

VERİMLİLİK DERGİSİ



T.C. SANAYİ VE
TEKNOLOJİ BAKANLIĞI

2022 | Dijital Dönüşüm ve Verimlilik Özel Sayısı

EVALUATION OF THE TRANSITIONS POTENTIAL TO CYBER-PHYSICAL PRODUCTION SYSTEM OF HEAVY INDUSTRIES IN TURKEY WITH A NOVEL DECISION-MAKING APPROACH BASED ON BONFERRONI FUNCTION

Ömer Faruk GÖRÇÜN, Hande KÜÇÜKÖNDER

DİJİTAL OLGUNLUK İNDEKSİ: ORGANİZASYONLARIN DİJİTAL DÖNÜŞÜM YOLCULUĞUNDA VERİMLİLİĞİ ARTIRMAK İÇİN BİR KANTİTATİF YÖNTEM

Umut ŞENER, Ebru GÖKALP, Pekin Erhan EREN

SÜRDÜRÜLEBİLİR KALKINMA ODAKLI DİJİTALLEŞME BELİRLEYİCİLERİNİN VERİMLİLİK ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN YAPAY SİNİR AĞLARI İLE SINIFLANDIRILMASI

Senem DEMİRKIRAN, Ayça BEYOĞLU, Mehmet Kenan TERZİOĞLU, Aysu YAŞAR

KESTİRİMCİ BAKIM PLANLAMA İÇİN MAKİNE ÖĞRENMESİ TEMELLİ BİR KARAR DESTEK SİSTEMİ VE BİR UYGULAMA

Banu SOYLU, Hatice YİĞİTER, Venüs SARIKAYA, Zinnet SANDIKÇI, Asena UTKU

RELATIONSHIP BETWEEN PRODUCTIVITY AND DIGITALIZATION WITH TOBIT MODEL BASED ON MALMQUIST INDEX

Eda BOZKURT, Özlem TOPÇUOĞLU, Ali ALTINER

PREDICTION OF HIGH CYCLE TIMES IN WHEEL RIM MOLDING WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

İnanç KABASAKAL, Fatma DEMİRCAN KESKİN

RADYO FREKANSI TANIMLAMA (RFID) TEKNOLOJİSİNİN TEDARİK ZİNCİRİ PERFORMANSINA ETKİLERİ LOJİSTİK ENDÜSTRİSİNDE BİR VAKA ÇALIŞMASI

Gözde YANGINLAR, Cihat KÖKSAL

ÜRETİM SİSTEMLERİNDEKİ DİJİTAL DÖNÜŞÜMÜN İŞ ETÜDÜ TEKNİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Aylin ADEM, Burcu YILMAZ KAYA, Erman ÇAKIT, Metin DAĞDEVİREN

TÜRKİYE'DEKİ BAKIM YÖNETİM VE KESTİRİMCİ BAKIM BİLİŞİM SİSTEMLERİNİN FİRMALARA ÖZGÜ DURUMLARI ÜZERİNE BİR SAHA ARAŞTIRMASI

Arafat Salih AYDINER, Burak KUBİLAY

MEASURING FIRM PERCEPTION TO ADAPTATION OF INDUSTRY 4.0: THE CASE OF TURKEY

Ebru AŞAR, Filiz BÜLBÜL, Mansur AKBULUT, Pınar BAYARSLAN, Tunahan KERMEN, Derya FINDIK

KONFEKSİYONDA DİJİTAL NUMUNE İLE FİZİKSEL NUMUNE ÜRETİM SÜREÇLERİNİN VERİMLİLİK VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK AÇISINDAN KARŞILAŞTIRILMASI

Derya TATMAN, Ali Serkan SOYDAN, Buse GÜMÜŞ

SANAYİ İŞLETMELERİNİN TEDARİK ZİNCİRİ FONKSİYONLARININ DİJİTAL DÖNÜŞÜMÜ

Çiler ÇALLI, Didem ÖZER ÇAYLAN

İŞLETMELER İÇİN YENİ BİR VERİMLİLİK TEKNOLOJİSİ: DİJİTAL İKİZ

Meral ÇALIŞ DUMAN

ENDÜSTRİ 4.0 VE VERİMLİLİK: TÜRK BEYAZ EŞYA SEKTÖRÜNDE KEŞFEDİCİ DURUM ÇALIŞMASI

Kübra ŞİMŞEK DEMİRBAĞ, Nihal YILDIRIM

HAVACILIKTA DİJİTALLEŞME VE VERİMLİLİK İLİŞKİSİ ÜZERİNE BİR İÇERİK ANALİZİ

Volkan YAVAŞ

YAPI ENDÜSTRİSİNDEKİ ÜRETİM BAŞARISININ SORGULANMASI: YENİLEŞİM, OTOMASYON, DİJİTAL DÖNÜŞÜM

Seçkin KORALAY, Fahriye Hilal HALICIOĞLU

JOURNAL OF PRODUCTIVITY



VERİMLİLİK DERGİSİ

Journal of Productivity

T.C. SANAYİ VE TEKNOLOJİ BAKANLIĞI

Stratejik Araştırmalar ve Verimlilik Genel
Müdürlüğü'nün Yayınıdır

ISSN: 1013-1388 e-ISSN: 2757-6973

Yıl: 2022 Sayı: Özel Sayı

Yayın Türü
Yerel-Süreli / Türkçe-İngilizce

Sahibi
T.C. SANAYİ VE TEKNOLOJİ BAKANLIĞI
STRATEJİK ARAŞTIRMALAR VE VERİMLİLİK GENEL MÜDÜRLÜĞÜ
adına

Genel Müdür
Prof. Dr. İlker Murat AR

Özel Sayı Editörleri
Doç. Dr. Önder BELGİN
Dr. M.Hürol METE

Genel Koordinatör
Dr. Cangül TOSUN

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü
Lutfiye DAĞLIOĞLU

İngilizce Redaksiyon
Şirin Müge KAVUNCU - Gülçin MANZAK AYDIN

Grafik Tasarım ve Uygulama
Burcu ÖZŞİMŞEK

DergiPark Yöneticisi
Aytunç AYHAN

Yönetim Yeri
T.C. SANAYİ VE TEKNOLOJİ BAKANLIĞI
STRATEJİK ARAŞTIRMALAR VE VERİMLİLİK GENEL MÜDÜRLÜĞÜ

Adres: Mustafa Kemal Mahallesi Dumlupınar Bulvarı
(Eskişehir Yolu 7. Km) 2151. Cadde No: 154
Çankaya 06510 ANKARA

Tel: 0 312 201 65 02 <https://www.sanayi.gov.tr>
savgm@sanayi.gov.tr
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/verimlilik>

Baskı Yeri
Elma Teknik Basım Matbaacılık
Adres: İvedik OSB Matbaacılar Sitesi 1516/1 Sk. No: 35
Yenimahalle 06378 ANKARA
Tel: 0.312. 229 92 65 - Fax: 0.312. 231 67 06 elma@elmateknikbasim.com.tr

Baskı Tarihi
12.01.2022

Dergi üç ayda bir olmak üzere yılda dört kez yayımlanır.

YAYIN KURULU / EDITORIAL BOARD

Doç. Dr. Önder BELGİN - Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı
Dr. Cangül TOSUN - Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı
Dr. Cihan YALÇIN - Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı
Dr. Emel KURTARAN ERSAL - Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı
Dr. M. Hürol METE - Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı
Dr. Seda CANSIZ - Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı
Dr. Serdal ERGÜN - Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı
Dr. Sinan BORLUK - Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı
Dr. Şakir KARAKAYA - Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı
Dr. Yücel ÖZKARA - Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı

DANIŞMA KURULU / ADVISORY BOARD

Prof. Dr. Adil BAYKASOĞLU - Dokuz Eylül Üniversitesi
Prof. Dr. Ahmet Cevat ACAR - İstanbul Üniversitesi
Prof. Dr. Ali SINAĞ - Ankara Üniversitesi
Prof. Dr. Birdoğan BAKI - Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Cengiz KAHRAMAN - İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Cevahir UZKURT - Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi
Prof. Dr. Dirk CZARNITZKI - KU Leuven University
Prof. Dr. Ekrem TATOĞLU - İbn Haldun Üniversitesi
Prof. Dr. Fatih KESKİN - Ankara Üniversitesi
Prof. Dr. Fazıl GÖKGÖZ - Ankara Üniversitesi
Prof. Dr. Halit KESKİN - Yıldız Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. İsmail EROL - Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi
Prof. Dr. İ. Melih BAŞ - İstanbul Arel Üniversitesi
Prof. Dr. Mahmut TEKİN - Selçuk Üniversitesi
Prof. Dr. Marina DABIC - University of Zagreb & Nottingham Trent University
Prof. Dr. Metin DAĞDEVİREN - Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Mike DILLON - World Confederation of Productivity Science
Prof. Dr. Mine ÖMÜRGÖNÜLŞEN - Hacettepe Üniversitesi
Prof. Dr. Muammer ZERENLER - Selçuk Üniversitesi
Prof. Dr. Mustafa Zihni TUNCA - Süleyman Demirel Üniversitesi
Prof. Dr. Necati ARAS - Boğaziçi Üniversitesi
Prof. Dr. Özlem ATAY - Ankara Üniversitesi
Prof. Dr. Ramazan AKTAŞ - TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Prof. Dr. Selçuk ÇEBİ - Yıldız Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Selçuk PERÇİN - Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Serpil EROL - Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Süphan NASIR - İstanbul Üniversitesi
Prof. Dr. Türkay DERELİ - Hasan Kalyoncu Üniversitesi
Doç. Dr. İskender PEKER - Gümüşhane Üniversitesi
Dr. Kamran MOOSA - PIQC Institute of Quality

Verimlilik Dergisi'nde yayımlanan yazılarda belirtilen görüşler yazarlarına aittir. Dergide yayımlanan yazılardan, Verimlilik Dergisi'nin adı ve sayısı anılarak alıntı yapılabilir.

Verimlilik Dergisi'nin her sayısının, PDF formatında düzenli bir şekilde e-posta adresinize gönderilmesini istiyorsanız, konu alanına "Verimlilik Dergisi" yazarak savgm@sanayi.gov.tr adresine e-posta gönderebilirsiniz.

Verimlilikle ilgili tüm disiplinlerden gelecek makalelere açık olan Verimlilik Dergisi, 2004 yılından itibaren "Hakemli Dergi" statüsü ile yayımlanmaya başlamıştır. Verimlilik Dergisi, 2008 yılından bu yana TÜBİTAK TR Dizin Sosyal ve Beşeri Bilimler Veri Tabanı'nda taranmaktadır. Verimlilik Dergisi'nde yayınlanması istenen çalışmalara ilişkin süreç yönetimi, TÜBİTAK ULAKBİM DergiPark aracılığıyla yürütülmektedir.

TÜBİTAK

DergiPark
AKADEMİK

EBSCO
HOST

İÇİNDEKİLER

- 1**
16
EVALUATION OF THE TRANSITIONS POTENTIAL TO CYBER-PHYSICAL PRODUCTION SYSTEM OF HEAVY INDUSTRIES IN TURKEY WITH A NOVEL DECISION-MAKING APPROACH BASED ON BONFERRONI FUNCTION
TÜRKİYE'DE AĞIR SANAYİ ENDÜSTRİLERİNİN SİBER-FİZİKSEL ÜRETİM SİSTEMLERİNE GEÇİŞ POTANSİYELLERİNİN YENİ BİR BONFERRONİ FONKSİYONU TEMELLİ KARAR VERME YAKLAŞIMI ile DEĞERLENDİRİLMESİ
Ömer Faruk GÖRÇÜN, Hande KÜÇÜKÖNDER
- 17**
29
DİJİTAL OLGUNLUK İNDEKSİ: ORGANİZASYONLARIN DİJİTAL DÖNÜŞÜM YOLCULUĞUNDA VERİMLİLİĞİ ARTIRMAK İÇİN BİR KANTİTATİF YÖNTEM
DIGITAL MATURITY INDEX: A QUANTITATIVE METHOD TO INCREASE EFFICIENCY IN ORGANIZATIONS' DIGITAL TRANSFORMATION JOURNEY
Umut ŞENER, Ebru GÖKALP, Pekin Erhan EREN
- 30**
47
SÜRDÜRÜLEBİLİR KALKINMA ODAKLI DİJİTALLEŞME BELİRLEYİCİLERİNİN VERİMLİLİK ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN YAPAY SINIR AĞLARI İLE SINIFLANDIRILMASI
CLASSIFICATION THE EFFECTS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT ORIENTED DIGITIZATION DETERMINANTS ON PRODUCTIVITY USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS
Senem DEMİRKIRAN, Ayça BEYOĞLU, Mehmet Kenan TERZİOĞLU, Aysu YAŞAR
- 48**
66
KESTİRİMCİ BAKIM PLANLAMA İÇİN MAKİNE ÖĞRENMESİ TEMELLİ BİR KARAR DESTEK SİSTEMİ VE BİR UYGULAMA
A MACHINE LEARNING-BASED DECISION SUPPORT SYSTEM FOR PREDICTIVE MAINTENANCE PLANNING AND AN APPLICATION
Banu SOYLU, Hatice YİĞİTER, Venüs SARIKAYA, Zinnet SANDIKÇI, Asena UTKU
- 67**
78
RELATIONSHIP BETWEEN PRODUCTIVITY AND DIGITALIZATION WITH TOBIT MODEL BASED ON MALMQUIST INDEX
MALMQUIST ENDEKSE DAYALI TOBIT MODEL İLE VERİMLİLİK VE DİJİTALLEŞME İLİŞKİSİ
Eda BOZKURT, Özlem TOPÇUOĞLU, Ali ALTINER
- 79**
90
PREDICTION OF HIGH CYCLE TIMES IN WHEEL RIM MOLDING WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS
JANT DÖKÜMÜNDE YAPAY SINIR AĞLARI İLE YÜKSEK ÇEVİRİM SÜRELERİNİN TAHMİN EDİLMESİ
İnanç KABASAKAL, Fatma DEMİRCAN KESKİN
- 91**
108
RADYO FREKANSI TANIMLAMA (RFID) TEKNOLOJİSİNİN TEDARİK ZİNCİRİ PERFORMANSINA ETKİLERİ LOJİSTİK ENDÜSTRİSİNDE BİR VAKA ÇALIŞMASI
THE EFFECTS OF RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION (RFID) TECHNOLOGY ON SUPPLY CHAIN PERFORMANCE: A CASE STUDY IN LOGISTICS INDUSTRY
Gözde YANGINLAR, Cihat KÖKSAL
- 109**
121
ÜRETİM SİSTEMLERİNDEKİ DİJİTAL DÖNÜŞÜMÜN İŞ ETÜDÜ TEKNİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ
THE IMPACT OF DIGITAL TRANSFORMATION IN MANUFACTURING SYSTEMS ON WORK-STUDY TECHNIQUES
Aylin ADEM, Burcu YILMAZ KAYA, Erman ÇAKIT, Metin DAĞDEVİREN
- 122**
139
TÜRKİYE'DEKİ BAKIM YÖNETİM VE KESTİRİMCİ BAKIM BİLİŞİM SİSTEMLERİNİN FİRMALARA ÖZGÜ DURUMLARI ÜZERİNE BİR SAHA ARAŞTIRMASI
A FIELD RESEARCH ON THE COMPANY'S SPECIFIC CONDITIONS OF MAINTENANCE MANAGEMENT AND PREDICTIVE MAINTENANCE INFORMATION SYSTEMS IN TURKEY
Arafat Salih AYDINER, Burak KUBİLAY
- 140**
154
MEASURING FIRM PERCEPTION TO ADAPTATION OF INDUSTRY 4.0: THE CASE OF TURKEY
ENDÜSTRİ 4.0'İN ADAPTASYONUNA YÖNELİK FIRMA ALGISİNİN ÖLÇÜLMESİ: TÜRKİYE ÖRNEĞİ
Ebru AŞAR, Filiz BÜLBÜL, Mansur AKBULUT, Pınar BAYARSLAN, Tunahan KERMEN, Derya FINDIK
- 155**
170
KONFEKSİYONDA DİJİTAL NUMUNE İLE FİZİKSEL NUMUNE ÜRETİM SÜREÇLERİNİN VERİMLİLİK VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK AÇISINDAN KARŞILAŞTIRILMASI
COMPARISON OF DIGITAL SAMPLE AND PHYSICAL SAMPLE PRODUCTION PROCESSES IN APPAREL IN TERMS OF PRODUCTIVITY AND SUSTAINABILITY
Derya TATMAN, Ali Serkan SOYDAN, Buse GÜMÜŞ
- 171**
187
SANAYİ İŞLETMELERİNİN TEDARİK ZİNCİRİ FONKSİYONLARININ DİJİTAL DÖNÜŞÜMÜ
DIGITAL TRANSFORMATION OF SUPPLY CHAIN FUNCTIONS OF INDUSTRIAL ENTERPRISES
Çiler ÇALLI, Didem ÖZER ÇAYLAN
- 188**
205
İŞLETMELER İÇİN YENİ BİR VERİMLİLİK TEKNOLOJİSİ: DİJİTAL İKİZ
A NEW PRODUCTIVITY TECHNOLOGY FOR BUSINESS: DIGITAL TWIN
Meral ÇALIŞ DUMAN
- 206**
223
ENDÜSTRİ 4.0 VE VERİMLİLİK: TÜRK BEYAZ EŞYA SEKTÖRÜNDE KEŞFEDİCİ DURUM ÇALIŞMASI
INDUSTRY 4.0 AND PRODUCTIVITY: EXPLORATORY CASE STUDY IN TURKISH WHITE GOODS INDUSTRY
Kübra ŞİMŞEK DEMİRBAĞ, Nihal YILDIRIM
- 224**
236
HAVACILIKTA DİJİTALLEŞME VE VERİMLİLİK İLİŞKİSİ ÜZERİNE BİR İÇERİK ANALİZİ
A CONTENT ANALYSIS ON THE RELATIONSHIP BETWEEN DIGITALIZATION AND PRODUCTIVITY IN AVIATION
Volkan YAVAŞ
- 237**
256
YAPI ENDÜSTRİSİNDEKİ ÜRETİM BAŞARISININ SORGULANMASI: YENİLEŞİM, OTOMASYON, DİJİTAL DÖNÜŞÜM
QUESTIONING THE PRODUCTION SUCCESS IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY: INNOVATION, AUTOMATION, DIGITAL TRANSFORMATION
Seçkin KORALAY, Fahriye Hilal HALICIOĞLU

EVALUATION OF THE TRANSITIONS POTENTIAL TO CYBER-PHYSICAL PRODUCTION SYSTEM OF HEAVY INDUSTRIES IN TURKEY WITH A NOVEL DECISION-MAKING APPROACH BASED ON BONFERRONI FUNCTION

Ömer Faruk GÖRÇÜN¹, Hande KÜÇÜKÖNDER²

ABSTRACT

Purpose: This study examines the potential of production systems of the heavy industry branches with the help of cyber-physical systems. Sources of public and private sectors may not be sufficient to transform and develop all heavy industry branches simultaneously. Because of that, policymakers can determine priority industries for development and growth, which are sustainable and balanced in a country.

Methodology: In current study, the proposed approach uses the LMAW (Logarithm Methodology of Additive Weights) technique to identify priority sectors. The LMAW is a novel MCDM (Multi-Criteria Decision Making) technique providing an opportunity to evaluate both objective and subjective criteria; in addition, it uses the Bonferroni functions to transform the subjective evaluations of decision-makers to the group decision.

Findings: It has been observed that the most significant criterion is overall equipment effectiveness (OEE), and the most prior branch of heavy industry is the aerospace industry.

Originality: This paper examines the transformation process of the heavy industry branches to the cyber-physical systems by using a new MCDM approach.

Keywords: Heavy Industries, LMAW, Bonferroni Function, Multicriteria Group Decision-Making, Cyber-Physical Systems.

JEL Codes: D2, C44, D81, E23.

