretim planı uygulanarak planlama ufkunda talebin bilinmediği bir sonraki döneme geçilmektedir. Süreç, planlama ufkundaki son döneme kadar devam etmektedir. Bu çalışmada bir dönem için talebin bilindiği varsayılarak üretim planlaması gerçekleştirilmiştir.

Örnek Olay ve Duyarlılık Analizinde yer alan her bir durum Benzetim Yöntemi ile analiz edilmiş ve benzetim tekrar sayısı 1000 olarak belirlenmiştir. Her bir örnek için elde edilecek optimal politikalar ve maliyetler, C++ diliyle kodlanan algoritmada IBM ILOG CPLEX 12.6 yazılımının doğrusal programlama kütüphaneleri kullanılarak bulunmuştur.

#### **4.1. Örnek Olay**

Örnek olay oluşturulurken dikkate alınan varsayımlar ve parametrelere ilişkin değerler şu şekildedir. Akıllı ve geleneksel üretim sistemlerinin her birinin 5 farklı ürünü ürettiği varsayılmıştır. Planlama ufku sekiz dönemden oluşmaktadır. Ürünlerin talepleri Poisson dağılımına sahiptir ve ortalamaları sırasıyla 80, 90, 100, 110 ve 120 birimdir. Üretim tesisleri için her iki sistemde kapasite 525 birim olarak belirlenmiştir. Planlama ufkunun başında herhangi bir ürün için stok bulunmadığı varsayılmıştır.

Her iki üretim sistemi için birim üretim maliyeti 5, birim elde bulundurma maliyeti 1, birim ceza maliyeti 15 olarak belirlenmiştir. Birim hazırlık maliyetine ilişkin bilgiler ise Çizelge 2'de yer almıştır. Geleneksel üretim sistemi için birim fazla mesai üretim maliyeti 7'dir.

Geleneksel üretim sisteminin fazla mesai ile üretebileceği ürün miktarı normal üretim kapasitesinin % 20'sine kadar çıkabilmektedir. Akıllı ve geleneksel üretim sistemlerinde yaşanan üretim hedeflerindeki sapmalarının sırasıyla  $U[0,99,1,0]$  ve  $U[0,95,1,0]$  değerleri aralığında tekdüze (uniform) dağılıma sahip olduğu varsayılmıştır.

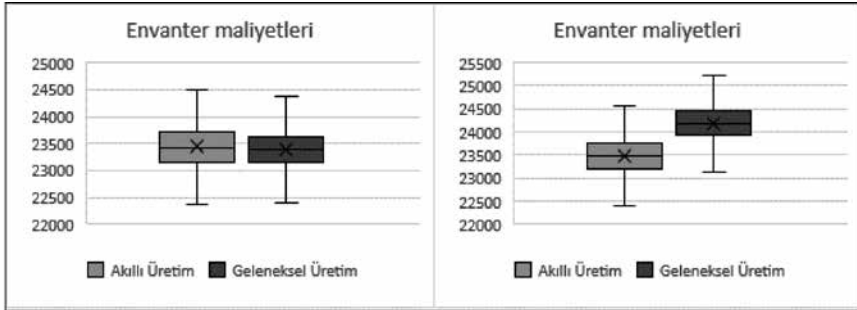
---

<sup>6</sup> Parametrelere ilişkin bilgiler ilgili bölümde verilecektir.

**Çizelge 2. Sıra Bağımlı Hazırlık Maliyetleri**

		Ürünler				
		1	2	3	4	5
Ürünler	1	-	110	121	133	146
	2	146	-	110	121	133
	3	133	146	-	110	121
	4	121	133	146	-	110
	5	11	121	133	146	-

Şekil 1a ve 1b'de akıllı üretim sistemi ve geleneksel üretim sistemlerinin Benzetim Analizi sonucunda ortaya çıkan envanter maliyetleri açısından karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 1a'ya göre üretim hedeflerinde herhangi bir sapma olmadığı varsayıldığı durumlarda her iki üretim sistemi envanter maliyetleri açısından oldukça yakın performans göstermektedir. Üretim hedeflerinde herhangi bir sapma olmaması gibi gerçek hayattaki problemlerden uzaklaştıran bir varsayım altında geleneksel üretim sisteminin değişken talep karşısında fazla mesaiyi kullanarak kapasite esnekliği daha düşük olan akıllı üretim sistemi ile benzer performansı göstermesi oldukça doğaldır. Makine arızası, çalışan kaynaklı üretim hataları, çalışanlardaki performans düşüklüğü gibi çeşitli faktörler ise üretim hedeflerinde sapmalara yol açarak her zaman için beklenen düzeyde üretim yapılamamasına ve verimlilikte düşüşe neden olabilir.



(a) Üretim hedeflerinden sapma yok.

(b) Üretim hedeflerinden sapma var.

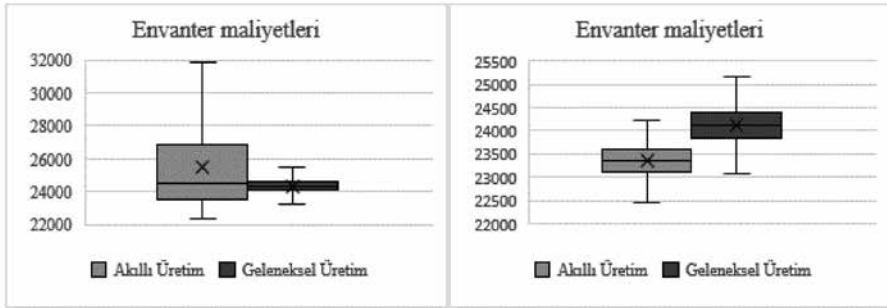
**Şekil 1. Akıllı ve Geleneksel Üretim Sistemlerinin Üretim Hedeflerinden Sapma Durumuna Göre Envanter Maliyetleri Açısından Karşılaştırılması**

Diğer yandan, üretim hedeflerindeki sapma durumu dikkate alındığında akıllı üretim sistemi geleneksel üretim sistemine göre daha düşük envanter maliyetlerine katlanarak faaliyetlerini sürdürebilmektedir (Şekil 1b). Akıllı üretim sistemi ile geleneksel üretim sisteminin ortalama envanter

maliyetleri arasında % 2'lik bir fark bulunmaktadır. Akıllı üretim sisteminin tam otomasyona sahip üretim araçlarından faydalanarak yüksek düzeyde verimlilik sağladığı göz önünde bulundurulduğunda, üretim hedeflerindeki sapmanın geleneksel üretim sistemine göre düşük olması envanter maliyetlerini pozitif yönde etkilemektedir.

#### 4.2. Duyarlılık Analizi

Duyarlılık Analizinde, örnek olaydaki toplam kapasite miktarı ve birim fazla mesai üretim maliyeti parametrelerinde yaşanan değişimlerin her iki üretim sisteminin envanter maliyeti performanslarını ne yönde etkilediği tespit edilmeye çalışılmıştır. Toplam kapasite miktarının 500 ve 550 birim, birim fazla mesai üretim maliyetleri değerleri 5,5 ve 10 olduğu durumlar incelenmiştir.



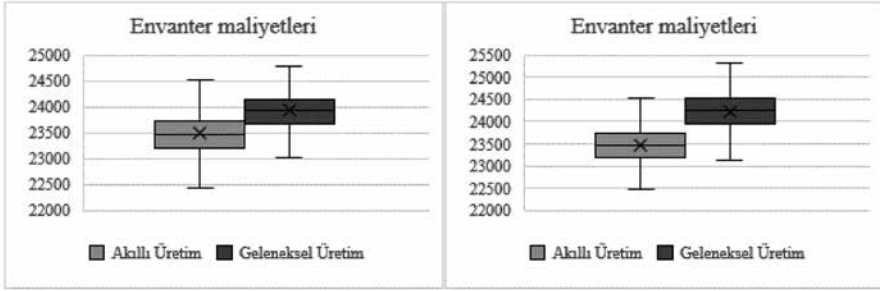
(a) Toplam kapasite 500 birim

(b) Toplam kapasite 550 birim

#### Şekil 2. Akıllı ve Geleneksel Üretim Sistemlerinin Envanter Maliyetlerinin Toplam Kapasite Açısından Karşılaştırılması