TÜRKİYE'DE AĞIR SANAYİ ENDÜSTRİLERİNİN SİBER-FİZİKSEL ÜRETİM SİSTEMLERİNE GEÇİŞ POTANSİYELLERİNİN YENİ BİR BONFERRONİ FONKSİYONU TEMELLİ KARAR VERME YAKLAŞIMI İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

Amaç: Bu çalışma ağır sanayi alt sektörlerinin üretim sistemlerinin siber-fiziksel sistemler yardımıyla dönüştürebilme potansiyellerini incelemektedir. Birçok ülkede kamu ve özel sektör kaynakları, bütün ağır sanayi endüstrilerinin eş zamanlı olarak geliştirilmesi ve dönüştürülmesi için yeterli olamayabilmektedir. Bu nedenle politika yapıcılar dengeli ve sürdürülebilir bir gelişim ve kalkınma yaratabilmek için öncelikli sektörler belirleyebilirler.

Yöntem: Mevcut çalışmada önerilen yaklaşım, öncelikli sektörlerin belirlenmesi için LMAW (Logarithm Methodology of Additive Weights) tekniğinden yararlanmaktadır. LMAW tekniği hem nicel hem de nitel kriterlerin birlikte değerlendirilmesine imkân tanıyan aynı zamanda karar vericilerin öznel değerlendirmelerinin grup kararına dönüştürülmesinde Bonferroni fonksiyonunu temel alan çok kriterli karar verme (ÇKKV) yaklaşımlarından birisidir.

Bulgular: LMAW tekniğinin uygulanması sonucunda çalışmada en etkili değerlendirme kriterinin genel ekipman verimliliği olduğu ve ilk sırada Havacılık ve Uzay Sanayi Endüstrisinin yer aldığı gözlemlenmiştir.

Özgünlük: Bu çalışma ağır sanayi alt sektörlerinin siber fiziksel sistemlere geçiş sürecini yeni bir ÇKKV yaklaşımı kullanılarak incelemektedir.

Anahtar Kelimeler: Ağır Sanayi, LMAW, Bonferroni Fonksiyonu, Çok Kriterli Grup Karar Verme, Siber-Fiziksel Sistemler.

JEL Kodları: D2, C44, D81, E23.

¹ Assoc. Prof., Kadir Has University, Faculty of Economics, Department of Business Administration, Istanbul, Turkey, omer.gorcun@khas.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3850-6755 (Corresponding Author).

² Asst. Prof., Bartın University, Faculty of Economics and Administration, Department of Numerical Methods, Bartın, Turkey, hkucukonder@bartin.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0853-8185.

1. INTRODUCTION

Heavy industry is a field of business with highly complicated production and supply chain processes, which requires high investment costs and heavy machines, equipment, and extensive facilities to make production. The heavy industry includes aerospace, shipbuilding, mining, machine tool building, locomotive manufacturing, oil and gas, steel production, chemical production, and large buildings and infrastructure (CFI, 2021). Also, heavy industry is an upstream industry, which means that high energy consumption is a significant feature of the heavy industry (Lin and Liu, 2016). Hence, large-scale private companies or public institutes mostly conduct these activities due to high investment and operational costs. Heavy industrial enterprises are primarily companies, which are active at a high capacity. In addition, their target customers are different industries or public authorities instead of a broad consumer mass consisting of individuals and small enterprises. For instance, a company active in aerospace and manufactures commercial planes does not expect to take orders from all individuals.

From this perspective, heavy industrial enterprises have high investment and operational risks. On the other hand, they provide contributions to the development and growth of countries on a vast scale. Therefore, successfully installing and operating these industries depends on detailed planning processes, which carry out from a rational perspective. In addition, Industry 4.0, we are in, has started to suppress the heavy industrial enterprises and all other industries and businesses for keeping pace with this most incredible transformation process. As a condition for surviving in the highly competitive and struggling business environment, it is crucial to carry out business activities with the highest quality and logistics speed and lowest operational costs. Hence, using instruments, which can technologically develop production, supplying, and logistics processes may be a good solution for heavy industries to keep pace with the requirements of the industry 4.0 process. As a result, companies have become necessary to redesign their operations and processes as proper to the requirements of the Industry 4.0 process, whether small or large-scale enterprises.

This situation is forced to the heavy industries on a vast scale when the structural problems are considered. Being low flexibility of these companies may cause to increase the existing risks much more. In addition to the risks, digital transformation is more complicated and costlier for heavy industrial enterprises than more flexible small and medium-sized enterprises. When it is evaluated from this perspective, planning and managing the synchronously digital transformation for all branches of heavy industry is extremely difficult and costly. Moreover, designing the digital transformation and technological development process for all branches of heavy industry is not practical for policymakers of countries; it may also cause public source usage improperly and unproductively. Therefore, decision-makers should focus on priority areas, which provide higher added value and can be conducted of this transformation with lower costs and efforts to transform these branches from a more realistic and applicable perspective. In addition, focusing on these kinds of priority areas of the heavy industry may be essential for designing sustainable and manageable transformation processes.

When considered from this point of view, one of the main components of Industry 4.0 is the Cyber-Physical Systems (CPSs) (Makris et al., 2019), and it requires to use of automation and autonomous systems in production processes at the maximal level. Already, CPS is motivating many research agendas related to production systems around the world (Riberio, 2017), and CPSs, which are a crucial part of the 4th Industrial Revolution (4IR), have started to transform the production system CPSs. CPSs provide connections among all production parties (Daflon et al., 2021) such as machines, humans, equipment, and others with the help of technological instruments (i.e., cloud systems, internet of things, RFID applications, and sensors). Besides, these systems can help produce routine and standardized behaviors for the elements of the production systems by developing algorithms. Also, CPS can provide opportunities for interaction and integration between the physical world and the digital world (Iansiti and Lakhani, 2014). As a result, they can help solve many problems encountered in actual production processes by transferring from the real world to the virtual environment (Gaggioli, 2018) with the help of the simulation technique. As a natural result, depending on reducing the usage of human resources in production processes, human errors are also reduced (Ali and Hong, 2018), and production processes become more speedy, effective, and productive (Pascual et al., 2021). Creating this kind of system is extremely difficult for heavy industries having relatively low flexibility. However, being managerial abilities and high financial powers can be accepted as advantages of heavy industrial enterprises.

Automation processes in smart factories mean regular, planned, and organized interactions (Lu et al., 2020) among machines, devices, and humans to organize the production processes. For instance, if any problem on source utilization in any production phase happens, it means giving orders for this requirement automatically and autonomously to the suppliers without a decision-making process. Therefore, CPS can help solve any problem, i.e., unexpected malfunction of machines and equipment, lack of resources such

as human force, raw materials, semi-finished products, etc. Thus, production and logistics systems can be run in full capacity and unproblematic based on the successful integration of CPSs.

However, implementation steps and ways followed by all companies and industries for digital transformation are not sufficiently precise (Shahi and Sinha, 2020; Zaoui and Souissi, 2020), and obtaining crisp values for related data may be difficult and even impossible. This situation may source from data publishing habits of companies and being insufficient of the developed methodologies for obtaining the crisp values, or they have not existed. Hence, it has not developed a commonly held measurement system for identifying the crisp values for alternatives concerning criteria even though there are some well-meaning attempts, as Industry 4.0 is a pretty new process. From this perspective, there are severe and notable gaps in the existing literature on production systems, in addition to all processes of industry 4.0.

When the literature is reviewed comprehensively, the central part of the previous work existing in the literature examined CPSs, or they dealt with the implementation of CPSs in production companies and industries with a general view. From this perspective, these papers did not forward an idea that can CPSs be more effective in which industry(s) and made general evaluations on applying these systems for all industries only. However, each industry has different dynamics and specific characteristics; hence, the digital transformation process requires different scenarios for each industry. More importantly, each industry has a different potential for success related to CPSs. When they are evaluated from this perspective, there are severe gaps in the literature in the aspect of studies examining the potential of success of the industries on the implementation of CPSs. In addition, according to the authors' information, there is no paper evaluating the digital transformation process of the heavy industries concerning CPSs in the existing literature. By keeping in mind these gaps and requirements, the current paper examines the potential of the heavy industries related to the CPSs. Also, it tries to show priority branches of heavy industry that can be allocated sources and made investment for the digital transformation process by public and private sectors, as the sources of the public and private sectors are not limitless. Also, the proposed approach in the current paper has valuable contributions with respect to theoretical as summarised below to the existing literature.

The current paper proposes a novel, applicable and powerful MCDM (Multi-Criteria Decision Making) approach, keeping in mind these gaps in the existing literature and requirements of the practitioners and decision-makers in related branches of heavy industries. The proposed approach was introduced firstly by Pamucar et al. (2021), and it is a novel MCDM framework presenting a new algorithm different from other traditional and popular MCDM approaches. It has many relative advantages compared to the other popular MCDM techniques.

First, it is maximally consistent and stable and can not be affected by the rank reversal problem; hence, the ranking results do not change dramatically when we add or remove a criterion or decision alternatives. Because of that, the (-Logarithm Methodology of Additive Weights (LMAW) approach is more reliable in a dynamic environment than others for decision-makers. Also, the most significant contribution of the LMAW technique is to give better, accurate and reliable results, as it is a maximally consistent and stable MCDM framework (Pamucar et al., 2021). This methodological implication of the technique has been approved in the current paper to solve the decision-making problem on heavy industry branch selection for applying the CPS.

The proposed approach's mathematical framework and basic algorithm do not change based on the number of criteria and decision alternatives; it also allows both objective and subjective criteria. In addition, it does not require a different technique for identifying the weights of criteria. Hence, this approach can determine the criteria weights. Also, it uses the Bonferroni function for aggregating the subjective evaluations of the decision-makers. It provides a flexible decision-making environment to the decision-makers (Pamucar et al., 2021).

The motivations for the study are as follows. First, this paper introduces an applicable, robust, and effective MCDM framework to provide a powerful and flexible evaluation tool to the practitioners and decision-makers. The proposed mathematical tool can help make evaluations better for relating to selecting the branch of heavy industries, which are planned to transform their production systems into CPPSs. Hence, it can provide an opportunity to apply public incentives and subsidies and support the right and appropriate industrial fields. Thus, more efficient use of resources of public and private sectors may be possible.

Second, we decided to use the LMAW technique, as it provides reliable, realistic, and reasonable results because it is a maximally consistent and stable approach and is resistant to the rank reversal problem. In addition to these advantages, it has a very easily followable basic algorithm, and decision-makers can apply it without advanced mathematical information. Based on its advantages, it can help to fill

the gaps related to the requirement of a methodological frame to solve these kinds of decision-making problems.

Third, contrary to research that have studied this topic from a general perspective, this paper examines the branches of the heavy industry from a more detailed perspective. Therefore, we considered the significant differences and dynamics among different branches of heavy industry to identify the best heavy industry branch having the potential to gain success for transforming its production system to an advanced and technologically improved production system. From this perspective, it can help determine a road map for digital transformation for the industries in a country.

In addition, we sought reasonable and realistic answers to the research questions. The research questions were determined by researchers as follows. i) is it possible to apply a mathematical model or decision support system to identify the priority branch of heavy industry to implement incentives, subsidies, and supports for digital transformation. ii) Are decision-makers in these industries make decisions based on their experiences and individual judgments only? iii) what are the significant criteria to identify the appropriate heavy industry branch?

The rest of the paper is organized as follows. In section 2, the proposed LMAW technique and its basic algorithm are demonstrated in detail. In section 3, the suggested approach has been implemented to evaluate the branches of the heavy industry concerning the suitability of digital transformation by using the CPS in their production processes. Also, a comprehensive sensitivity analysis was performed to test the validity of the proposed MCDM framework. In section 4, the overall results are evaluated and discussed. In addition, the methodological and managerial implications of the proposed approach and the current paper are indicated in this section. In section 5, the current paper is concluded; besides, limitations of the paper and recommendations to authors who conduct future works on this issue are indicated.

2. LITERATURE REVIEW

In this section, we review the existing literature in detail. We noticed severe and surprising gaps in the existing literature when we performed a comprehensive literature review. Although many studies deal with CPSs, few papers used an MCDM (Multiple criteria decision making) framework to solve decision-making problems on this issue. More importantly, MCDM approaches used in these papers also have some structural problems and many drawbacks. For example, Silva and Jardim-Goncalves (2021) examined the selection of a more suitable device (system) to perform a task for CPSs with the help of the AHP (Analytic Hierarchy Process) and the PROMETHEE (The Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) combination. Even though this paper has many valuable contributions to the literature, it has some limitations and structural problems. First, the main subject of this study is not the same as the current paper's focal point. Also, the proposed approach has many disadvantages. The AHP is the most commonly criticized MCDM approach since it requires many computations and pairwise comparisons among criteria and decision alternatives. Hence, it has a very complicated basic algorithm, and it may not be reliable for decision-makers, as it suffers from the rank reversal problem (Mufazzal and Muzakkir, 2018). It means any changes in the number of criteria and alternatives or values existing in the indexes may cause dramatic changes in the ranking results. In addition, it requires additional computations for identifying the consistency (Karthikeyan et al., 2016). Besides, it is required to express the preferences and the significances of the criteria on a ratio scale by decision-makers to be able to apply the PROMETHEE technique. Also, the criteria weights denote trade-offs among the selection criteria (Keyser and Peeters, 1996). Therefore, the obtained results by applying this approach may not be realistic and reliable.

Mbuli (2019) evaluated the applicability of the CPS in the railway industry without using any MCDM approach. This study is valuable for the railway industry, but it is limited, as it did not provide an opportunity to compare industries and focus on a single industry. Oliveira et al. (2020) examined the impacts of CPS on Failure Mode and Effect Analysis for the railway industry with the help of Risk Priority Number (RPN) estimation approach. This paper did not also use an MCDM technique, and its managerial implications and contributions are limited with risk assessment.

Jamwal et al. (2021) assessed the applicability of the CPS for the MSMEs (Micro Small Medium Enterprises) sector to develop a sustainability practices framework for Industry 4.0 with the help of a hybrid MCDM technique based on F-AHP (Fuzzy-Analytical hierarchy process) and DEMATEL (Decision making trial and evaluation laboratory). This paper's primary assumption and approach approve the main arguments of the current paper on the difficulties of collecting the crisp values by applying the fuzzy approaches. However, we have indicated the main structural problems and drawbacks of the AHP technique in the previous section; also, the DEMATEL technique has many disadvantages: researchers may have to eliminate some criteria since it has a very complicated and time-consuming basic algorithm;

also, it assumes that each decision-maker have the same experiences, knowledge, and abilities; hence it does not consider the differences among decision-makers (Si et al., 2018).

In addition to these studies, some previous works dealt with smart factories from the perspective of industry 4.0 (Machado et al. 2020; Nujoom et al. 2019; Jiang, 2018; Pascual et al., 2021). However, these papers do not present a robust methodological frame to compare the different industries. In addition, they examined smart factories' impacts on the companies' targets related to accords of requirements of industry 4.0. Besides, they also proposed the traditional MCDM approaches having some structural problems argued above. In addition, Hayhoe et al. (2019) examined the impacts of cross-sector networks of multiple supply chains, cyber-physical production systems on sustainable manufacturing systems, but they did not consider the differences among industries. As is seen above, there are many gaps in the existing literature, and they can be summarised as follows.

- The most of decision techniques used in the previous studies are traditional MCDM approaches. Therefore, these techniques may not provide a flexible decision-making environment to the decision-makers when their structural problems and drawbacks are considered.
- There is no commonly accepted mathematical model used for evaluating the industries concerning the applicability of the CPSs in the production processes.
- Most of the previous works existing in the literature focused on defined subjects such as smart factories, intelligent systems, and sustainable production instead of differences between companies or industries.
- There is no paper dealing with the applicability of CPS for developing the manufacturing processes of heavy industries concerning technology and creating sustainable production systems.

Keeping in mind these gaps and requirements to a comprehensive methodological frame to measure the suitability of the heavy industry branches, the current paper proposes a practical and applicable MCDM framework to fill these gaps and respond to these requirements.

3. THE PROPOSED MCDM FRAMEWORK

Here, we demonstrate the basic algorithm of the new LMAW technique. The proposed MCDM framework has five implementation steps, and these steps are presented as follows (Pamucar et al., 2021). Also, the basic algorithm of the proposed approach is presented in Figure 1.

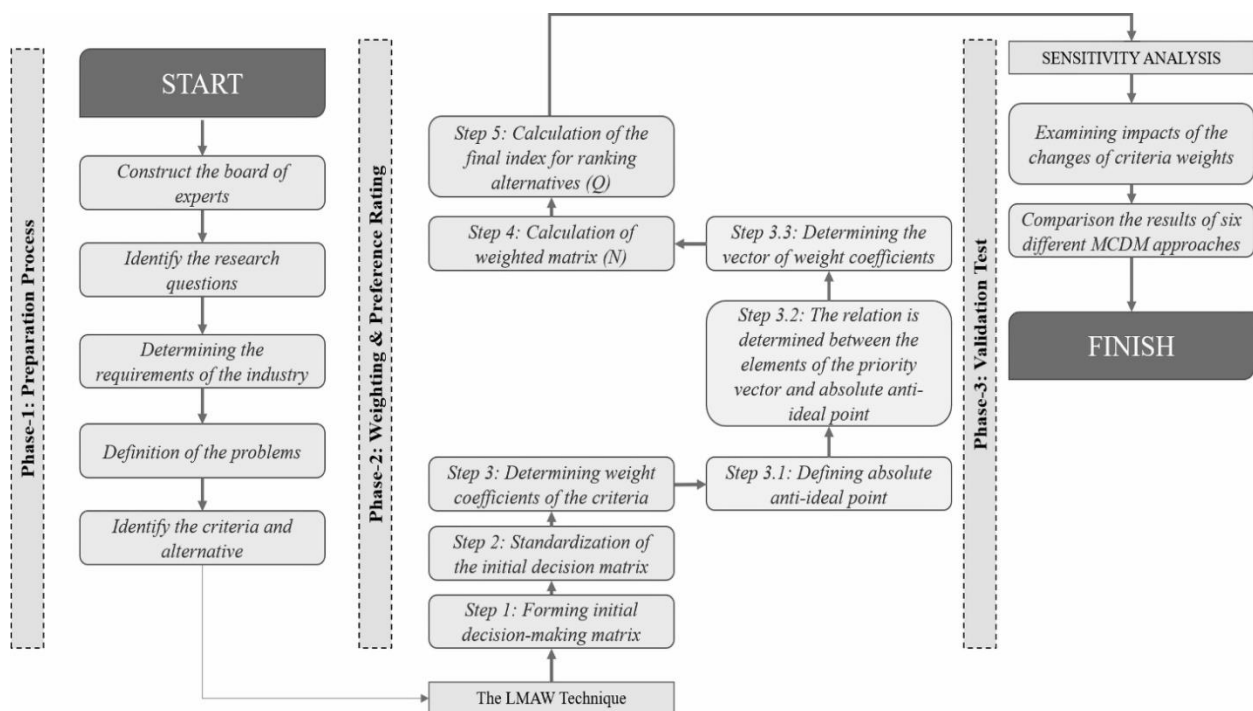


Figure 1. The basic algorithm of the proposed approach

Step 1. Forming initial decision-making matrix: The initial decision matrix is constructed in the first step of the proposed approach. Let suppose m number of alternatives $A = (A_1, A_2, \dots, A_m)$ and n number of

criteria $C = (C_1, C_2, \dots, C_n)$ exist in an evaluation process. In addition, the criteria weight coefficients have to equal 1. Also, k number of decision-makers (experts) $E = (E_1, E_2, \dots, E_k)$ perform evaluations for criteria and decision alternatives. Therefore, the k number of initial decision matrices given in Equation 1 is generated.

$$X^e = \begin{bmatrix} \eta_{11}^e & \eta_{12}^e & \dots & \eta_{1n}^e \\ \eta_{21}^e & \eta_{22}^e & \dots & \eta_{2n}^e \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \eta_{1m}^e & \eta_{2m}^e & \dots & \eta_{mn}^e \end{bmatrix} \quad (1)$$

Then, these obtained initial decision matrices are aggregated with the help of the Bonferroni function approach. By applying the mathematical formulation of the Bonferroni function shown in Equation 2, the aggregated initial decision matrix is constructed.

$$\eta_{ij} = \left(\frac{1}{k(k-1)} \sum_{x=1}^k (\eta_{ij}^{(x)})^p \sum_{\substack{y=1 \\ y \neq x}}^k (\eta_{ij}^{(y)})^q \right)^{\frac{1}{p+q}} \quad (2)$$

Where η_{ij} presents the averaged values obtained by applying Bonferroni aggregator; $p, q > 0$ present stabilization parameters of the Bonferroni aggregator, while e presents the e^{th} expert $1 \leq e \leq k$ (Pamucar et al. 2021).