Şekil 2a akıllı ve geleneksel üretim sistemlerinin toplam kapasitenin 500 birim olduğu durumdaki envanter maliyetleri açısından karşılaştırmasını göstermektedir. Sonuca göre, kapasite miktarının tüm ürünlere olan toplam talep ortalamasına eşit belirlendiğinde akıllı üretim sistemi geleneksel üretim sistemine göre envanter maliyetleri açısından daha düşük performans göstermektedir. Geleneksel üretim sisteminin akıllı üretim sistemine göre % 4'lük bir envanter maliyeti avantajı mevcuttur. Bunun arkasındaki temel neden, akıllı üretim sisteminde kapasite artışına gidilme imkânı olmadığı için birçok dönemde toplam talep miktarının karşılanamaması ve karşılanamayan talepler yüzünden yüksek miktarda ceza maliyetine katlanılacak olmasıdır. Geleneksel üretim sistemi ise, normal üretim kapasitesinin yetersiz kaldığı durumlarda akıllı üretim sisteminin karşılamakta zorluk yaşadığı yüksek talep miktarlarını fazla mesai üretimi yoluyla karşılayabilmektedir.

Şekil 2b akıllı ve geleneksel üretim sistemlerinin toplam kapasitenin 550 birim olduğu durumdaki envanter maliyetleri açısından karşılaştırmasını göstermektedir. Kapasite miktarının ürünlere olan toplam talep ortalamasından yüksek olduğu durumda akıllı üretim sisteminin geleneksel üretim sistemine göre daha yüksek bir performans ortaya koymaktadır. Akıllı üretim sisteminin geleneksel üretim sistemine göre % 3'lük bir envanter maliyeti avantajı mevcuttur. Burada kapasite miktarındaki artışın akıllı üretim sisteminin envanter maliyeti performansı açısından olumlu yöndeki katkısı gözlemlenmektedir. Akıllı üretim sistemlerinde kapasite esnekliği düşük ve kapasite arttırmaya yönelik yatırımlar yüksek olduğu için talepleri karşılayabilecek doğru miktardaki kapasitenin belirlenmesi oldukça önemlidir. Akıllı üretim sistemlerindeki tam otomasyona sahip üretim araçları ile verimlilikteki artıştan sağlanacak faydanın derecesi doğru kapasite belirlenmesi ile yakından ilişkilidir.



(a) Birim fazla mesai üretim maliyeti: 5,5 (b) Birim fazla mesai üretim maliyeti: 10

### Şekil 3. Akıllı ve Geleneksel Üretim Sistemlerinin Envanter Maliyetlerinin Birim Fazla Mesai Üretim Maliyeti Açısından Karşılaştırılması

Akıllı ve geleneksel üretim sistemlerinin birim fazla mesai üretim maliyetinin 5,5 olduğu durumdaki envanter maliyetleri açısından karşılaştırması Şekil 3a'da gösterilmektedir. Birim fazla mesai üretim maliyetinin birim üretim maliyetine oldukça yaklaştığı bir durumda akıllı üretim sisteminin geleneksel üretim sisteme göre % 1'lik bir envanter maliyeti avantajı bulunmaktadır. Akıllı ve geleneksel üretim sistemlerinin birim fazla mesai üretim maliyetinin 10 olduğu durumdaki envanter maliyetleri açısından karşılaştırması Şekil 3b'de gösterilmektedir. Birim fazla mesai üretim maliyetinin arttığı durumda, akıllı üretim sisteminin geleneksel üretim sisteme göre % 3'lük bir envanter maliyeti avantajı bulunmaktadır.

Bu sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda geleneksel üretim sisteminin envanter maliyetleri açısından performansı birim fazla mesai üretim maliyetindeki değişimden ciddi derecede etkilenmemektedir. Geleneksel üretim sistemi düşük verimlilikte çalışıp üretimdeki kayıpları daha yüksek

olduğundan dolayı, ancak birim fazla mesai üretim maliyeti çok düşük olursa akıllı üretim sistemine göre maliyet açısından yakın performans gösterebilmektedir.