Step 2. Standardization of the initial decision matrix: The elements of the aggregated decision matrix are normalized in this step by applying Equation 3. For this purpose, the linear normalization technique is applied by considering the characteristics of the criteria, i.e., benefits “ B ” and cost criteria “ C ”. Where; η_j^+ denotes maximum value and η_j^- is the minimum value. θ_{ij} symbolizes the normalized (Standardized) values of the initial decision matrix.

$$\theta_{ij} = \begin{cases} \theta_{ij} = \frac{\eta_{ij} + \eta_j^+}{\eta_j^+} & \text{if } C_j \in B \\ \theta_{ij} = \frac{\eta_{ij} + \eta_j^-}{\eta_j^-} & \text{if } C_j \in C \end{cases} \quad (3)$$

Step 3. Determining weight coefficients of the criteria: In this step, decision-makers evaluate the selection criteria by considering the linguistic evaluation scale given in Table 1.

Table 1. Linguistic evaluation scale for criteria and alternatives

Criteria		Alternative	
Scale	Linguistic terms/Abbreviation	Scale	Linguistic terms/Abbreviation
[1.0]	Absolutely low/[AL]	[1]	Absolutely low/[AL]
[1.5]	Very low/[VL]	[2]	Very low/[VL]
[2.0]	Low/[L]	[3]	Low/[L]
[2.5]	Medium/[M]	[4]	Medium/[M]
[3.0]	Equal/[E]	[5]	Medium High/[MH]
[3.5]	Medium High/[MH]	[6]	High/[H]
[4.0]	High/[H]	[7]	Very high/[VH]
[4.5]	Very high/[VH]		
[5.0]	Absolutely High/[AH]		

Source: Pamucar et al., 2021.

Then, the priority vector is formed as $PV^e = (\gamma_{C_1}^e, \gamma_{C_2}^e, \dots, \gamma_{C_n}^e)$ $\gamma_{C_n}^e$ denotes the value obtained from the linguistic scale identified by each expert to criterion $C_t (1 \leq t \leq n)$.

Step 3.1. Defining absolute anti-ideal point: Absolute anti-ideal point is defined in relation to the minimum values from the priority vector and should be lower than the smallest value from the priority vector (Pamucar et al., 2021; Deveci et.al.2021).

Step 3.2. The relation is determined between the elements of the priority vector and the absolute anti-ideal point in this step. Differences between these values are computed with the help of Equation 4.

$$\theta_{C_n}^e = \frac{\gamma_{C_n}^e}{\gamma_{AIP}^e} \quad (4)$$

Step 3.3. Determining the vector of weight coefficients: The values of weight coefficients of criteria are identified by decision-makers with the help of Equation 5.

$$\omega_j^e = \frac{\log_A(\theta_{cn}^e)}{\log_A(b^e)} A > 1 \tag{5}$$

θ_{cn}^e denotes the elements of relation vector and $b^e = \prod_{j=1}^n \theta_j^e$. Also, the condition of being equal to 1 for the sum of criteria weights has to be provided. Then we apply the Bonferroni functions to construct the aggregated weight coefficient vector with the help of Equation 6.

$$\omega_j = \left(\frac{1}{k(k-1)} \sum_{x=1}^k (\omega_j^{(x)})^p \sum_{\substack{y=1 \\ y \neq x}}^k (\omega_j^{(y)})^q \right)^{\frac{1}{p+q}} \tag{6}$$

Step 4. Computing the weighted matrix: By implementing Equation 7, the elements of the weighted matrix $Y = [\zeta_{ij}]_{m \times n}$ are calculated.

$$\zeta_{ij} = \frac{2\delta_{ij}^{\omega_j}}{(2-\delta_{ij})^{\omega_j} + \delta_{ij}^{\omega_j}} \tag{7}$$

where;

$$\delta_{ij} = \frac{\ln(\theta_{ij})}{\ln(\prod_{i=1}^m \theta_{ij})} \tag{8}$$

where; θ_{ij} denotes the normalized matrix elements and ω_j symbolizes the criteria weights coefficient.

Step 5. Calculation of the final index for ranking alternatives (Q_i): the final index for alternatives defining the preference ratings of options is identified by applying Equation 9.

$$Q_i = \sum_{j=1}^n \zeta_{ij} \tag{9}$$

4. EVALUATION OF THE HEAVY INDUSTRY BRANCHES

In this section, the proposed dynamic MCDM framework consisting of three phases was applied to evaluate the potential of transformation from the traditional production system to CPSs for the branches of heavy industry.

4.1. The Preparation Process

For this purpose, a board of experts consisting of five highly experienced and have deep knowledge professionals was constructed to ask their opinion on this issue during the research process. Details of these experts are presented in Table 2.

Table 2. Details of the members of the board of experts

<i>DMs</i>	<i>Graduation</i>	<i>Degree</i>	<i>Duty</i>	<i>Experience</i>
DM ¹	Industrial Engineering	Master's degree	Project Manager	12
DM ²	Mechanical Engineering	Undergraduate	General Manager	18
DM ³	Industrial Engineering	Undergraduate	Product Manager	13
DM ⁴	Business	Undergraduate	System designer	17
DM ⁵	Industrial Engineering	Undergraduate	Supply Chain Man.	20

Table 3. The selection criteria and decision alternatives

<i>Code</i>	<i>Direction</i>	<i>Criteria</i>	<i>Code</i>	<i>Alternatives</i>
C ₁	Max	First Pass yield	A ₁	Aerospace
C ₂	Max	Throughput Rate	A ₂	Shipbuilding
C ₃	Max	Availability	A ₃	Mining
C ₄	Min	Downtime	A ₄	Machine tool building
C ₅	Max	Overall Equipment Effectiveness (OEE)	A ₅	Locomotive manufacturing
C ₆	Min	Energy consumption	A ₆	Oil and gas
C ₇	Min	Scrap ratio	A ₇	Steel production
C ₈	Max	Target	A ₈	Chemical production
C ₉	Max	Count	A ₉	Construction of large buildings and infrastructure
C ₁₀	Min	Takt Time		

Then, existing literature was reviewed, and the selection criteria and decision alternatives were identified together with the experts. For this purpose, researchers and decision-makers decided to use the set of key performance indicators (KPI) in the ISO 22400-2:2014 Automation systems and integration published by the International Standardisation Organisation as the set of selection criteria. Also, the branches of heavy industry were selected as the decision alternatives. The selection criteria and decision alternatives are presented in Table 3.

The definitions of the criteria given in Table 3 are presented as follows. C_1 yield refers to the percentage of products that meet quality requirements from the total of inspected products (IP). Products that meet quality requirements are named good products (GP). C_2 is the performance of the production process. The calculation compares produced quantity (PQ) with actual order execution time (AOET). C_3 is the availability shows the actual time the equipment is available for usage. The calculation compares the actual utilized time (OPT) with the loading time (LT). C_4 is the result of a breakdown or simply a machine changeover. When machines are not operating, the company can be at risk of loss.

C_5 combines the availability, the effectiveness, and the finished goods ratio. The produced index indicates the efficiency of machines or complete assembly lines. C_6 is the ratio of energy consumed per production cycle (E) in comparison to the produced quantity (PQ). C_7 is the ratio of scrap quantity (SQ) in comparison to the produced quantity (PQ). C_8 is target and many organizations display target values for output, rate, and quality. This KPI helps motivate employees to meet specific performance targets. C_9 relates to the amount of product produced. The count typically refers to the product produced since the last machine changeover or the production sum for the entire shift or week. C_{10} is the amount of time, or cycle time, to complete a task.

When it is considered that expectations of all industries and companies concerning industry 4.0 and digital transformation processes are not clear sufficiently, collecting data on this issue is not easy. In addition, data publishing habits of almost all companies do not exist except corporate companies. Therefore, no commonly accepted measurement system can help to collect crisp data in the related field. Because of that, while subjective evaluations were performed for criteria by decision-makers by considering the nine-point scale, the seven-point scale was used for evaluating the decision alternatives.

4.2. Implementation of the LMAW Technique

After the phases of the preparation process are completed, the basic algorithm of the LMAW techniques that is the proposed approach in the current paper is followed. Linguistics evaluations of the experts are presented in Appendix 1. Then, the initial decision matrix is generated in the first implementation step of the model, as presented in Table 4.

Table 4. Aggregated decision matrix

Alternatives	Criteria 1	Criteria 2	Criteria 3	Criteria 4	Criteria 5	Criteria 6	Criteria 7	Criteria 8	Criteria 9	Criteria 10
Alt.-1	6.595	6.993	5.797	2.145	6.797	5.394	6.588	1.761	6.797	2.793
Alt.-2	5.992	5.394	5.983	1.732	5.586	5.992	5.595	2.793	7.000	3.391
Alt.-3	2.588	2.569	1.581	5.394	6.595	3.937	1.549	7.000	5.586	6.181
Alt.-4	3.347	4.593	5.394	5.385	5.797	3.391	5.394	5.177	5.595	5.187
Alt.-5	4.123	4.123	4.000	4.393	2.191	3.194	4.382	3.000	5.394	2.145
Alt.-6	4.583	5.779	2.569	7.000	5.196	5.595	5.788	6.387	6.173	6.588
Alt.-7	5.788	6.000	6.395	5.779	5.797	3.194	5.797	4.171	5.797	5.586
Alt.-8	4.393	3.391	5.196	6.595	6.197	4.561	5.394	6.387	6.387	5.779
Alt.-9	3.271	6.197	6.797	5.779	6.993	2.366	2.757	5.394	5.595	6.387

For example, the numerical value of η_{11} that is the first element of the initial decision matrix is calculated by computing the Bonferonni mean of the preferences of the five decision-makers [$\eta_{11} = \{VH, VH, H, VH, H\} = \{7,7,6,7,6\}$] with the help of Equation 2 as follows.

$$\eta_{11}^{p=q=1} = \left(\frac{1}{5(5-1)} (7^1 \cdot 7^1 + 7^1 \cdot 6^1 + 7^1 \cdot 7^1 + 7^1 \cdot 6^1 + \dots + 6^1 \cdot 7^1 + 6^1 \cdot 7^1 + 6^1 \cdot 6^1 + 6^1 \cdot 7^1) \right)^{1/2} = 6.595$$

After the initial decision matrix is generated, these matrix elements are normalized with the help of Equation 3. For this purpose, characteristics of the criteria are considered, and the normalized matrix is presented in Table 5.

Table 5. Normalized decision matrix

Alternatives	Criteria	Criteria	Criteria	Criteria	Criteria	Criteria	Criteria	Criteria	Criteria	Criteria
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Alt.-1	2.000	2.000	1.853	1.808	1.972	1.439	1.235	1.252	1.971	1.768
Alt.-2	1.908	1.771	1.880	2.000	1.799	1.395	1.277	1.399	2.000	1.632
Alt.-3	1.392	1.367	1.233	1.321	1.943	1.601	2.000	2.000	1.798	1.347
Alt.-4	1.507	1.657	1.794	1.322	1.829	1.698	1.287	1.740	1.799	1.414
Alt.-5	1.625	1.590	1.588	1.394	1.313	1.741	1.354	1.429	1.771	2.000
Alt.-6	1.695	1.826	1.378	1.247	1.743	1.423	1.268	1.912	1.882	1.326
Alt.-7	1.878	1.858	1.941	1.300	1.829	1.741	1.267	1.596	1.828	1.384
Alt.-8	1.666	1.485	1.764	1.263	1.886	1.519	1.287	1.912	1.912	1.371
Alt.-9	1.496	1.886	2.000	1.300	2.000	2.000	1.562	1.771	1.799	1.336

The values of θ_{11} and θ_{14} existing in the normalized matrix are calculated as follows.

$$\theta_{11} = \left(\frac{6.595 + \max(6.595; 5.992; 2.588; 3.347; 4.123; \dots; 3.271)}{\max(6.595; 5.992; 2.588; 3.347; 4.123; \dots; 3.271)} \right) = 2.000$$

$$\theta_{14} = \left(\frac{2.145 + \min(2.145; 1.732; 5.394; 5.385; 4.393; \dots; 5.779)}{2.145} \right) = 1.808$$

Next, the weight coefficients of criteria are determined by decision-makers by considering the nine-point scale given in Table 1. The determined linguistic evaluations are presented in Table 6.

Table 6. Evaluating the criteria by decision-makers

Criteria	Linguistic evaluations	Criteria	Numerical rating
	Decision makers evaluation		Decision makers evaluation
	(DM ¹ , DM ² , ..., DM ⁵)		(DM ¹ , DM ² , ..., DM ⁵)
C ₁	[H;H;VH; H;H]	C ₁	[4;4;4.5;4;4]
C ₂	[VH; L;VH; VH; VH]	C ₂	[4.5;2;4.5;4.5;4.5]
C ₃	[H;H;M;M;H]	C ₃	[4;4;2.5;2.5;4]
C ₄	[M;VL; M;M;H]	C ₄	[2.5;1.5;2.5;2.5;4]
C ₅	[AH; AH; H;AH; AH]	C ₅	[5;5;4;5;5]
C ₆	[H;VL; H;VL; H]	C ₆	[4;1.5;4;1.5;4]
C ₇	[VL; M;M;AL; VL]	C ₇	[1.5;2.5;2.5;1;1.5]
C ₈	[H;M;H;VL; H]	C ₈	[4;2.5;4;1.5;4]
C ₉	[M;H;H;H;M]	C ₉	[2.5;4;4;4;2.5]
C ₁₀	[VL; M;M;H;H]	C ₁₀	[1.5;2.5;2.5;4;4]

After five priority vectors presented in Table 6 are formed, the relation between each element of these vectors and absolute anti ideal point (AIP) are identified. For this purpose, AIP is accepted as $\gamma_{AIP}=0.5$, and calculated values are presented in Table 7.

Table 7. The relation between each element of priority vectors and the absolute anti ideal point

Decision Makers	Priority vector elements	Relation vector elements
	$\gamma_{C_n} : (\gamma_{C1}, \gamma_{C2}, \dots, \gamma_{C10})$	$\theta_{C_n} : (\theta_{C1}, \theta_{C2}, \dots, \theta_{C10})$
DM ¹	[4.0;4.5;4.0;2.5;5.0;4.0;1.5;4.0;2.5;1.5]	[8;9;8;5;10;8;3;8;5;3]
DM ²	[4.0;2.0;4.0;1.5;5.0;1.5;2.5;2.5;4.0;2.5]	[8;4;8;3;10;3;5;5;8;5]
DM ³	[4.5;4.5;2.5;2.5;4.0;4.0;2.5;4.0;4.0;2.5]	[9;9;5;5;8;8;5;8;8;5]
DM ⁴	[4.0;4.5;2.5;2.5;5.0;1.5;1.0;1.5;4.0;4.0]	[8;9;5;5;10;3;2;3;8;8]
DM ⁵	[4.0;4.5;4.0;4.0;5.0;4.0;1.5;4.0;2.5;4.0]	[8;9;8;8;10;8;3;8;5;8]

For example, the relation between priority vector elements identified by DM¹ and the absolute anti ideal point is calculated as follows.

$$\theta_{(\theta_{C1}, \theta_{C2}, \dots, \theta_{C10})}^{DM^1} = \left[\left(\frac{4.0}{0.5}; \frac{4.5}{0.5}; \frac{4.0}{0.5}; \frac{2.5}{0.5}; \frac{5.0}{0.5}; \frac{4.0}{0.5}; \frac{1.5}{0.5}; \frac{4.0}{0.5}; \frac{2.5}{0.5}; \frac{1.5}{0.5} \right) \right] = [(8; 9; 8; 5; 10; 8; 3; 8; 5; 3)]$$

Then, by applying Equation 5, each decision-maker determined weights coefficients of criteria, and these vectors are aggregated with the help of the Bonferroni aggregating function (Equation 6). Next, the final weight coefficient for each criterion is presented in Table 8.

Table 8. The final criteria weight coefficients

Weights	Criteria 1	Criteria 2	Criteria 3	Criteria 4	Criteria 5	Criteria 6	Criteria 7	Criteria 8	Criteria 9	Criteria 10
ω^1	0.114	0.121	0.114	0.088	0.126	0.114	0.060	0.114	0.088	0.060
ω^2	0.123	0.082	0.123	0.065	0.136	0.065	0.095	0.095	0.123	0.095
ω^3	0.115	0.115	0.084	0.084	0.109	0.109	0.084	0.109	0.109	0.084
ω^4	0.123	0.130	0.096	0.096	0.137	0.065	0.041	0.065	0.123	0.123
ω^5	0.106	0.112	0.106	0.106	0.117	0.106	0.056	0.106	0.082	0.106
$\omega^{\text{aggregated weights}}$	0.1161	0.1115	0.1042	0.0874	0.1248	0.0910	0.0665	0.0973	0.1046	0.0931
Rank	2	3	5	9	1	8	10	6	4	7

For instance, ω^1 for DM¹ given in Table 8 was computed as follows.

$$\omega^1 = \left[\left(\frac{\ln(8)}{\ln(8 \times 9 \times 8 \dots \times 3)} \right), \left(\frac{\ln(9)}{\ln(8 \times 9 \times 8 \dots \times 3)} \right), \left(\frac{\ln(8)}{\ln(8 \times 9 \times 8 \dots \times 3)} \right), \dots, \left(\frac{\ln(3)}{\ln(8 \times 9 \times 8 \dots \times 3)} \right) \right] = [0.114, 0.121, 0.114, \dots, 0.060]$$

For remain four decision-makers, Equation 5 is applied similarly, and the final weight coefficients $\omega^2, \omega^3, \omega^4$ ve ω^5 are computed. Then, the Bonferroni function was applied for aggregating the weight coefficients of criteria. For example, the final weight coefficient of the C₁ criterion was computed as follows.

$$\omega_1^{\text{aggregated weights}} = \left(\frac{1}{5(5-1)} (0.114^1 \cdot 0.123^1 + 0.114^1 \cdot 0.115^1 + \dots + 0.106^1 \cdot 0.123^1) \right)^{1/2} = 0.1161$$

Next, the weighted normalized matrix was constructed with the help of Equations 7 and 8 for determining the preference rating of the decision alternatives. The obtained results are presented in Table 9.

Table 9. Weighted normalized matrix

Alternatives	Criteria 1	Criteria 2	Criteria 3	Criteria 4	Criteria 5	Criteria 6	Criteria 7	Criteria 8	Criteria 9	Criteria 10
Alt.-1	0.855	0.859	0.862	0.901	0.834	0.859	0.892	0.824	0.858	0.886
Alt.-2	0.851	0.847	0.863	0.909	0.825	0.855	0.897	0.843	0.859	0.879
Alt.-3	0.811	0.813	0.805	0.866	0.833	0.871	0.934	0.880	0.850	0.855
Alt.-4	0.824	0.840	0.859	0.867	0.827	0.877	0.898	0.868	0.850	0.862
Alt.-5	0.834	0.835	0.846	0.874	0.777	0.879	0.904	0.846	0.848	0.896
Alt.-6	0.838	0.850	0.827	0.856	0.821	0.858	0.896	0.876	0.854	0.852
Alt.-7	0.849	0.852	0.866	0.864	0.827	0.879	0.896	0.860	0.851	0.859
Alt.-8	0.837	0.826	0.857	0.859	0.830	0.866	0.898	0.876	0.855	0.857
Alt.-9	0.822	0.853	0.868	0.864	0.836	0.890	0.918	0.870	0.850	0.853

ζ_{11} , the first element of the weighted normalized decision matrix is calculated as follows.

$$\delta_{11} = \left[\left(\frac{\ln(2.00)}{\ln[(2.00) \times (1.908) \times \dots \times (1.496)]} \right) \right] = 0.149;$$

$$\zeta_{11} = \left[\left(\frac{2x((0.149)^{0.1161})}{(2-0.149)^{0.1161} + 0.149^{0.1161}} \right) \right] = 0.855$$

In the final implementation step of the proposed model, the final index values of the decision alternatives were calculated by applying Equation 9. The computed final index values for decision alternatives are presented as follows.

$$Q_1 = (0.855 + 0.859 + 0.862 + \dots + 0.886) = 8.630 \quad Q_5 = (0.834 + 0.835 + 0.846 + \dots + 0.896) = 8.541$$

$$Q_2 = (0.851 + 0.847 + 0.863 + \dots + 0.879) = 8.628 \quad Q_6 = (0.838 + 0.850 + 0.827 + \dots + 0.852) = 8.529$$

$$Q_3 = (0.811 + 0.813 + 0.805 + \dots + 0.855) = 8.518 \quad Q_7 = (0.849 + 0.852 + 0.866 + \dots + 0.859) = 8.602$$

$$Q_4 = (0.824 + 0.840 + 0.859 + \dots + 0.862) = 8.571 \quad Q_8 = (0.837 + 0.826 + 0.857 + \dots + 0.857) = 8.561$$

$$Q_9 = (0.822 + 0.853 + 0.868 + \dots + 0.853) = 8.625$$

By considering these values, the final ranking performances of the options are obtained as presented in Table 10.

Table 10. Ranking the alternatives concerning the final index values

Alternatives	Alt.-1	Alt.-2	Alt.-3	Alt.-4	Alt.-5	Alt.-6	Alt.-7	Alt.-8	Alt.-9
Q_i	8.630	8.628	8.518	8.571	8.541	8.529	8.602	8.561	8.625
Rank	1	2	9	5	7	8	4	6	3

4.3. Validation Test

In this section, a comprehensive sensitivity analysis consisting of two phases was performed to test the applicability and validity of the proposed approach and its obtained results. In the first stage, the impacts of changing the criteria weights on the ranking results were examined. Next, we applied five popular MCDM techniques and compared the results obtained using both the proposed approach and others.

In the first stage, we changed the weight of each criterion in each scenario to examine the impacts of modification of criteria weights on the ranking results. For this purpose, we formed 100 different scenarios and reduced criteria weight at the rate of 10% in each scenario. Then, we continued to reduce the weight for the criterion till the criterion weight was equal to zero. Previous works suggested changing the weights of criteria in the first three ranks (Stankovic et al. 2020). This kind of approach can give a limited result since it did not consider the potential impacts of changes in the remaining criteria' weights. The current paper proposes to include all criteria into the analyzing process by following the implementation proposed by Görçün et al. (2021). According to the algorithm proposed by them, the criterion weight is changed at the rate of 10%. Then, the weights of the remaining criteria are corrected for providing the condition that the sum of weights should be equal to 1. The new weights of the criteria are identified by applying Eqs. 10, 11, and 12.

$$w_{fv}^1 = w_{pv}^1 - (w_{pv}^1 \cdot m_v) \tag{10}$$

$$w_{nv}^2 = \frac{(1-w_{fv}^1)}{n-1} + w_{pv}^2 \tag{11}$$

$$w_{fv}^1 + \sum w_{nv}^2 = 1 \tag{12}$$

Here, w_{fv}^1 denotes the new value of the modified weight of j^{th} factor, w_{pv}^1 is the previous values of the criterion, m_v is the modification degree in terms of percentage (i.e., 10%, 20%,...,100%). Also, w_{nv}^2 symbolizes new values of remaining factors, n is the number of factors, w_{pv}^2 is the previous values of the remaining criteria. Then, we followed the basic algorithm of the first phase and obtained the new ranking results for all scenarios presented in Figure 2.



Figure 2. Impacts of changing the criteria weights on the ranking results

As shown in Figure 2, Alt.-1, the best option, has remained the best alternative in 50 scenarios. It has been slight changes, which cannot change the overall results in ranking performances of the alternatives. The average similarity rate between the proposed model results and the results obtained by different 100 scenarios is determined as 72%. In the second phase, we implemented five different popular MCDM approaches such as MARCOS (Stević et al., 2020), MAIRCA (Gigović et al., 2016), WASPAS (Zavadskas et al., 2012), MABAC (Pamučar and Čirović, 2015), and MAUT (Lopes and Almeida, 2015). According to the obtained results, ranking results of all popular techniques and the proposed approach are similar to a high degree. The ranking results of the techniques, including the proposed approach, are presented as follows.

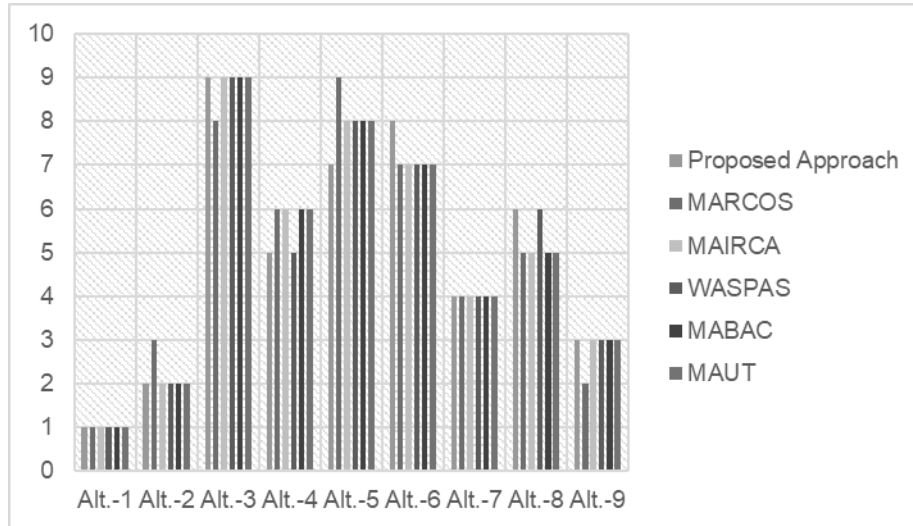


Figure 3. Comparison of the ranking results of the proposed approach and others

As is seen in Figure 3, Alt.-1 has remained the best option for all popular implemented techniques and the LMAW technique, and the ranking position of the Alt.-7 has not also changed. Besides, it has been observed minor changes in the ranking positions of some alternatives; however, these changes cannot change the overall results.

5. CONCLUSION

Determining the primary areas in the heavy industries is crucial for policymakers since the appropriate investment decision and source utilization is essential for countries, individuals, and companies. It can allow creating more productive and efficient industries in countries. Moreover, evaluating and selecting appropriate fields in heavy industries is not easy for decision-makers. So indeed, no papers are dealing with this issue directly, and we noticed severe and surprising gaps in the existing literature. Furthermore, the previous paper existing in the literature did not propose an applicable and practical evaluation technique for assessing the suitability of the heavy industry branches to the CPS use in the production systems. The current paper proposes an applicable and practical MCDM framework to evaluate the heavy industry branches by keeping the industry's requirements and existing gaps in the literature.

When the obtained results are evaluated in detail, it has been observed that the proposed approach has the potential to fill the gaps existing in the literature. Also, it is resistant to the rank reversal problem because it is maximally stable and consistent than other popular and traditional MCDM approaches (Pamučar et al., 2021). Hence, we can accept that the LMAW method is a reliable MCDM framework for decision-makers. It can process subjective and objective criteria. In addition, the paper has valuable contributions to the literature as follows. It helps identify the heavy industry's prior branches concerning digital transformation suitability in their production systems and processes.

According to the obtained results, C_5 , Overall Equipment Effectiveness (OEE), is the most crucial criterion for evaluating the branches of the heavy industry. It is reasonable and realistic because OEE (Overall Equipment Effectiveness) is defined as the critical indicator for identifying the efficiency and productivity of a production system. It helps to detect and solve any problem that occurred in the production process, and it provides an opportunity to prepare a manufacturing system for digital transformation. It is impossible to create a well-functioned production system supported with CPSs if there are problems in the production systems. Therefore, it serves to construct an excellent production system for companies and industries.

C₁ First Pass Yield has been determined as the second crucial factor in evaluating the industries concerning the suitability of using the CPS in production processes. It is meaningful since it is an essential metric for measuring a manufacturing system's performance, productivity, and efficiency. Also, it is a good indicator of the effectivity of a manufacturing system, and it can help eliminate waste of time and sources. Other criteria were ranked as C₂> C₉> C₃> C₈> C₁₀> C₆> C₄> C₇.

When we evaluate the results of the proposed model for determining the preference ratings of the alternatives, Alt.-1, Aerospace industry is the best alternative, and Alt.-2 Shipbuilding industry is the second-best option and follows to first alternatives. Remainders have been ranked as Alt.-9> Alt.-7> Alt.-4> Alt.-8> Alt.-5> Alt.-6> Alt.-3. These results are reasonable and realistic, as the Aerospace and shipbuilding industry respond to requirements to identify the priority of the heavy industry branches.

In addition, the obtained results were tested with the help of a comprehensive sensitivity analysis, and the results of the analysis approve the validity and applicability of the proposed approach. Hence, the results of the proposed LMAW techniques can be accepted as accurate, reasonable, and reliable.

The current paper proposes a methodological frame to solve very complicated and time-consuming decision-making problems. Also, the proposed LMAW technique can be implemented to solve various decision-making problems encountered in many fields and evaluate the suitability of the heavy industry branches to digital transformation and using CPS in their production processes. Decision-makers and policymakers who try to manage the technological industrialization policies of countries can apply this methodological frame in an evaluation process to assess the industries, as it has an efficient and applicable basic algorithm. In addition, it can be inspirational for authors who carry out future works on this issue.

In addition to the methodological implications of the proposed MCDM approach, the paper has some valuable managerial implications. The managerial implications of the paper can be summarised as follows.

- It provides opportunities for prioritizing which branches of the heavy industry should be supported and incited primarily for decision-makers and practitioners. Therefore, it can be a practical tool for evaluating the branches of heavy industry for suitability of the sectors for digital transformation and effectively using CPSs in these industries' production systems.
- It also presents an applicable, robust, and powerful methodological frame to make self-evaluation for their companies comparatively. Thus, decision-makers can apply the proposed model for evaluating their companies concerning the property of these companies.

The LMAW technique proposed in the current paper can be extended with the help of different fuzzy MCDM frameworks. Also, new criteria that occur in the future depending on changing industries' requirements can be included in the scope of the studies by future studies.

REFERENCES

- Ali, N. and Hong, J.-E. (2018). "Failure Detection and Prevention for Cyber-Physical Systems Using Ontology-Based Knowledge Base", *Computers*, 7(4), 68, 1-16.
- CFI (2021). <https://corporatefinanceinstitute.com>, (Access Date: 20.07.2021).
- Dafflon, B., Moalla, N. and Ouzrout, Y. (2021). "The Challenges, Approaches, and Used Techniques of CPS for Manufacturing in Industry 4.0: a Literature Review", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113, 2395-2412.
- Deveci, M., Pamucar, D. and Gokasar, I. (2021). "Fuzzy Power Heronian Function Based CoCoSo Method for the Advantage Prioritization of Autonomous Vehicles in Real-time Traffic Management", *Sustainable Cities and Society*, 69, 102846.
- Gaggioli, A. (2018). "The Disappearing Smartphone", *Cyberpsychology, Behavior and Social Networking*, 21(9), 530-531.
- Gigović, L., Pamučar, D., Bajić, Z. and Milićević, M. (2016). "The Combination of Expert Judgment and GISMAIRCA Analysis for the Selection of Sites for Ammunition Depots", *Sustainability*, 8(4), 372.
- Görçün, O. F., Senthil, S. and Küçükönder, H. (2021). "Evaluation of Tanker Vehicle Selection Using a Novel Hybrid Fuzzy MCDM Technique", *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 4(2), 140-162.
- Hayhoe, T., Podhorska, I., Siekelova, A. and Stehel, V. (2019). "Sustainable manufacturing in Industry 4.0: Cross-Sector Networks of Multiple Supply Chains, Cyber-Physical Production Systems, and AI-driven Decision-Making", *Journal of Self-Governance and Management Economics*, 7(2), 31-36.
- Iansiti, M. and Lakhani, K.R. (2014). "Digital Ubiquity: How Connections, Sensors, and Data are Revolutionizing Business (Digest Summary)", *Harvard Business Review*, 92(11), 91-99.
- Jamwal, A. Agrawal, R. Sharma, M. Kumar, V. and Kumar, S. (2021). "Developing a Sustainability Framework for Industry 4.0", *Procedia CIRP*, 98, 430-435.
- Jiang J.-R. (2018). "An Improved Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0 Smart Factories", *Advances in Mechanical Engineering*, 10(6), 1-15.
- Karthikeyan, R., Venkatesan, K.G.S. and Chandrasekar, A. (2016). "A Comparison of Strengths and Weaknesses for Analytical Hierarchy Process", *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, 9(3), 12-16.
- Keyser, W.D. and Peeters, P. (1996). "A Note on the use of PROMETHEE Multicriteria Methods", *European Journal of Operational Research*, 89(3), 457-461.
- Lin, B. and Liu, K. (2016). "How Efficient Is China's Heavy Industry? A Perspective of Input-Output Analysis", *Emerging Market Finance and Trade*, 52(11), 2546-2564.
- Lopes Y. G., Almeida A.T. (2015). "Assessment of Synergies for Selecting a Project Portfolio in the Petroleum Industry Based on a Multi-Attribute Utility Function", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 126, 131-140.
- Lu, Y., Xu, X. ve Wang, L. (2020). "Smart Manufacturing Process and System Automation – A Critical Review of the Standards and Envisioned Scenarios", *Journal of Manufacturing Systems*, 56, 312-325.
- Machado, C. G. Winroth, M. P. and Ribeiro da Silva, E. H. D. (2020). "Sustainable Manufacturing in Industry 4.0: An Emerging Research Agenda", *International Journal of Production Research*, 58(5), 1462-1484.
- Makris, D. Hansen, Z.N.L. and Khan, O. (2019). "Adapting to Supply Chain 4.0: An Explorative Study of Multinational Companies", *Supply Chain Forum: An International Journal*, 20(2), 116-131.
- Mbuli, J.W. (2019). "A Multi-Agent System for the Reactive Fleet Maintenance Support Planning of a Fleet of Mobile Cyber-Physical Systems: Application to the Rail Transport Industry", *Automatic Control Engineering*, Université Polytechnique Hauts-de-France, 1-177.
- Mufazzal, S. and Muzakkir, S.M. (2018). "A New Multi-Criterion Decision Making (MCDM) Method Based on Proximity Indexed Value for Minimizing Rank Reversals", *Computers & Industrial Engineering*, 119, 427-438.
- Nujoom, R., Mohammed, A. and Wang, Q. (2019). "Drafting a Cost-Effective Approach Towards a Sustainable Manufacturing System Design", *Computers & Industrial Engineering*, 133, 317-330.
- Oliveira J, Carvalho G, Cabral B. and Bernardino J. (2020). "Failure Mode and Effect Analysis for Cyber-Physical Systems", *Future Internet*, 12(11:205), 1-18.
- Pamučar, D. and Ćirović, G. (2015). "The Selection of Transport and Handling Resources in Logistics Centers Using Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison (MABAC)", *Expert Systems with Applications*, 42(6), 3016-3028.
- Pamucar, D., Žižović, M., Biswas, S. and Božanić, D. (2021). "A New Logarithm Methodology of Additive Weights (LMAW) for Multi-Criteria Decision-Making: Application in Logistics", *Facta Universitatis Series: Mechanical Engineering*, DOI: <https://doi.org/10.22190/FUME210214031P>.

- Pascual, D.G., Pasquale D. and Uday, K. (2021). "The Industry 4.0 Architecture and Cyber-Physical Systems". *Handbook of Industry 4.0 and SMART Systems*, Editors: Diego Galar Pascual, Pasquale Daponte and Uday Kumar, Routledge Handbooks Online.
- Ribeiro, L. (2017). "Cyber-Physical Production Systems' Design Challenges", *IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 1189-1194.
- Shahi, C. and Sinha, M. (2021). "Digital Transformation: Challenges Faced by Organizations and Their Potential Solutions", *International Journal of Innovation Science*, 13(1), 17-33.
- Si, S-L. You, X.-Y. Liu, H.-C. and Zhang, P. (2018). "DEMATEL Technique: A Systematic Review of The State-Of-The-Art Literature on Methodologies and Applications", *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, 1-33.
- Silva, E. M. and Jardim-Goncalves, R. (2021). "Cyber-Physical Systems: A Multi-Criteria Assessment for Internet-Of-Things (IoT) Systems", *Enterprise Information Systems*, 15(3), 332-351.
- Stanković, M. Stević, Ž. Das, D. K. Subotić, M. and Pamučar, D. (2020). "A New Fuzzy MARCOS Method for Road Traffic Risk Analysis", *Mathematics*, 8(3), 457.
- Stević, Ž., Pamučar, D., Puška, A. and Chatterjee, P. (2020). "Sustainable Supplier Selection in Healthcare Industries using a New MCDM Method: Measurement of Alternatives and Ranking According to COmpromise Solution (MARCOS)", *Computers & Industrial Engineering*, 140, 106231.
- Zaoui, F. and Souissi, N. (2020). "Roadmap for Digital Transformation: A Literature Review", *Procedia Computer Science*, 175, 2020, 621-628.
- Zavadskas, E., Turskis, Z., Antucheviciene, J. and Zakarevicius, A. (2012). "Optimization of Weighted Aggregated Sum Product Assessment", *Elektronika ir Elektrotechnika*, 122(6), 3-6.

Appendix. Linguistic evaluations performed by DMs for the Alternatives

<i>Alternatives</i>	<i>DMs</i>	<i>C₁</i>	<i>C₂</i>	<i>C₃</i>	<i>C₄</i>	<i>C₅</i>	<i>C₆</i>	<i>C₇</i>	<i>C₈</i>	<i>C₉</i>	<i>C₁₀</i>
Alt.1	DM1	VH	H	H	AL	H	MH	H	L	VH	VL
	DM2	VH	VH	MH	L	VH	MH	H	VL	VH	L
	DM3	H	VH	H	L	VH	MH	H	VL	H	L
	DM4	VH	VH	H	L	VH	H	H	AL	VH	L
	DM5	H	VH	H	AL	VH	H	VH	AL	VH	L
Alt.2	DM1	MH	H	MH	AL	MH	MH	H	L	VH	M
	DM2	H	H	VH	AL	MH	H	MH	VL	VH	M
	DM3	H	MH	MH	L	VH	H	MH	L	VH	L
	DM4	VH	MH	VH	AL	MH	VH	H	L	VH	L
	DM5	H	MH	H	L	H	H	H	L	VH	L
Alt.3	DM1	L	L	VL	MH	VH	M	AL	VH	VH	MH
	DM2	L	AL	VL	MH	VH	MH	VL	VH	H	VH
	DM3	VL	L	AL	MH	VH	H	L	VH	MH	VH
	DM4	VL	L	VL	H	H	L	AL	VH	MH	MH
	DM5	L	L	AL	H	H	VL	AL	VH	MH	VH
Alt.4	DM1	M	M	MH	MH	H	M	MH	M	H	MH
	DM2	M	M	MH	MH	H	L	H	H	H	MH
	DM3	AL	MH	MH	VH	H	M	MH	H	MH	H
	DM4	M	MH	H	MH	H	L	MH	M	MH	H
	DM5	M	MH	H	MH	MH	L	H	H	H	M
Alt.5	DM1	MH	MH	M	MH	VL	L	H	L	MH	AL
	DM2	MH	AL	M	MH	VL	M	M	L	MH	L
	DM3	MH	MH	M	M	L	L	M	L	MH	L
	DM4	AL	MH	M	M	VL	L	M	L	H	L
	DM5	MH	MH	M	M	VL	L	M	L	H	AL
Alt.6	DM1	H	VH	L	VH	MH	H	H	VH	H	VH
	DM2	M	MH	L	VH	MH	H	MH	VH	M	VH
	DM3	M	MH	AL	VH	MH	MH	H	H	VH	VH
	DM4	M	VH	L	VH	MH	MH	MH	MH	VH	MH
	DM5	MH	MH	L	VH	H	H	VH	VH	VH	VH
Alt.7	DM1	VH	H	VH	MH	H	L	MH	M	H	H
	DM2	H	H	H	VH	H	L	H	H	H	H
	DM3	H	H	VH	MH	MH	M	H	M	MH	H
	DM4	MH	H	H	VH	H	L	H	M	H	H
	DM5	MH	H	H	MH	H	L	H	L	H	M
Alt.8	DM1	MH	M	MH	VH	H	M	MH	VH	VH	MH
	DM2	MH	M	MH	H	H	M	H	VH	MH	VH
	DM3	M	L	MH	VH	H	VH	MH	MH	H	VH
	DM4	M	L	H	VH	H	M	H	H	VH	MH
	DM5	M	L	MH	H	VH	M	MH	VH	VH	MH
Alt.9	DM1	VH	H	H	VH	VH	VL	M	MH	H	VH
	DM2	VL	VH	VH	H	VH	VL	VL	MH	H	MH
	DM3	VL	H	VH	H	H	M	VL	MH	MH	VH
	DM4	L	H	VH	M	H	VL	VL	H	MH	VH
	DM5	L	H	VH	H	H	VL	M	H	H	H

DİJİTAL OLGUNLUK İNDEKSİ: ORGANİZASYONLARIN DİJİTAL DÖNÜŞÜM YOLCULUĞUNDA VERİMLİLİĞİ ARTIRMAK İÇİN BİR KANTİTATİF YÖNTEM

Umut ŞENER¹, Ebru GÖKALP², Pekin Erhan EREN³

ÖZET

Amaç: Literatürde dijital dönüşüm için geliştirilmiş olgunluk modellerinin incelenmesi ve yeni bir indeks yapısının temellerinin oluşturulması hedeflenmektedir. Böylece, işletmelerin mevcut dijital dönüşüm düzeylerini analiz edebilmesi, diğer işletmelerle objektif bir şekilde kıyas yapabilmesi, etkin bir şekilde dijital dönüşümü yönetebilmesi ve verimliliğini artırması beklenmektedir.