## 5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışma Endüstri 4.0 teknolojilerini içeren akıllı üretim sistemi ile geleneksel üretim sisteminde karşılaşılan sipariş miktarı ve çizelgeleme probleminin çözümü için Matematiksel Modeller önermektedir. Bahsedilen Sayısal Modeller kullanılarak çeşitli nedenlerden dolayı üretim hedeflerinde yaşanan sapmalardan kaynaklanan kapasite değişimi ihtiyacına bağlı olarak envanter maliyetleri açısından hangi durumlarda akıllı üretim sisteminin geleneksel üretim sistemine göre avantajlı ve dezavantajlı olduğu araştırılmıştır.

Akıllı üretim ve geleneksel üretim sistemlerinin, envanter maliyet performansları, Örnek Olay ve Duyarlılık Analizi için oluşturulan senaryolar üzerinden incelenmiştir. Örnek olaydan elde edilen sonuçlara göre, üretim hedeflerinde herhangi bir sapma olmadığı varsayımı altında her iki üretim sisteminin envanter maliyetleri açısından performansı birbirine yakın gözükmektedir. Diğer yandan, akıllı üretim sisteminde ileri düzeyde teknolojinin bulunması sebebiyle üretim hedeflerinden sapma geleneksel üretim sistemine göre daha düşük olduğu için akıllı üretim sistemi lehine % 2'lik bir maliyet avantajı gerçekleşmektedir.

Duyarlılık Analizinde ise her iki sistem toplam kapasite miktarı ve birim fazla mesai üretim maliyetleri farklılaştırılarak envanter maliyetleri açısından karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlara göre, düşük kapasite esnekliğinden dolayı akıllı üretim sistemi, kapasite miktarına yakın talepleri karşılamakta güçlük çektiği için yüksek ceza maliyetlerine katlanmak zorunda kalmaktadır. Geleneksel üretim sistemi ise, yüksek talepleri fazla mesai üretim sayesinde karşılayarak bu ceza maliyetlerine katlanmak durumunda kalmamaktadır. Kapasite miktarının talep ortalamalarının üzerinde olması durumunda ise, akıllı üretim sisteminin verimli olmasından kaynaklı maliyet avantajı geleneksel üretim sistemine göre net bir şekilde gözlemlenmektedir. Birim fazla mesai üretim maliyetinin normal üretim maliyetine çok yakın olması geleneksel üretim sisteminin envanter maliyeti performansını akıllı üretim sistemine yaklaştırırsa da, akıllı üretim sisteminin verimli olmasının sağladığı maliyet avantajına ulaşamamaktadır.

Bu çalışma sonucunda, akıllı üretim sisteminde ileri düzeyde teknolojinin bulunması ve insan faktörünün sifıra yakın düzeye indirgenmesi ilk yatırım miktarını artırmakla ve düşük kapasite esnekliğine sebep vermekle birlikte,



üretim sisteminde elde edilen yüksek düzeyde verimliliğin dikkate değer bir maliyet avantajı sağladığı ortaya çıkmıştır. Geleneksel üretim sisteminde ise, fazla mesai yoluyla yüksek talep karşısında kapasitenin artırılması daha kolay olsa da, doğru kapasite belirlendiği takdirde akıllı üretim sistemlerinin ileri düzeyde otomasyon sayesinde üretimde yüksek verimliliğe sahip olması envanter maliyetlerinde dikkate değer düşümlere sebep olmaktadır.

İleriki çalışmalarda Endüstri 4.0 içerisinde yer alan teknolojilerin entegre edildiği akıllı üretim sistemlerinde farklı karar destek sistemlerinin incelenmesi literatüre önemli katkılar sağlayacaktır. Mevcut problemin stokastik talep varsayımı altında incelenmesi gelecek çalışmalarda dikkate alınabilir.