Yöntem: Sistematik literatür taraması sonucunda tespit edilen 23 Olgunluk Modeli kapsam, amaca uygunluk, boyutların tamlığı gibi bir dizi kritere göre karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Belirlenen eksiklikleri gidermek amacıyla işletmelerin dijital dönüşüm yeteneklerini kantitatif olarak değerlendiren yeni bir dijital olgunluk indeksi önerilmiştir.

Bulgular: Analiz edilen olgunluk modellerinden hiçbiri beklenen kriterleri tam olarak karşılamadığından iyileştirilmeleri gerekmektedir. Bu çalışmada, 'Strateji, Bilgi Teknolojileri, İnsan, Veri ve Süreçler' boyutlarının değerlendirilmesinden oluşan bütünsel bir yaklaşım sunulmuştur.

Özgünlük: İşletmeler dijital dönüşüm yolculuğunda kaynaklarını en verimli şekilde kullanarak, nereden başlanması ve nelerin yapılması gerektiğiyle ilgili bir yol haritası eksikliği yaşamaktadır. Bu çalışma, yatırım geri dönüş oranı en yüksek dijital dönüşüm projelerinin takvimini içeren bir rehberlik sunarak bu alandaki literatüre katkı sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Endüstri 4.0, Dijital Dönüşüm, Verimlilik, Sistematik Literatür Taraması.

JEL Kodları: D24, M15, O14, O32.

DIGITAL MATURITY INDEX: A QUANTITATIVE METHOD TO INCREASE EFFICIENCY IN ORGANIZATIONS' DIGITAL TRANSFORMATION JOURNEY

ABSTRACT

Purpose: It is aimed to examine the maturity models developed for digital transformation in the literature and to establish the foundations of a new index structure. Thus, it is expected that businesses will be able to analyze their current digital transformation levels, objectively compare with other businesses, manage digital transformation effectively, and increase their productivity.

Methodology: 23 Maturity Models, which are determined as a result of systematic literature review, were analyzed by comparing them according to a set of criteria such as scope, suitability for purpose, and completeness of dimensions. In order to eliminate the identified deficiencies, a new digital maturity index that quantitatively evaluates the digital transformation capabilities of enterprises is proposed.

Findings: None of the analyzed maturity models fully meet the expected criteria and need to be improved. This study presents a holistic approach consisting of the evaluation of Strategy, Information Technologies, People, Data, and Processes dimensions.

Originality: In the digital transformation journey, businesses lack a roadmap about where to start and what to do by using their resources efficiently. This study will contribute to the literature in this field by providing a guideline that includes the calendar of digital transformation projects with the highest return on investment.

Keywords: Industry 4.0, Digital Transformation, Productivity, Systematic Literature Review.

JEL Codes: D24, M15, O14, O32.

¹ Arş. Gör., Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Enformatik Enstitüsü, Ankara, Türkiye, sumut@metu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1881-1886 (Sorumlu Yazar-Corresponding Author).

² Dr. Öğretim Üyesi, Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye, ebrugokalp@hacettepe.edu.tr, ORCID: 0000-0002-4030-2447.

³ Doç. Dr., Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Enformatik Enstitüsü, Ankara, Türkiye, ereren@metu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4354-3358.

1. GİRİŞ

Dijital dönüşümün temel amacı, kuruluşların yenilikçi bilgi teknolojilerini kullanarak birbirine bağlı, akıllı ve kendi kendini optimize eden bir sisteme sahip olmalarını sağlamaktır (Reiner, 2014). Nesnelerin İnterneti (IoT), endüstriyel kablosuz ağlar, bulut bilişim, veri analitiği, mobil ve yaygın bilişim ve artırılmış gerçeklik gibi bazı yenilikçi teknolojiler, geleneksel üretim ortamından akıllı üretim ortamına geçişi desteklemektedir. Üretim yapan işletmelerin, bu teknolojik gelişmelerle birlikte sürekli olarak değişime uğraması kaçınılmazdır. 2012 yılında Alman hükümeti tarafından, akıllı üretim sistemlerinin uygulanmasını hedefleyen stratejik bir yol haritası olarak “Yüksek Teknoloji Stratejisi 2020 Eylem Planı” (Kagermann ve diğerleri, 2013) adlı raporun yayınlanmasıyla birlikte, üretim sistemlerinde akıllı teknolojiler kullanılarak fiziksel sistemlerden siber-fiziksel sistemlere (SFS) dönüşüm devrimi olan ve “Endüstri 4.0” olarak adlandırılan yeni bir dönem başlamıştır. Bu strateji sadece Almanya’yı kapsamamaktadır, benzer stratejiler diğer ülkeler tarafından da önerilmektedir. Örneğin ABD tarafından “Endüstriyel İnternet”, Japonya tarafından “e-fabrika” ve İsviçre tarafından “Endüstri 2025” olarak adlandırılan stratejiler de yenilikçi teknolojilerin üretim sistemlerinde uygulanmasını kapsamaktadır.

Dijital dönüşüm sayesinde kurum içi süreçlerin akıllı teknolojiler ile birleştirilerek tamamen bütünleşmiş siber-fiziksel yapılar haline dönüştürülmesi hedeflenmektedir. Böylece, iş süreçleri “dijital ikiz” diğer deyişle “siber ikiz” dijital olarak temsil edilebilir ve yönetilip, koordine edilebilir. Bu dönüşüm tedarik zincirlerinde, iş modellerinde ve süreçlerde önemli değişiklikler getirmekle beraber işletme verimliliğini çeşitli yönlerden önemli derecede artırma potansiyeline sahiptir. İşletmelere esneklik; optimize edilmiş karar verme kabiliyeti, kaynak verimliliği ve üretkenliği; yeni hizmetler aracılığıyla değer fırsatları yaratmak, işyerindeki demografik değişime yanıt vermek; geliştirilmiş iş-yaşam-dengesi, kişiselleştirilmiş müşteri isteklerini karşılama gibi önemli avantajları sunmaktadır. Tarasov (2018), bu yenilikçi teknolojilerin kullanılmasıyla, hem üretim birimlerindeki plansız duruş sayısının hem de reaktif kaza hasar kontrolü için harcanan zamanın önemli ölçüde azaldığını ve koruyucu ve önleyici bakımın sağlandığını göstermiştir. Bu teknolojilerin Almanya’da üretim sektöründeki verimliliğe etkisini inceleyen Rüßmann ve diğerleri (2015) en çok otomotiv sektöründe verimlilik artışı olduğunu ve üretim yapan kuruluşların %20’den %30’a kadar verimliliklerini artırdıklarını göstermiştir. Tüm bu avantajlar nedeniyle, gelecek 5-10 yıl içerisinde bu teknolojilerin daha fazla yaygınlaşacağı öngörülmektedir. Bu nedenle işletmeler, dijital dönüşüm kapsamında kendi stratejilerini belirleyip bir rehber kılavuzdan faydalanarak pazarda rekabetçi kalmanın ve Endüstri 4.0 uygulamalarının getirilerinden faydalanmanın yollarını aramaya başlamışlardır.

İşletmelerin dijital dönüşüm alanında etkin bir strateji geliştirebilmesi, ülkelerin sürdürülebilir sanayi politikaları ile yakından alakalıdır. İşletmeleri yenilikçi teknolojileri kullanmaya teşvik edecek mekanizmaların oluşturulması, ilgili düzenlemelerin yapılması konusundaki politikalar büyük önem taşımaktadır. Türkiye’de sürdürülebilir sanayi politikalarının uygulanması konusunda yapılan bir çalışmada (Fidan, 2020) sanayi politikalarının uygulanmasının kaçınılmaz olduğu görülmüştür. Kamu, sivil toplum kuruluşları (STK) ve özel sektör temsilcileriyle yapılan görüşmeler analiz edilmiş ve sonuçlar paylaşılmıştır. Çalışma sonuçları göstermiştir ki; Türkiye’de sürdürülebilir sanayi ile ilgili toplumsal bilinç arttıkça ve kaliteli seçkin örnek uygulamalar çoğaldıkça, sürdürülebilir sanayi politikalarının da uygulanması ve yaygınlaşması kolaylaşacaktır. Böylece, işletmeleri besleyen daha güçlü bir ekosistem oluşacaktır.

Danimarka Endüstri 4.0 Hazırlık İndeksi’ne (Faarup ve Faarup, 2017) göre Türkiye ekonomisi için üretim çok kritik olmasına rağmen, Türkiye’deki üretim işletmeleri bu dijital dönüşüme henüz tam olarak hazır değildir. İşletmeler verimliliklerini artırmak ve daha fazla kazanç elde etmek için Endüstri 4.0 teknolojilerini uygulama konusunda bir kılavuz tanımlamanın ve strateji oluşturmanın yüksek derecede önemli olduğunu kavramışlardır. Buna rağmen işletmelerin büyük bir kısmı, özellikle küçük ve orta ölçekli işletmeler, bu yenilikçi teknolojik gelişmeleri değerlendirip faydalanmakta ve kendi kurumsal stratejilerini geliştirmekte zorluk çekmektedir. Bu işletmeler rekabet edebilmek ve pazarda ayakta kalabilmek için iş süreçlerindeki verimliliklerini artırmaya ve son gelişmelere göre süreçlerini yeniden şekillendirmeye çalışmaktadır. Ancak bu dijital dönüşüm yolculuğunda kaynakları en verimli şekilde kullanarak nereden başlanması ve nelerin yapılması gerektiğiyle ilgili bir yol haritası oluşturmada sorunlar yaşanmaktadır.

Olgunluk modeli (OM), işletmelerin dijital dönüşüm için yol haritası oluşturmasını destekleyen sistematik bir yöntem sunmaktadır. OM yaklaşımları, önceden tanımlanmış, farklı parametrelere göre işletmelerin mevcut performans düzeylerinin değerlendirilmesi ve bir sonraki düzeye ilerlemeleri için yol haritası sağlamak amacıyla geliştirilmiş yapılarıdır. Böylece işletmelerin belirlenen hedeflere yönelik mevcut performanslarını geliştirmelerine yardımcı olup daha yüksek düzeye ulaşmak için yeteneklerini geliştirmelerine rehberlik etmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu kapsamda, bu çalışma için aşağıdaki araştırma soruları belirlenmiştir:

- Dijital dönüşüm yolculuğunda kaynakların en verimli şekilde kullanılarak nereden başlanması ve nelerin yapılması gerektiğiyle ilgili işletmeye özel yol haritası nasıl geliştirilebilir?
- İşletmelerin süreç verimliliğini artırmak amacıyla geliştirilmiş literatürdeki dijital dönüşüm/Endüstri 4.0 OM'leri nelerdir?
- Literatürdeki mevcut dijital dönüşüm/Endüstri 4.0 OM'leri gereksinimleri karşılıyor mu?

Bu doğrultuda bu çalışmanın amacı (1) işletmelerin dijital dönüşüm/Endüstri 4.0 bağlamında mevcut performans ve yeteneklerini değerlendiren, (2) dijital dönüşüm yolculuğunda kaynakların en verimli şekilde kullanılarak nereden başlanması ve nelerin yapılması gerektiğiyle ilgili işletmeye özel yol haritası geliştiren ve (3) diğer işletmeler ile objektif ve standart bir şekilde performans kıyaslaması yapabilecek bir olgunluk indeksi geliştirmek olarak belirlenmiştir. Geliştirilen indeks yapısıyla, işletmelerin mevcut olgunluk düzeyini belirleyip daha iyi bir olgunluk düzeyine ulaşmaları için kuruluşa özel yol haritası sunularak, işletme verimliliğini artırmaya katkı sağlanacaktır. Çalışmanın ana katkıları yapılan sistematik literatür taraması ile literatürdeki dijital olgunluk modellerinin detaylı bir şekilde incelenmesi, literatürdeki eksikliğin tespiti ve bu eksikliği gidermek amacıyla dijital olgunluk indeks yapısı önerilmesidir. Önerilen indeks yapısı ile dijital dönüşüm değerlendirmesinin objektif ve kantitatif bir şekilde yapılması için ortak bir temel oluşturmak, böylece işletmelerin mevcut durumlarını analiz ederek, diğer işletmelerle objektif bir şekilde kıyas yapılmasını sağlamak, verimli bir şekilde dijital dönüşümün sağlanması için yatırım geri dönüş oranı en yüksek projelere öncelik verilerek, ekonomik faydaları en üst düzeye çıkarmak ve gerçekleşen dijital dönüşüm sayesinde iş süreçlerinin verimliliğinin artmasını sağlamak amaçlanmaktadır.

Bu makalede, literatür taraması sonuçları Bölüm 2'de sunulduktan sonra önerilen yaklaşım Bölüm 3'te özetlenip detaylı olarak açıklanmıştır. Son bölümde ise çalışmanın sonucu özetlenmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Endüstri 4.0 ve Dijital Dönüşüm

Dördüncü Endüstri Devrimi, IoT teknolojilerinin imalat süreçlerinde kullanılmasıyla beraber SFS'nin ortaya çıktığı bir sanayi devrimi olarak bilinmektedir (Shrouf ve diğerleri, 2014). IoT teknolojilerinin üretim ekosisteminde yoğun olarak kullanılmaya başlanmasıyla beraber SFS'lerin üretim sektöründe köklü değişikliklere yol açması kaçınılmaz olmuştur. Üretim süreçlerinde otomasyon, esneklik ve verimliliğin artışı gibi işletmeye değer katan yenilikçi üretim yapılarına geçiş süreci ile birlikte işletmeler dijital dönüşüm sürecine girmişlerdir. Endüstri 4.0 terimi olarak da bilinen bu devrim, Acatech (Schuh ve diğerleri, 2017) tarafından " ... SFS'nin üretim ve lojistik alanlarına teknik olarak birleştirilmesi ve endüstriyel süreçlerde Nesnelerin ve Hizmetlerin İnterneti kullanımıdır. Bu yapının; değer yaratma, yeni iş modelleri yaratma, alt hizmetler ve iş organizasyonu üzerinde etkilerinin olması kaçınılmazdır" şeklinde tanımlanmıştır.

Endüstri 4.0 birbirine bağlı, akıllı ve kendi kendini kontrol eden süreç ve sistem yapılarının uygulanmasını hedefler (Reiner, 2014). Bu nedenle, Endüstri 4.0 kapsamında tanımlanan yenilikçi teknolojileri kullanan işletmeler, daha esnek, güvenilir ve verimli operasyonlar elde ederek işletme kazanımlarını artırmayı başarabilir. Bu yenilikçi teknolojiler aynı zamanda yeni iş fırsatları ve iş modellerinin ortaya çıkmasını da destekleyen yıkıcı bir teknolojik gelişme olarak değerlendirilir (Kagermann ve diğerleri, 2013). Bu devrim hala döneminin ilk aşamasında olmasından dolayı endüstride başarılı bir uygulama için Endüstri 4.0 teknolojilerinin uygulama kılavuzlarına sahip olmak büyük önem arz etmektedir. İşletmeleri dijital dönüşüm kapsamında destekleyecek olan bu kılavuzların yapısını ve uygulama yöntemini tanımlamak esastır. Üretim ve hizmet sektöründe verimliliği artırmak ve daha iyi bir dijital olgunluğa erişebilmek için aşağıdaki bölümde tartışıldığı gibi çeşitli OM'ler geliştirilmiştir. Ancak bu geliştirilen OM'lerin kantitatif bir şekilde değerlendirmesi literatürde mevcut değildir. Bu çalışmanın amacı literatürdeki bu eksikliği gidermek için mevcut dijital OM'leri inceleyerek detaylı analiz etmektir.

3. YÖNTEM

Bu bölümde yapılan sistematik literatür taraması kapsamında izlenen yöntem anlatılmıştır.

Kitchenham (2004) tarafından ortaya konulmuş sistematik literatür taraması yöntemi izlenerek dijital dönüşüm kapsamında işletmelerin verimliliğini artırmak için kullanılan Dijital Dönüşüm/Endüstri 4.0 OM'leri belirlenmiştir. Bu yöntemin seçilme nedeni yazılım yönetimi ve bilişim sistemleri alanında genel kabul görmüş bir yöntem olmasıdır. Literatür taraması sonucunda tespit edilen modeller, Tablo 1'de detaylı bir şekilde analiz edilerek sunulmuştur.

Sistematik literatür taraması ilgili adımlar takip edilerek yapılmıştır. Dijital dönüşüm kapsamında geliştirilen dijital dönüşüm başarı modelleri, teknolojik olarak dijital dönüşüme hazırlık modelleri ve OM'lerin incelenmesi çalışmanın başlangıç noktası olarak belirlenmiştir. Araştırma dili İngilizce ve Türkçe olarak seçilmiştir. Anahtar kelimeler "Industry 4.0", "Industrial Internet of Things", "Industry Internet", "Industrial

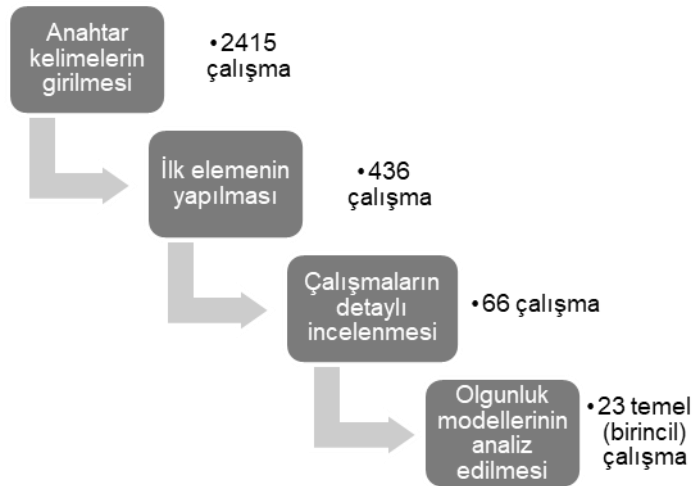
Internet", "Cloud-based Manufacturing", "Digitization", "Smart Manufacturing", "Cyber-physical systems", "Smart Factory", "Ubiquitous Manufacturing", "Maturity" ve "readiness" olarak belirlenmiştir. Scopus (www.scopus.com/search/form.url), Aisel (www.aisel.aisnet.org) ve Web of Science (<http://apps.webofknowledge.com/>) veri tabanları kullanılmıştır. Scopus'ta 309, Aisel'de 1682 ve Web of Science'da 424 makale bulunmuştur. Ek olarak, makalelerin referans çalışmaları da incelenmiştir. SSCI, SCI ve AIS indeksli makaleler araştırma sonuçları arasından seçilmiştir. Seriler, toplantı notları ve eleştiri çalışmaları incelenecek kaynak listesine dâhil edilmemiştir. Elde edilen makaleler ve araştırma sonuçları MS Excel'de kaydedilmiştir.

Temel çalışmalar başlangıç elemesi, atıf arama ve basım tarihi kontrolü olmak üzere üç aşamalı eleme gerçekleştirilerek belirlenmiştir. Başlangıç elemesi aşamasında çalışmayı tamamen okumadan önce, başlık, anahtar kelimeler ve özet okunarak çalışmaların araştırma konusu kapsamına uygun olup olmadığı belirlenmiştir. Atıf arama aşamasında ise makalelerin indeksleri kontrol edilip SSCI, SCI ve AIS indeksli olmayan çalışmalar filtrelenmiştir. Son olarak, basım tarihi 2010 öncesi olan makalelerin araştırma sonuçlarından filtrelenmesine karar verilmiştir. Araştırma kapsamında elde edilen tüm çalışmalar 2014 ve sonrasında yayınlandığı için bu aşamada eleme yapılamamıştır.

Belirlenen bu kriterler doğrultusunda eleme yapıldıktan sonra Scopus'ta 94, Aisel'de 199 ve Web of Science'da 143 çalışma kalmıştır. Toplamda 436 makale incelenmiştir. Çalışmaların başlık ve özetleri değerlendirilerek alâka düzeyi incelenmesinin ardından gerçekleştirilen ikinci elemeyen sonra ise geriye 66 çalışma kalmıştır.

Çalışmaların kalitesinin değerlendirilmesi amacıyla, belirlenen 66 çalışma incelenmiş olup bunlardan 23'ünün Endüstri 4.0 kapsamında dijital dönüşümün işletmelerdeki "olgunluk" veya "teknolojik hazırlık" konularını araştırdığı görülmüştür. 3 makalede olgunluk indeksi kapsamında boyut tanımlanmamıştır. Özetle, çalışmanın temel (birincil) çalışmaları belirlenmiştir. Sonrasında, temel çalışmalar ve onlara ait referans çalışmalar detaylı olarak incelenerek, literatürdeki mevcut OM'ler analiz edilmiştir.

Değerlendirme sonuçları ışığında, işletmelerin Endüstri 4.0 bağlamında dijital olgunluğunu araştıran temel çalışmalar belirlenmiştir. Şekil 1'de gösterilen literatür taraması aşamaları uygulanarak yapılan detaylı bir analiz sonucunda sadece 23 çalışmanın dijital dönüşüm-Endüstri 4.0 olgunluğu araştırdığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 1. Sistemik literatür taraması aşamaları

4. BULGULAR

Sistemik literatür taraması sonucunda elde edilen birincil çalışmaların içerdiği OM'ler Tablo 1'de detaylı olarak analiz edilmiştir. Tablo 2'de açıklandığı gibi bir takım değerlendirme kriterleri belirlenerek, temel çalışmalardan elde edilen OM'ler incelenmiştir. Sonuç olarak, literatürde mevcut her bir OM'nin güçlü ve zayıf yönleri sistemik bir şekilde belirlenmiştir. Bu bulgular ışığında, birçok yönden daha kapsamlı yeni bir OM önerilmesi hedeflenmiştir. Tablo 1'de analiz edilen temel çalışmalar ile ilgili değerlendirme notları aşağıda listelenmiştir.

Tablo 1. Endüstri 4.0-Dijital dönüşüm olgunluk modelleri

<i>Model No</i>	<i>Model/ Çalışma Adı</i>	<i>Araştırma Alanı</i>	<i>Olgunluk Seviyeleri</i>	<i>Boyutlar</i>	<i>Akademik Çalışma / Ticari Ürün</i>	<i>Modele Erişim</i>
OM ₁ (Rockwellautomation, 2014)	The Connected Enterprise Maturity Model	Bilgi teknolojileri hazırlık modeli	5 olgunluk seviyesi	Teknolojik hazırlık ile ilgili 4 boyut	Ticari Ürün	Hayır
OM ₂ (Lichtblau ve diğerleri, 2015)	IMPULS – Industrie 4.0 Readiness	Endüstri 4.0 hazırlık	6 olgunluk seviyesi	6 boyut (Strateji ve Organizasyon, Akıllı Fabrika, Akıllı Operasyonlar, Akıllı Ürünler, Veriye Dayalı Hizmetler ve Çalışanlar)	Ticari Ürün	Hayır
OM ₃ (Lanza ve diğerleri, 2016)	Empowered and Implementation Strategy for Industry 4.0	Endüstri 4.0 uygulama stratejileri	-	-	Akademik Çalışma	-
OM ₄ (PricewaterhouseCoopers, 2016)	Industry 4.0 / Digital Operations Self-Assessment	Endüstri 4.0 dijital hazırlık	3 olgunluk seviyesi	6 boyut (İş Modelleri; Ürün ve Hizmet; Portföy Pazarı ve Müşteri Erişimi; Değer Zincirleri ve Süreçler; BT Mimarisi; Uyumluluk, Hukuk, Risk, Güvenlik ve Vergi; Organizasyon ve Kültür)	Ticari Ürün	Hayır
OM ₅ (Schumacher ve diğerleri, 2016)	A Maturity Model For Industry 4.0 Readiness	Endüstri 4.0 olgunluk modeli	1-4 ölçeği	8 boyut (Strateji, Liderlik, Müşteri, Ürünler, Operasyonlar, Kültür, İnsanlar, Yönetişim, Teknoloji)	Akademik Çalışma	Evet
OM ₆ (Menon ve diğerleri, 2016)	Towards a Maturity Model for Industrial Internet	Endüstriyel İnternet olgunluğu	-	-	Akademik Çalışma	-
OM ₇ (Leyh ve diğerleri, 2016), (Leyh ve diğerleri, 2017)	SIMMI 4.0	Endüstri 4.0 olgunluk modeli	5 olgunluk seviyesi	3 boyut (Dikey Entegrasyon, Yatay Entegrasyon, Enlemesine Teknoloji Kriterleri)	Akademik Çalışma	Hayır
OM ₈ (Ganzarain ve Errasti, 2016)	Three-Stage Maturity Model in SME's Towards Industry 4.0	Endüstri 4.0 olgunluk modeli	6 olgunluk seviyesi	3 boyut (Tasarım, Etkinleştir, Gerçekleştir)	Akademik Çalışma	Hayır
OM ₉ (Gökalp ve diğerleri, 2017)	Development of an Assessment Model for Industry 4.0: Industry 4.0-MM	Endüstri 4.0 olgunluk modeli	6 olgunluk seviyesi	5 boyut (Varlık Yönetimi, Veri Yönetimi, Uygulama Yönetimi, Süreç Dönüşümü ve Örgütsel Uyum)	Akademik Çalışma	Hayır
OM ₁₀ (Sternad, 2018)	Maturity Levels for Logistics 4.0 Based on NRW's Industry 4.0 Maturity Model	Lojistik 4.0 olgunluk modeli	5 olgunluk seviyesi	4 boyut (Satın alma, kurum içi, dağıtım ve satış sonrası lojistik)	Akademik Çalışma	Hayır
OM ₁₁ (Colli ve diğerleri, 2018)	Contextualizing the Outcome of a Maturity Assessment for Industry 4.0	Endüstri 4.0 olgunluk modeli	6 olgunluk seviyesi	5 boyut (Yönetişim, teknoloji, bağlana-bilirlik, değer yaratma, yetkinlik)	Akademik Çalışma	Hayır
OM ₁₂ (Akdil ve diğerleri, 2018)	Maturity and Readiness for Industry 4.0 strategy	Endüstri 4.0 olgunluk modeli	4 olgunluk seviyesi	3 boyut (Akıllı ürünler ve hizmetler, Akıllı iş süreçleri, Strateji ve Organizasyon)	Akademik Çalışma	Evet
OM ₁₃ (Schuh ve diğerleri, 2017)	Acatech Industry 4.0 Maturity Index	Endüstri 4.0 olgunluk modeli	6 olgunluk seviyesi	6 boyut (Kaynaklar, bilgi sistemleri, organizasyon yapısı, kültür)	Ticari Ürün	Hayır

Tablo 1. (Devamı)

Model No	Model/ Çalışma Adı	Araştırma Alanı	Olgunluk Seviyeleri	Boyutlar	Akademik Çalışma / Ticari Ürün	Modele Erişim
OM ₁₄ (Asdecker ve Felch, 2018)	Delivery Process Maturity Model (DPMM 4.0)	Endüstri 4.0 tedarik zinciri olgunluk modeli	5 olgunluk seviyesi	3 süreç (Sipariş işleme, depolama, nakliye)	Akademik Çalışma	Hayır
OM ₁₅ (Bibby ve Dehe, 2018)	The Management of Operations Defining and Assessing Industry 4.0 Maturity Levels – Case of the Defense Sector	Savunma sanayii için Endüstri 4.0 olgunluk modeli	4 olgunluk seviyesi	3 boyut (Geleceğin fabrikası, insan ve kültür, strateji)	Akademik Çalışma	Evet
OM ₁₆ (Sjödın ve diğerleri, 2018)	Smart Factory Implementation and Process Innovation- A Preliminary Maturity Model for Leveraging Digitalization in Manufacturing	Akıllı fabrika olgunluk modeli	4 olgunluk seviyesi	3 boyut (insanlar, süreç, teknoloji)	Akademik Çalışma	Hayır
OM ₁₇ (Santos ve Martinho, 2019)	An Industry 4.0 Maturity Model Proposal	Endüstri 4.0 olgunluk modeli	6 olgunluk seviyesi	6 boyut (kuruluş stratejisi, yapısı ve kültürü; işgücü; akıllı fabrikalar, akıllı süreçler; akıllı ürünler ve hizmetler)	Akademik Çalışma	Evet
OM ₁₈ (Rafael ve diğerleri, 2020)	A Maturity Model for Machine Tool Companies	Makine aracı firmaları için Endüstri 4.0 olgunluk modeli	6 olgunluk seviyesi	5 boyut (Strateji ve organizasyon; akıllı fabrika; akıllı operasyonlar; akıllı ürünler; veriye dayalı hizmetler)	Akademik Çalışma	Evet
OM ₁₉ (Lin ve diğerleri, 2020)	To Assess Smart Manufacturing Readiness by Maturity Model : A Case Study on Taiwan Enterprises	Akıllı üretim hazırlık modeli	5 olgunluk seviyesi	3 boyut (süreç, teknoloji, organizasyon)	Akademik Çalışma	Hayır
OM ₂₀ (Facchini ve diğerleri, 2020)	A Maturity Model for Logistics 4.0 : An Empirical Analysis and a Roadmap for Future Research	Lojistik 4.0 olgunluk modeli	5 olgunluk seviyesi	4 boyut (satın alma, üretim, dağıtım ve satış sonrası lojistik)	Akademik Çalışma	Evet
OM ₂₁ (Glogovac ve diğerleri, 2020)	Total Quality Management & Business Excellence ISO 9004 Maturity Model for Quality in Industry 4.0	Endüstri 4.0 kalitesi için olgunluk modeli	Yok	Yok	Akademik Çalışma	Evet
OM ₂₂ (Rauch ve diğerleri, 2020)	A Maturity Level-Based Assessment Tool to Enhance the Implementation of Industry 4.0 in SMEs	Endüstri 4.0 olgunluk modeli	5 olgunluk seviyesi	4 boyut (Operasyonlar; organizasyon; sosyo-kültür; teknoloji) ve 21 alt boyut	Akademik Çalışma	Evet
OM ₂₃ (Caiado ve diğerleri, 2021)	A Fuzzy Rule-Based Industry 4.0 Maturity Model for Operations and Supply Chain Management	Endüstri 4.0 olgunluk modeli	6 olgunluk seviyesi	3 boyut (Tedarik zinciri yönetimi; COMMON; POM)	Akademik Çalışma	Evet

OM₁: Boyutlar ve bunların oluşturulması ile ilgili detaylı bilgi verilmemiştir (Schumacher ve diğerleri, 2016). Model sadece işletmelerin teknolojik hazırlığı konusunu incelemektedir.

OM₂, OM₄, OM₁₃: Değerlendirme yöntemi hakkında detaylı olarak bilgi verilmemiştir.

OM₃: Olgunluk modeli hakkında bilgi paylaşılmamıştır.

OM₅, OM₁₂, OM₁₇: Olgunluk seviyelerini belirlemek için nesnel olarak ölçülebilir ölçümler yoktur. Sübjektif yargıya dayalı olarak, olgunluk indeksi hesaplanmaktadır.

OM₆: Araştırma henüz tamamlanmadığı için olgunluk modeline ilişkin herhangi bir bilgi bulunmamaktadır.

OM₇: Araştırma henüz tamamlanmadığı için olgunluk modeline ilişkin detay seviyede çok az bilgi bulunmaktadır.

OM₈: KOBİ'ler, Endüstri 4.0 hedeflerini geliştirmek amacıyla mevcut kapasitelerini ve kaynaklarını analiz edebilmek için gereken deneyim ve uzmanlığa sahip olamayabilirler. Net talimatların yokluğunda, KOBİ'lerin öz değerlendirme yapması kolay bir iş olmayacaktır. Bu amaç için bir danışman kiralamak, KOBİ'lerin finansal kısıtlamaları göz önüne alındığında uygun bir seçenek olmayabilir. Bu çalışma KOBİ'leri desteklemek için geliştirilse de uygulanabilmesi için iyileştirilmesi gerekmektedir. (Mittal ve diğerleri, 2018).

OM₉: Olgunluk modelinin boyutları ve her boyuta ait olgunluk seviyeleri detaylı olarak tanımlanmasına rağmen, ölçüm göstergeleri ve değerlendirme yönteminin uygulanmasını kapsayan bir keşif vaka çalışmasını içermemektedir.

OM₁₀, OM₁₄, OM₂₀: Modeller sadece tedarik zinciri ya da lojistik faaliyetlerinin dijital olgunluk düzeylerini değerlendirmektedir. Önerilen modeller işletmenin diğer birimleri için uygulanabilir değildir.

OM₁₁: Model detayları açıklanmakla birlikte anket soruları, görüşme bulguları ve değerlendirmelerin detaylarına yer verilmemiştir. Yalnızca seçilen şirket için dijital dönüşüm bağlamında genel performans ve olgunluk indeksi paylaşılmıştır.

OM₁₅: Model, savunma sektörü dışındaki diğer sektörler için geçerli değildir. Ayrıca, boyutlar ve ilgili ölçüm özellikleri kapsamlı bir şekilde tanımlanmamıştır.

OM₁₆: Model birkaç firmada uygulanmasına rağmen, boyutların olgunluk seviyelerinin belirlenme süreci hakkında detaylı bilgi paylaşılmamıştır. Mülakat tekniği kullanılarak değerlendirme yapılmıştır.

OM₁₈: Model, çoğunlukla KOBİ'ler olmak üzere yalnızca takım tezgâhı şirketlerinin üretim olgunluğunun değerlendirilmesini amaçlamaktadır.

OM₁₉: Akıllı üretim olgunluk indeksi kümeleme analizi ile hesaplanmıştır. Mevcut olgunluk indeksi hesaplamalarından farklı bir yöntem kullanılmıştır.

OM₂₁: ISO 9004:2008'e dayalı kavramsal bir model, kalite yönetiminin olgunluk değerlendirmesi için geliştirilmiştir. Model yalnızca kalite faktörlerinden oluşmakta ve olgunluk boyutlarını ve bunlara karşılık gelen olgunluk düzeylerini içermemektedir.

OM₂₂: KOBİ'lerin Endüstri 4.0 uygulamalarına yönelik faaliyetlerinin değerlendirmek amacıyla geliştirilmiştir. Olgunluk düzeyleri, KOBİ'ler için yaklaşımı kolaylaştıran dilsel açıklamaya dönüştürülerek açıklanmış olsa da sübjektif yargıya dayalı olarak hesaplanmaktadır.

OM₂₃: Öz değerlendirme aracı, bulanık mantık ve Monte Carlo benzetimi ile birleştirilmiştir. Kullanılan yöntem istatistik ve benzetim modelleme alanında uzmanlaşmış yüksek vasıflı personel gerektirmektedir. Oysa ki bu her işletme için her zaman mümkün değildir. Özellikle KOBİ'ler için kolay uygulanabilir yapıda değildir.

Tablo 2. Mevcut OM'lerin analizi için belirlenen değerlendirme kriterleri

Kriter No	Kriter Adı	Açıklama
K ₁	Amaç için Uygunluk	İlgili OM'nin Endüstri 4.0 kapsamında dijital olgunluğuna yönelik çalışma olma durumu
K ₂	Boyutların Tamlığı	İlgili OM'nin Endüstri 4.0 kapsamında olan tüm temel boyutları içerip/içermeme durumu
K ₃	Boyutların Detay Seviyesi	İlgili OM boyutlarına karşılık gelen niteliklerin açıklamalarının ayrıntı düzeyi
K ₄	Ölçüm Özelliklerinin Tanımı	İlgili çalışmada ölçüm özelliklerinin ve yönteminin anlaşılır detayda açıklamasının olma durumu
K ₅	Değerlendirme Yönteminin Açıklaması	Çalışmanın değerlendirme yönteminin açıklamasının verilmesi durumu
K ₆	Değerlendirme Yönteminin Objektifliği	Çalışmanın olgunluk değerlendirme yönteminin nesnellik düzeyi. Niteliklerin ve olgunluğun her bir seviyesinin tanımları açık bir şekilde tanımlanmalıdır. Ve genel olgunluk düzeyi, olumlu yanıtlanan soruların sayısını doğru bir şekilde yansıtmalıdır.