## KAYNAKÇA

- ALMADA-LOBO, B., KLABJAN, D., ANTÓNIA CARRAVILLA, M. & OLIVEIRA, J. F., (2007), **Single machine multi-product capacitated lot sizing with sequence-dependent setups**, *International Journal of Production Research*, 45 (20), 4873-4894.
- ALMADA-LOBO, B., KLABJAN, D., CARRAVILLA, M. A. & OLIVEIRA, J. F., (2010), **Multiple machine continuous setup lotsizing with sequence-dependent setups**, *Computational Optimization and Applications*, 47 (3), 529-552.
- BRETTEL, M., FRIEDERICHSEN, N., KELLER, M., & ROSENBERG, M., (2014), **How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 Perspective**, *International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering*, 8 (1), 37-44.
- DREXL, A. & KIMMS, A., (1997), **Lot sizing and scheduling - Survey and extensions**, *European Journal of Operational Research*, 99 (2), 221-235.
- FLEISCHMANN, B., (1990), **The discrete lot-sizing and scheduling problem**, *European Journal of Operational Research*, 44 (3), 337-348.
- FLEISCHMANN, B., (1994), **The discrete lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent setup costs**, *European Journal of Operational Research*, 75 (2), 395-404.
- GUPTA, D. & MAGNUSSON, T., (2005), **The capacitated lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent setup costs and setup times**, *Computers & Operations Research*, 32 (4), 727-747.
- HAASE, K., (1994), **Lot-sizing and scheduling for production planning**, Springer, Berlin.
- HAASE, K., (1996), **Capacitated lot-sizing with sequence dependent setup costs**, *Operations-Research-Spektrum*, 18 (1), 51-59.
- HAASE, K. & KIMMS, A., (2000), **Lot sizing and scheduling with sequence-dependent setup costs and times and efficient rescheduling opportunities**, *International Journal of Production Economics*, 66 (2), 159-169.
- INDUSTRY 4.0: DEFINITION, **Design Principles, Challenges and the Future of Employment**, <https://www.cleverism.com/industry-4-0/>, Erişim Tarihi: 29.08.2018.
- JÄNICKE, M. & JACOB, K., (2009), **A Third Industrial Revolution? Solutions to the crisis of resource-intensive growth**, Forschungsstelle Für Umweltpolitik, Report.
- KAGERMANN, H., HELBIG, J., HELLINGER, A. & WAHLSTER, W., (2013), **Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry; final report of the Industrie 4.0 Working Group**, Forschungsunion.
- NEMHAUSER, G. L. & WOLSEY, L. A., (1988), **Integer and combinatorial optimization**, Interscience series in discrete mathematics and optimization, New Jersey: John Wiley & Sons.

- PAMUK, N. S. & SOYSAL, M., (2018), **Yeni Sanayi Devrimi Endüstri 4.0 Üzerine Bir İnceleme**, Verimlilik Dergisi, 1, 41-66.
- RÜßMANN, M., LORENZ, M., GERBERT, P., WALDNER, M., JUSTUS, J., ENGEL, P. & HARNISCH, M., (2015), **Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries**, Boston Consulting Group, 9.
- SMUNT, T. L. & MEREDITH, J., (2000), **A comparison of direct cost savings between flexible automation and labor with learning**, *Production and Operations Management*, 9 (2), 158-170.
- STEVENSON, W. J., (2015), **Operations Management**, McGraw Hill, New York.
- VUKSANOVIC, D., UGARAK, J. & KORČOK, D., (2016), **Industry 4.0: The future concepts and new visions of factory of the future development**, Conference Sinteza 2016.
- YIN, Y., STECKE, K. E. & LI, D., (2018), **The evolution of production systems from Industry 2.0 through Industry 4.0**, *International Journal of Production Research*, 56 (1-2), 848-861.
- ZHENG, P., WANG, H., SANG, Z., ZHONG, R. Y., LIU, Y., LIU, C., MUBAROK, K., YU, S. & XU, X., (2018), **Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios and future perspectives**, *Frontiers of Mechanical Engineering*, 1-14.
- ZHU, X. & WILHELM, W. E., (2006), **Scheduling and lot sizing with sequence-dependent setup: A literature review**, *IIE transactions*, 38 (11), 987-1007.