Tablo 2'de daha önceden belirlenmiş kriterler (Şener ve diğerleri, 2019, 291-303) ışığında, mevcut OM'ler analiz edilmiştir. Değerlendirme yapılırken beş seviyeli bir ölçek kullanılarak kriterlerin başarı derecesini temsil eden derecelendirme kullanılmıştır. 5: çok yüksek oranda karşılanması, 4: yüksek oranda karşılanması, 3: orta seviyede karşılanması, 2: az derecede karşılanması, 1: ilgili kriterin model tarafından karşılanmaması ve 0: ilgili bilginin bulunmaması anlamına gelmektedir. Mevcut çalışmaları belirlenmiş bu kriterler doğrultusunda değerlendirmek için, dijital dönüşüm konusunda uzman olan üç kişi seçilmiştir. Uzmanlar, ilk aşamada mevcut çalışmaları bağımsız olarak değerlendirip değerlendirme notlarını kaydetmişlerdir. Sonrasında yapılan bir dizi toplantı sonrasında, her olgunluk modelinin değerlendirmesi fikir birliğine varılarak puanlanmıştır. Örneğin, OM₁, Amaç için Uygunluk kriteri olan K₁'i orta seviyede karşılamaktadır. Çünkü Model, Bilgi Teknolojileri hazırlık modeli olup, dijital dönüşüm-endüstri 4.0 kapsamında kurumun mevcut durumunun değerlendirilmesi amacına tam olarak hizmet edememektedir. Bu nedenle değerlendirme sonucu 3 olarak tespit edilmiştir. Bütün OM'ler bu şekilde tüm kriterlere göre değerlendirilmiş ve değerlendirme özeti Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Mevcut OM'lerin kriterler doğrultusunda analiz sonucu

Olgunluk Modeli	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆
OM ₁	3	3	2	2	4	3
OM ₂	4	5	4	3	3	3
OM ₃	5	0	0	0	0	0
OM ₄	4	4	5	3	2	2
OM ₅	5	4	3	4	5	2
OM ₆	5	0	0	0	0	0
OM ₇	5	3	3	3	1	1
OM ₈	5	3	3	2	2	2
OM ₉	5	5	5	2	1	0
OM ₁₀	3	1	3	2	2	2
OM ₁₁	5	3	3	2	3	1
OM ₁₂	5	3	5	5	5	1
OM ₁₃	5	5	5	5	4	2
OM ₁₄	3	1	3	2	1	5
OM ₁₅	3	1	3	2	2	2
OM ₁₆	4	3	3	2	2	1
OM ₁₇	5	5	4	2	3	1
OM ₁₈	3	5	5	3	3	1
OM ₁₉	2	2	3	3	5	5
OM ₂₀	3	1	3	3	5	3
OM ₂₁	2	0	0	0	5	1
OM ₂₂	5	4	4	4	5	3
OM ₂₃	5	3	3	4	5	5

Sistemik literatür taraması, son yıllarda Endüstri 4.0 ve dijital dönüşüm konusunda artan bir araştırma akışı olduğu, ancak bu kapsamda geliştirilen OM'lerin kullanımında sınırlı araştırma sayısı olması

nedeniyle bir araştırma boşluğu olduğunu göstermiştir. Mevcut OM'lerin en bariz eksikliği, işletmelerin kurumsal mimarisini bütünsel olarak desteklememeleridir. Ayrıca bu modellerin büyük bir kısmının, değerlendirme ve iyileştirme için bazı değerlendirme kriterleri ölçütlerini tam olarak karşılamadığı görülmüştür. Özellikle mevcut modellerin uygulanış yönteminin açık bir şekilde anlatılması, girdiler, çıktılar ve bunların ilişkilerinin eksiksiz olarak tanımlanması yönünden zayıf kaldığı görülmüştür. Bu çalışmalar arasında standart kabul görmüş bir yapıyı temel alarak geliştirilen ve tüm kriterleri yüksek oranda karşılayan bir model olmadığı gözlenmiştir. Örneğin OM₁₂ tüm kriterleri çok yüksek oranda karşılamasına rağmen, olgunluk değerlendirme yönteminin açık ve tam bir şekilde verilmesi konusunda eksiklikler olduğu, ayrıca değerlendirme niteliklerinin ve olgunluğun her bir seviyesinin tanımlarının tam ve açık bir şekilde verilmediği gözlenmiştir. Bu yüzden, yeni ve tüm bu ihtiyaçlara cevap veren bir Endüstri 4.0 değerlendirme/OM ihtiyacı geçerliliğini korumaktadır. Bu çalışmanın amacı, dijital dönüşüm için yeni bir OM önererek bu ihtiyacı karşılamaktır. Önerilen modelin geliştirilmesi bir sonraki bölümde verilmektedir.

5. DİJİTAL DÖNÜŞÜM OLGUNLUK İNDEKSİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Bu çalışma kapsamında, Endüstri 4.0 bağlamında dijital dönüşüm için yeni bir olgunluk indeksinin geliştirilmesi hedeflenmektedir. Geliştirilen bu olgunluk indeksi, Endüstri 4.0 kapsamında tanımlanan yenilikçi teknolojilerin, işletme süreçleri ile bütünleştirilerek kullanılması, işletme verimliliğini artırması ve katma değeri yüksek iş süreçlerine sahip olabilmeyi hedeflemektedir. Bu model ayrıca, dijital dönüşüm süreci için çeşitli boyutlarda bir yol haritası sunarak, işletmelerin sorunlu alanlarını ve zayıflıklarını gözlemlenmelerine ve dijital dönüşümü tutarlı bir şekilde uygulamalarına yönelik eksiksiz ve kapsamlı bir rehber sunmayı amaçlamaktadır. Yapılan detaylı sistematik literatür taramasının ardından, mevcut OM'lerin boyutları incelenerek, modelin içermesi gereken değerlendirme alanları listelenmiştir. Sektör deneyimine sahip dijital dönüşüm konusunda uzman olan üç kişi ile yapılan bir dizi toplantısı sonrası, modelde olması gereken boyutlar delphi yöntemi uygulanıp fikir birliğine varılarak belirlenmiştir. Önerilen olgunluk indeksi, olgunluk seviyeleri, boyutlar ve ilgili kantitatif indikatörlerden oluşmaktadır. Model bütüncül bir bakış açısına sahip olup; *Strateji, Bilgi Teknolojileri, İnsan, Veri ve Süreçler* olmak üzere 5 ana boyuttan oluşmaktadır. Her bir boyut aşağıdaki gibi tanımlanır ve kategorilere ayrılır:

Strateji: COBIT'e (2018) göre, bir yönetim sistemi oluşturmak ve sürdürülebilmek için gerekli temel bileşenler: süreçler, örgütsel yapılar, politikalar ve uygulama yöntemleri, bilgi akışları, kültür ve davranışlar, beceriler ile altyapı olarak tanımlanır. Belirlenen bu bileşenler, strateji boyutu altında ele alınıp incelenecektir. Strateji boyutu aşağıdaki alt boyutlarından oluşmaktadır:

- Organizasyonun dijital stratejisinin açık ve net olarak ifade edilmesi
- Dijital dönüşümle ilgili üst düzey yönetici faaliyetleri (Şener ve diğerleri, 2016; (Şener ve diğerleri, 2017) (Örneğin, dijital dönüşümün avantajları hakkında bilgi, bilgi teknolojileri (BT) yatırımı ve uygulama kararının alınması gibi stratejik önem içeren aktiviteler)
- Teknoloji yol haritasının çıkarılması
- Yönetim becerileri
- Organizasyondaki iletişim yapısı ve kalitesi
- Çalışanların dijital dönüşüm sürecine desteği
- Dijital kültürün işletmede yaygınlaştırılması

Bilgi Teknolojileri: Dijital dönüşüm, işletme süreçlerini iyileştirme için birçok son teknolojiyi kapsadığından, kurum içi altyapı ve BT kaynakları (örneğin: ağ teçhizatları, temel donanımlar ve diğer ikincil uygulamalar) değerlendirilmelidir. Endüstri 4.0 ile birlikte, otomasyon teknolojileriyle üretimin birleştirilmesi sonucunda devrim niteliğinde uygulamaların ortaya çıkması beklenmektedir (Kagermann, H., Helbig, J., Hellinger, A., & Wahlster, 2013). Bu kapsamda, işletmeler ve kullanıcılar için en iyi şekilde çalışan bilgi sistemlerinin en uygun ve güvenli bir şekilde tasarlanması ve kurulması amaçlanmaktadır. Uygulama yetenekleri, işi desteklemek için gereken işlevsel davranışa soyut bir bakış açısı sağlar. Uygulamaların ara yüzleri ve bilgi akışı yapılandırılmış, bağlantılı, standartlaştırılmış, kontrollü ve birlikte çalışabilir olmalıdır. Bu nedenle, işletmelerin mevcut BT altyapısı önem arz etmektedir. Bilgi Teknolojileri boyutu, işletmelerin BT sistemlerini ve dijital dönüşüm için teknolojik hazırlığı durumunu, gelişmiş en yeni iş teknolojilerinin kullanımını (örneğin, tedarik zinciri için blok zinciri kullanılması gibi) ve akıllı teknolojilerin güvenlik konularını değerlendirir. Endüstri 4.0'ın teknolojik temelleri birçok araştırmacı tarafından, kategorilere ayrıştırılarak vurgulanmaktadır (Gökalp ve diğerleri, 2017). Dijital dönüşüm süreci birçok teknolojiyi kapsadığı için bazıları sundukları işlevler ve yetenekler açısından örtüşse de, kullanılan temel teknolojiler şu şekilde listelenmiştir: Servis Odaklı Mimari; Bulut Bilişim (Xiong ve diğerleri, 2015; Schmidt ve diğerleri, 2015); Büyük Veri (Xiong ve diğerleri, 2015; Schmidt ve diğerleri, 2015); Nesnelerin İnterneti (IoT) (Xiong ve diğerleri, 2015); Endüstriyel Kablosuz Ağlar (Wan ve diğerleri, 2016); Siber-Fiziksel Sistemler (Hermann ve diğerleri, 2016); Arttırılmış Gerçeklik (Paelke, 2014); Makine Öğrenimi (Shin ve diğerleri, 2014); Siber Güvenlik (Hermann ve diğerleri, 2016).

BT yönetimi, aşağıdaki gibi birkaç alt alan aracılığıyla incelenir:

- Kurum içi teknolojiler
- BT stratejik yönetimi (örneğin; yeni bir sunucu satın alma kararı, IoT cihazları kullanma durumu, buluta geçiş, felaket sorunları için yedekleme planı vb.)
- Kurumsal Mimarinin dijital dönüşüm stratejisine göre analizi ve yapılandırılması
- Rakiplerin analizi ve Dijital Çözüm Satın alma

İnsan: Dijital dönüşüm için BT personeli beceri seti ve diğer temel insan kaynakları gereksinimlerinin önemli olması nedeniyle, insan boyutu, dijital dönüşüm için uygunluk modelinin ana yapılarından biri olarak önerilmektedir. Türkiye’de dijital dönüşüm konusunda: mevcut insan kaynağının dijital dönüşüme hazır hale getirilmesi, organizasyonların ele alması gereken en temel konular arasında görülmektedir (Gökalp ve diğerleri, 2019). İşletmelerdeki dijital dönüşümün istihdama olan etkisi kurum içi istihdam politikasını oluştururken dikkate alınmalıdır. İnsan boyutu aşağıdaki alt boyutları değerlendirmelidir:

- Roller ve teknik beceriler
- Değişime ve örgütsel değişime direnç
- Örgütsel yapı
- Örgüt kültürü (örneğin; öğrenen organizasyon)
- Yenilikçi fikirler
- Dijital teknolojilere/sistemlere duyulan güven
- Eğitim
- Rakipler
- Ekosistem Etkisi

Veri: Analitik ve Yönetişim alanındaki yeni teknolojiler, işletmelerin mevcut veya gelecekteki operasyonlarla ilgili gerçek zamanlı kararlar almalarını sağlar (Rüßmann ve diğerleri, 2015). Bu nedenle, bütünleşmiş ve otomatikleştirilmiş bir veri akışı hem işletme içinde hem de işletme dışında kritik öneme sahiptir. Veri boyutunun değerlendirilmesi için veri yönetimi adımları dikkate alınmalıdır. Bu boyut aşağıdaki gibi birkaç alt boyuta ayrılmıştır:

- Kurum içi kritik operasyonlar için veri toplama
- Bilgi yönetim sistemleri
- Veriye dayalı karar verme yapıları: toplanan verilerden değerli bilgilerin çıkarılması, karar verme süreçlerinin verimliliği, toplanan verilerin kullanım şekilleri
- Veri Analitiği yetenekleri

Süreçler: İşletmenin iş yapısına göre Endüstri 4.0'a dönüşüm başladıktan sonra kurumsal sistemin her bir süreci dijital dünya ile eşlenmelidir. Farklı katma değerli süreçler, kurumsal mimariye standart bir şekilde bütünleştirilmelidir. Bu nedenle bir organizasyonun süreçleri aşağıdaki gibi farklı alt alanlar üzerinden değerlendirilmelidir:

- Karar verme süreçleri (gerçek zamanlı, veriye dayalı karar verme, kendi kendine optimize edilmiş süreçler)
- Süreçlerde dijitalleşme ve süreç dönüşümü
- Veri toplama süreçleri
- Katma değerli süreçlerin yatay ve dikey bütünleştirilmesi

6. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Sistemik literatür taraması sonucunda 23 OM belirlenmiş ve bu modeller kapsam, amaca uygunluk, boyutların tamlığı, açık ve anlaşılır şekilde ifade edilmesi, değerlendirme yöntemlerinin nesnelliği gibi bir dizi kritere dayalı olarak karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Karşılaştırma sonucunda, mevcut OM'lerden hiçbirinin beklenen kriterleri tam olarak karşılamadığı ve iyileştirilmeleri gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada yeni bir yapı önerilmiştir. Önerilen yapı, Strateji, Bilgi Teknolojileri, İnsan, Veri ve Süreçler boyutlarının değerlendirilmesinden oluşan bütünsel bir yaklaşıma sahiptir. Böylece, organizasyonların mevcut dijital dönüşüm düzeyini değerlendiren ve bu dönüşüm yolculuğunda onlara bir yol haritası sunacak değerlendirme aracının temel çatısı oluşturulmuştur.

Önerilen indeks yapısı ile işletmeler dijital dönüşümlerini objektif ve kantitatif bir şekilde değerlendirebileceklerdir. Dijital dönüşüm yolculuğunda kaynakları en verimli şekilde kullanarak nereden başlanması ve nelerin yapılması gerektiğiyle ilgili bir yol haritasına sahip olacaklardır. Değerlendirmeler ışığında, dijital dönüşümlerini daha etkin gerçekleştirmek üzere yatırım geri dönüş oranı en yüksek projelere öncelik vererek ekonomik faydaları en üst düzeye çıkarabileceklerdir. Sağlanan rehberlik sayesinde, Nesnelerin İnterneti (IoT), bulut bilişim ve veri analitiği gibi Endüstri 4.0 kapsamında uygulanabilen çeşitli

teknolojileri iş süreçlerinde entegre bir şekilde kullanabilecekler, akıllı ve kendi kendini kontrol eden daha verimli iş yapılarına sahip olma imkânı elde edeceklerdir. Süreç verimliliğinin artması ile beraber, pazarda rekabet üstünlüğü elde edebileceklerdir.

Çalışmanın kısıtları, ticari ürün olarak kullanılan olgunluk modellerinin detaylarına erişim sağlanamaması, kısıtlı sayıda uzman ekibi ile delphi yönteminin uygulanması ve akademik veri tabanlarında taranan makalelerde referans verilmeyen ticari OM'lerin incelenmemesi olarak sıralanabilir.

Gelecekteki çalışmaların bir parçası olarak, anket yöntemiyle dijital dönüşüm alanında uzmanlara erişerek önerilen indeks yapısının iyileştirilmesi, her bir ana boyutun olgunluk düzeyinin ayrıntılı olarak tanımlanması ve kantitatif bir ölçme yöntemi geliştirilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca önerilen yapının kullanılabilirliğini ve uygulanabilirliğini doğrulamak için bir keşif vaka çalışması yapılması planlanmaktadır.

KAYNAKÇA

- Akdil, K.Y., Ustundag, A. ve Cevikcan, E. (2018). "Maturity and Readiness Model for Industry 4.0 Strategy", *Industry 4.0: Managing the Digital Transformation*, Editör: Pham, D.T., 61-94, DOI: 10.1007/978-3-319-57870-5_4.
- Asdecker, B. ve Felch, V. (2018). "Development of an Industry 4.0 Maturity Model for the Delivery Process in Supply Chains", *Journal of Modelling in Management*, 13(4), 840-883.
- Bibby, L. ve Dehe, B. (2018). "The Management of Operations Defining and Assessing Industry 4.0 Maturity Levels- Case of the Defence Sector", *Production Planning and Control*, 29(12), 1030-1043.
- Caiado, R.G.G., Scavarda, L.F., Gavião, L.O., Ivson, P., De Mattos Nascimento, D.L. ve Garza-Reyes, J.A. (2021). "A Fuzzy Rule-Based Industry 4.0 Maturity Model for Operations and Supply Chain Management", *International Journal of Production Economics*, 231.
- Colli, M., Madsen, O., Berger, U., Møller, C., Wæhrens, B.V. ve Bockholt, M. (2018). "Contextualizing the Outcome of a Maturity Assessment for Industry 4.0", *IFAC-Papers OnLine*, 51(11), 1347-1352.
- Faarup, J. ve Faarup, A. (2017). "Global Industry 4.0 Readiness Report 2016", Danish Institute of Industry 4.0 (DII 4.0).
- Facchini, F., Oleśków-Szlapka, J., Ranieri, L. ve Urbinati, A. (2020). "A Maturity Model for Logistics 4.0: An Empirical Analysis and a Roadmap for Future Research", *Sustainability*, 12(1), 86.
- Fidan, E. T. (2020). "Türkiye'de Sürdürülebilir Sanayi Politikalarının Uygulanması ve Kamu, Sivil Toplum Kuruluşları ve Özel Sektörün Sürdürülebilir Sanayi Politikalarına İlişkin Yaklaşımlarının Değerlendirilmesi", *Verimlilik Dergisi*, 2, 73-100.
- Ganزارain, J. ve Errasti, N. (2016). "Three Stage Maturity Model in SME's Toward Industry 4.0", *Journal of Industrial Engineering and Management*, 9(5), 1119.
- Glogovac, M., Ruso, J. ve Maricic, M. (2020). "ISO 9004 Maturity Model for Quality in Industry 4.0", *Total Quality Management & Business Excellence*, DOI:10.1080/14783363.2020.1865793.
- Gökalp, E., Gökalp, M.O., Çoban, S. ve Eren, P.E. (2019). "Dijital Dönüşümün Etkisinde Verimli İstihdam Yönetimi: Yol Haritası Önerisi", *Verimlilik Dergisi*, 3, 201-222.
- Gökalp, E., Şener, U. ve Eren, P.E. (2017). "Development of an Assessment Model for Industry 4.0: Industry 4.0-MM", *International Conference on Software Process Improvement and Capability Determination*, 128-142. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2017.03.004>.
- Kagermann, H., Wahlster, W. ve Helbig, J. (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, https://essay.utwente.nl/70665/1/Balasingham_BA_MA.pdf, (Erişim tarihi 15.08.2021).
- Kitchenham, B. (2004). "Procedures for Performing Systematic Reviews", Keele, UK, Keele University, 33(TR/SE-0401),28. http://www.elizabete.com.br/rs/Tutorial_IHC_2012_files/Conceitos_RevisaoSistematica_kitchenham_2004.pdf, <https://doi.org/10.1.1.122.3308>, (Erişim tarihi 15.08.2021).
- Lanza, G., Nyhuis, P., Ansari, S. M., Kuprat, T. ve Liebrecht, C. (2016). "Befähigungs-und Einführungsstrategien für Industrie 4.0", *Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 111(1-2), 76-79.
- Leyh, C., Sch, T., Bley, K. ve Forstenh, S. (2017). "Assessing the IT and Software Landscapes of Industry 4.0-Enterprises: The Maturity Model SIMMI 4.0", *Information Technology for Management: New Ideas and Real Solutions*, 277, 103-119.
- Leyh, C., Schäffer, T., Bley, K. ve Forstenhäusler, S. (2016). "SIMMI 4.0-A Maturity Model for Classifying the Enterprise-Wide IT and Software Landscape Focusing on Industry 4.0", *2016 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FEDCSIS)*, 8, 1297-1302.
- Lichtblau, K., Stich, V., Bertenrath, R., Blum, M., Bleider, M., Millack, A., Schmitt, K., Schmitz, E. ve Schröter, M. (2015). "IMPULS - Industrie 4.0- Readiness", <https://www.industrie40-readiness.de/?lang=en>, (Erişim tarihi 15.08.2021).
- Lin, T., Wang, K.J. ve Sheng, M.L. (2020). "To Assess Smart Manufacturing Readiness by Maturity Model: A Case Study on Taiwan Enterprises", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 33(1), 102-115.
- Menon, K., Kärkkäinen, H. ve Lasrado, L. (2016). "Towards a Maturity Modeling Approach for the Implementation of Industrial Internet", *Proceeding of the 20th Pacific Asia Conference on Information Systems (PACIS 2016)*, Chaiyi, Tayvan, 27 Haziran-1 Temmuz 2016.
- Mittal, S., Khan, M.A., Romero, D. ve Wuest, T. (2018). "A Critical Review of Smart Manufacturing & Industry 4.0 Maturity Models: Implications for Small and Medium-Sized Enterprises (SMEs)", *Journal of Manufacturing Systems*, 49, 194-214.
- PricewaterhouseCoopers (2016). "The Industry 4.0/Digital Operations Self-Assessment", <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise->

april-2016.pdf, (Erişim Tarihi: 15.08.2021).

- Rafael, L.D., Jaione, G.E., Cristina, L. ve Ibon, S.L. (2020). "An Industry 4.0 Maturity Model for Machine Tool Companies", *Technological Forecasting & Social Change*, 159, 120203.
- Rauch, E., Unterhofer, M., Rojas, R.A., Gualtieri, L., Woschank, M. ve Matt, D.T. (2020). "A Maturity Level-Based Assessment Tool to Enhance the Implementation of Industry 4.0 in Small and Medium-Sized Enterprises", *Sustainability*, 12(9), 3559.
- Reiner, A. (2014). "Industrie 4.0-Advanced Engineering of Smart Products and Smart Production", *19th International Seminar on High Technology*, Santa Barbara d'Oeste, Brezilya, 9 Ekim 2014.
- Rockwell Automation (2014). "The Connected Enterprise Maturity Model", <http://www.rockwellautomation.com>, (Erişim Tarihi: 15.08.2021).
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P. ve Harnisch, M. (2015). "Industry 4.0, The Future of Productivity and Growth in Manufacturing", *Boston Consulting Group*, 9(1), 54-89.
- Santos, R.C. ve Martinho, J.L. (2019). "An Industry 4.0 Maturity Model Proposal", *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(5), 1023-1043.
- Schuh, G., Anderl, R., Gausemeier, J., ten Hompel, M. ve Wahlster, W. (2017). "Industry 4.0 Maturity Index Managing the Digital Transformation of Companies", *Acatech-National Academy of Science and Engineering*, 61(12), 32-35.
- Schumacher, A., Erol, S. ve Sihm, W. (2016). "A Maturity Model for Assessing and Maturity of Manufacturing Enterprises", *Procedia CIRP*, 52, 161-166.
- Şener, U., Gökalp, E. ve Eren, P.E. (2016). "Cloud-Based Enterprise Information Systems: Determinants of Adoption in the Context of Organizations", *International Conference on Information and Software Technologies*, 53-66, DOI: 10.1007/978-3-319-46254-7_5.
- Şener, U., Gökalp, E. ve Eren, P.E. (2017). "CloudDSS: A Decision Support System for Cloud Service Selection", *International Conference on the Economics of Grids, Clouds, Systems, and Services*, 10537 LNCS(November), 249-261, DOI: 10.1007/978-3-319-68066-8_19.
- Şener, U., Gökalp, E. ve Eren, P.E. (2019). "Towards a Maturity Model for Industry 4.0: A Systematic Literature Review and a Model Proposal", *Industry 4.0 from the Management Information Systems Perspectives*, Editörler: Gülseçen, S., Reis, Z. A., Gezer, M., ve Erol, Ç., Berlin, Germany: Peter Lang Verlag, 291-303, DOI: 10.3726/b15120.
- Shrouf, F., Ordieres, J. ve Miragliotta, G. (2014). "Smart Factories in Industry 4.0: A Review of the Concept and of Energy Management Approached in Production Based on the Internet of Things Paradigm", *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 2015-Janua, 697-701, DOI: 10.1109/IEEM.2014.7058728.
- Sjödin, D.R., Parida, V., Leksell, M. ve Petrovic, A. (2018). "Smart Factory Implementation and Process Innovation A Preliminary Maturity Model for Leveraging Digitalization in Manufacturing", *Research-Technology Management*, 61(5), 22-31.
- Sternad, M. (2018). "Maturity Levels for Logistics 4.0 Based on NrW'S Industry 4.0 Maturity Model", *Business Logistics in Modern Management*, 18, 695-708.
- Tasarov, I.V. (2018). "Technologies of 4.0 Industry: Impact on the Performance Improvement of Industrial Companies", *Strategic Decision and Risk Management*, 2, 107.

SÜRDÜRÜLEBİLİR KALKINMA ODAKLI DİJİTALLEŞME BELİRLEYİCİLERİNİN VERİMLİLİK ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN YAPAY SİNİR AĞLARI İLE SINIFLANDIRILMASI

Senem DEMİRKIRAN¹, Ayça BEYOĞLU², Mehmet Kenan TERZİOĞLU³, Aysu YAŞAR⁴

ÖZET

Amaç: Dijital dönüşüm sürecinde dijitalleşme ve dijitalleşmenin verimlilik üzerindeki etkisinin teorik ve pratik olarak incelenmesi amaçlanmaktadır.

Yöntem: 2005-2020 yıllık dönemleri kapsamında, Türkiye’de verimlilik üzerinde etkili olan dijitalleşme sürecini niteleyen değişkenlerin ortaya konması ve önem sıralamalarının gerçekleştirilmesinde yapay sinir ağ mimarisi kullanılmaktadır.

Bulgular: Dijitalleşme süreci çerçevesinde hem sosyoekonomik ortamın oluşturulması hem de önem düzeylerinden yola çıkılarak verimlilik artışının teşvik edilmesi sonucunda kapsayıcı sürdürülebilir kalkınma potansiyeline katkı sağlanabileceği bulgusu elde edilmektedir.

Özgünlük: Dijitalleşmenin etkilerine ilişkin bu ampirik çalışmanın, konuyu inceleme şekli ve yapılan detaylı ampirik analizler kapsamında farklı modelleme tekniğinin ele alınması sonucunda alanında ilk olma özelliği ile literatüre katkı sağlaması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Dijitalleşme, Verimlilik, Sürdürülebilir Kalkınma, Yapay Sinir Ağları.

JEL Kodları: H83, H89, C45, C10.

CLASSIFICATION THE EFFECTS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT ORIENTED DIGITIZATION DETERMINANTS ON PRODUCTIVITY USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

ABSTRACT

Purpose: It is aimed to examine the situation of digitalization and the effects of digitalization on productivity in the digital transformation process both in theoretically and practically.

Methodology: The order of importance of the variables that characterize the digitalization process, which is effective on productivity in Turkey, is examined, in the 2005-2020 annual periods, within the framework of the artificial neural network architecture.

Findings: Within the framework of the digitalization process, it is found that inclusive sustainable development potential can contribute as a result of both the creation of the socio-economic environment and the promotion of productivity increase based on the importance levels.

Originality: It is expected that this empirical study on the effects of digitalization will make a contribution to the literature, as it differs from the studies carried out with the way of examining the subject with the feature of being the first in its field as a result of the different modeling techniques within the scope of detailed empirical analyzes.

Keywords: Digitization, Productivity, Sustainable Development, Artificial Neural Networks.

JEL Codes: H83, H89, C45, C10.

¹ Öğr. Gör., Trakya Üniversitesi, İpsala Meslek Yüksek Okulu, Hukuk Bölümü, Edirne, Türkiye, senemdemirkiran@trakya.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9835-4963 (Sorumlu Yazar-Corresponding Author).

² Doktora Öğrencisi, Trakya Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kamu Yönetimi Bölümü, aycabeyoglu@trakya.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6094-4009.

³ Doç. Dr., Trakya Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Ekonometri Bölümü, kenanterzioglu@trakya.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6053-830X.

⁴ Arş. Gör., Nişantaşı Üniversitesi, İktisadi ve Sosyal Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, aysu.yasar@nisantasi.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2200-2915.

1. GİRİŞ

Tarih boyunca ortaya çıkan köklü teknolojik değişimler ve devrimler toplumları şekillendirmektedir. 1760'lardaki ilk sanayi devrimi ve buhar makinesinden bu yana teknoloji sürekli kendini yenileyerek ve yeni teknolojilerin eski teknolojiler tarafından yaratıldığı bir özyineleme ile gelişmektedir. 19.yüzyılın sonlarında ve 20. yüzyılın başlarında ikinci devrim, elektriğin gelişmesiyle tetiklenerek seri üretime olanak sağlamıştır. 20. yüzyılın 60'lı yıllarında üçüncü sanayi devrimi veya dijital devrim adı verilen dönemi şekillendiren bilgisayarlar ortaya çıkmış ve bu çağ ile birlikte kişisel bilgisayarlarla birlikte internet insan hayatına girmiştir. Son olarak dördüncü sanayi devrimi olan ve öncesindeki dijital devrime dayanan; Yapay Zekâ, Makine Öğrenimi ve Nesnelerin İnterneti tarafından yönetilen çağa girilmiştir. Günümüzde de beşinci sanayi devriminin, Toplum 5.0, Süper Akıllı Toplum gibi isimlerle ortaya çıkmaya başladığı görülmektedir. Bilgi işlem gücüne, dijital veri yayılımına ve algoritma gelişmelerine eşlik eden hızlı teknolojik değişim günlük hayatı etkileyen her şeyde değişimlere neden olmaktadır (Walkowiak, 2021; Schwertner, 2017). Teknolojik devrimler ve bulut teknolojileri sayesinde gelişen dijitalleşme, internet teknolojilerinin, analitik teknolojilerin ve mobil teknolojilerin bir araya gelmesinden oluşmaktadır. Dijitalleşme yaşam biçimlerini, devlet politikalarını, işletme yönetimlerini değiştirmekte ve sürdürülebilir kalkınma için temel bir değer oluşturmaktadır (Henriette ve diğerleri,2016). Dijitalleşme sürecinde, istihdam olgusu, emek verimliliği, fiziki-beşerî sermaye kalitesi ve sürdürülebilir kalkınma kavramları politika yapıcılar için önem arz etmektedir (Dobrolyubova, 2021). Sanayi toplumunun post-endüstriyel dönüşümüne katkıda bulunan pandemiler sonucunda da kamu yönetiminin hizmet anlayışının teknolojik gelişmeler çerçevesinde kurgulaması ve dönüşümünün sağlanması gerekliliği ön plana çıkmaktadır (Demirkıran, 2020: 37; Jovanović ve diğerleri, 2018).

Dijital altyapının yaygın kullanımı kamu yönetimini vatandaşlar, özel sektör, kamu yönetim organları ve sivil toplum kuruluşları ile ilişkilerde yeni bir düzeye taşımaktadır. 1990 dönemi itibarıyla kamu kurumları tarafından büyük miktar veri depolama, işleme ve kamu-özel sektör düzenleme zorluklarının üstesinden gelme çabaları sonucunda, özellikle e-Devletin benimsenmesi ve yaygınlaştırılması ile BİT benimsenerek Kamu BİT Yatırımlarına (KBİTY) önem verilmektedir. Kamu yönetiminin işleyişinde temel araç olan altyapı odaklı yazılım ürünleri Kamu BİT Yatırımlarında (KBİTY) önemli rol oynamakta ve BİT aracılığıyla süreçlerin yeniden düzenlenmesi ve optimizasyonu kamu yönetiminde kamu idareleri için büyük bir potansiyel taşımaktadır (Becker ve diğerleri, 2008). Kamu sektöründe verimlilik iyileştirmeleri vaad edilmesine rağmen; Kamu BİT Yatırımlarının (KBİTY) tam etkisi sadece kamu yönetiminde dijitalleşme dahil olmak üzere tüm süreçler göz önüne alındığında değerlendirilebilmektedir (Liu ve Yuan, 2015). Sürdürülebilir kalkınma odaklı dijitalleşme ve verimlilik unsurlarının merkezinde yer alan yeni politikalar ile özel sektörün ve kamu yönetiminin dijitalleşmesinin en verimli olacak şekilde gerçekleşmesi hedeflenmektedir. BİT kullanımını içeren dijitalleşme; kamu yönetiminde ve özel sektörde performans artışı ve iş iyileştirmesi sonucunda verimlilik artışı sağlamaktadır (Dobrolyubova, 2021). Andriushchenko ve diğerleri (2020), kamu hizmet verimliliğini artırmasının yanı sıra işletmelerin dijitalleşme süreçlerinin de üretim verimliliğinde doğru orantılı artışa eşlik ettiğini vurgulamaktadır. Bu çerçevede, politika önerilerine dijitalleşme sürecinin de dahil edilmesi, özellikle kamu yönetimi hizmet sunumunu ve verimliliğini artırıcı yönde etkilemektedir (Demirkıran, 2020: 40). Sürekli gelişen dinamik yapıya sahip olan dijitalleşme ile artan teknoloji kullanımı kamu hizmetlerine olan talep artışını hızlandırmaktadır. Dijital teknoloji kullanımı beklentilerin arttığı kamu yönetiminde, dijitalleşme ile kamu yönetiminin kalitesi, verimliliği ve etkinliği artırılabilir (Bondarenko ve diğerleri, 2020). Kamu hizmetlerinde BİT araçlarının kullanımının artması ile kamu yönetimi işlevleri ve kalitesi geliştiğinden hem vatandaş katılımında artış hem de kamu değeri yaratılarak kamu hizmet verimliliğinde artış sağlanabilmektedir (Demirkıran ve diğerleri, 2021). Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşabilmesinde teknolojik gelişmelere öncelik verilmesi, verimlilik ve rekabet edebilirlik seviyelerinde ilerleme sağlanmasına katkıda bulunmaktadır. Dijitalleşme faktörü ile ilişkili ve üretim işletmelerinin göstergelerinden olan emek verimliliği, farklı ekonomik ve teknolojik gelişme seviyesine sahip ülkelerde/bölgelerde farklılık gösterebilmektedir (Aly, 2020). Gelişmekte olan ekonomilerde, dijitalleşme sosyal, ekonomik ve yönetim ile ilgili alanlarda daha dinamik hale gelerek, büyüme ve sürdürülebilirlik fırsatı yaratabilmektedir. Bu çerçevede hem kamu yönetimi hem özel sektör için verimlilik artışlarının sürdürülebilir ve etkili olabilmesi için dijitalleşmenin eksikliklerinin belirlenmesi ve etkin bir şekilde gerçekleşmesi için adımların atılması önem arz etmektedir.

Büyüme ve gelişim sürecinde, verimlilik ve kalkınmanın temeli ile ilgili atılacak bu adımları insan ve insan ihtiyaçları oluşturmaktadır. Yaşam standardı ve ulusal zenginliğin belirleyicisi olan verimlilik, hızlı değişen koşullar ile birlikte, sürdürülebilir kalkınma adımları çerçevesinde ele alınmaktadır. Her ülkenin kendi gelişim çizgisi içerisinde yapısal gelişim ve beraberinde gelen ekonomik refah artışına bağlı olan verimlilik ve kalkınma; kalifiye emek gücü, eğitim, sağlık ve sosyal güvenlik gibi temel ihtiyaçları karşılanan bir nüfus ve kültürel-çevresel zenginlik ile birleşmiş bir yaşam kalitesi düzeyinin göstergesidir (Beyoğlu, 2021:25). Ekonomi ve birey/toplum perspektifinde, bir ülkenin verimlilik seviyesinin ölçülmesi o ülkedeki

yaşam standardının seviyesi hakkında bilgi vermektedir. Bu kapsamda, bir ülkenin verimliliğinin her yıl %1 artması, her 70 yılda bir o ülkenin sahip olduğu yaşam standardının ikiye katlandığını gösterdiğinden, ülke ekonomisinin büyüme hızı ile ilişkili temel göstergeler verimlilik düzeyi olmaktadır (Serin, 2015:32). Bir ülkede belirli bir zaman diliminde elde edilen gayri safi yurt içi hasılanın nüfusa oranlanması ulusal ekonomik refah göstergesini ve çalışan sayısına oranlanması ise ulusal verimlilik göstergesini belirtmektedir.

Emek ile üretim arasındaki ilişkiyi anlatan kritik bir kavram olan verimlilik, hasılanın üretim faktörlerine oranı olarak tanımlanmaktadır (OECD, 2021). Verimlilik, harcanan emeğin miktarı, zaman, ücret, para, fiyat-miktar, fiyat-kazanç gibi oranlama yöntemlerini kullanarak; mal, ürün/hizmetler vb. biçimlerdeki çıktılar, sermaye, emek, bilgi, ham madde, araç/gereç, enerji, teknoloji ve çeşitli materyallerden oluşan girdilere oranlanmasıyla ölçülmektedir. Emek verimliliği, bir ülke ekonomisinde bir saatlik emeğin ürettiği gerçek gayri safi yurt içi hasıla (GSYİH) miktarını göstermektedir (Talas, 1997:99). Verimlilik kavramı ve emek ilişkisi iktisadi düşünce tarihi içinde üretim süreci ve tekniklerinde yaşanan dönüşüme bağlı olarak evrimleşmekte ve yorumlanmaktadır. Verimlilik, Merkantilist dönemde "verimi artıran yöntemler" üzerinden ele alınırken Agricola (1556); Fizyokratlar tarafından "verimli/verimsiz emek" ayrımına gidilerek girdi-çıktı ilişkisi olarak tanımlanmaktadır. Sermaye, iş bölümü ve bilgi-beceride uzmanlaşma ise Klasik iktisadi dönemde üretimde değeri yaratan güç olarak tanımlanan emeğin gücünün verimliliğini artıran faktörler olarak ele alınmaktadır (Suiçmez, 2002b). Neo-klasik dönemde ise üretim faktörlerinin verimlilik üzerindeki etkisi, çıktılarının niteliği ve çıktılarda meydana gelen artış ya da azalış, marjinal verimlilik teorisi kapsamında açıklanmaktadır. Emek verimliliği ve ücret ilişkisinde, emeğin değerinin ürettiği ürünün değeri ile ilişkilendirildiği marjinal verim teorisi, emeğin farklılaşmasını emeğin marjinal ürünü olan "ücret" üzerinden tanımlamaktadır (Bocutoğlu, 2012). Solow (1957), emeğin elde ettiği geliri, üretim faktörlerinin etkisi üzerinden inceleyerek, kişi başına düşen gelir artışında teknoloji faktörünün etkisini, bir çıktıda meydana gelen artışın emek ya da sermayenin marjinal verimliliği ile açıklanamadığı durumlarda teknoloji ile ilişkili şekilde ortaya çıktığını belirtmektedir. Emeğin refahı ve teknolojik etkinliği ilişkilendiren Pareto optimumu (Pareto verimliliği) -üretici, tüketici ve faktör sahipleri arasındaki ilişkide birinin durumunun iyileştirilmesinin diğerlerinden birinin kötüleşmesi mümkün olmadan gerçekleşmeyeceğini ifade eden durum- ele alındığında ise üretim maliyetlerinin en aza indirgenmesi ile birlikte hem üretim hem de tüketim etkinliğinin birlikte sağlandığı ifade edilmektedir (Ateş ve Halisçelik, 2014:2).

Ülkeler bazında kişi başına gayri safi yurt içi hasıla oranının farklılaşmasının altında yatan temel nedenlerin başında ise verimlilik artışı üzerinde etkili olan teknolojik gelişmeler gelmektedir (Suiçmez, 2002a). Üretimde yaşanan gelişmelerin teknolojik devrimler ile artan birlikteliği, girdi-çıktı bileşenlerinde artan çeşitliliğe sebep olmakta ve verimlilik ölçümünde yeni formülasyonların geliştirilmesini gerekli kılmaktadır (Prokopenko, 1998:28). Uzun vadede ekonomik büyüme ve refahın temel göstergesi olarak ele alınan toplam faktör verimliliği (TFV), toplam çıktının toplam girdilere oranı olarak, üretim sürecinde kullanılan tüm kaynakların birim miktarına düşen üretim miktarını ifade etmektedir (Gerşil, 2007). Ek olarak, etkinlik, teknolojik değişim ve refahın iyi bir ölçüsü olan emek verimliliğindeki değişikliklerin ortaya çıkarılmasına neden olan faktörlerin kaynaklarının da tanımlayıcısı olarak değerlendirilmektedir (Mete, 2010:28). Teknolojik gelişimin etkisiyle verimlilik artışı, müşteri değeri artışı, risk yönetimi ve para kazanma fırsatları yaratmak amacıyla süreçler, ürünler ve varlıklar üzerinde dijital yeteneklerin uygulanması dijitalleşme olarak ifade edilebilmektedir.

Dijitalleşme, dijital teknolojilerin karışımının, potansiyel değişimlerden/fırsatlardan ve bunların toplum genelindeki olası etkilerinden, bugün ve gelecekte stratejik ve öncelikli şekilde tam olarak yararlanmak için iş ve organizasyonel faaliyetlerin, yetkinliklerin ve modellerin derin dönüşümü olarak verimlilik çıktısına vurgu yapmaktadır. Bu nedenle, Büyük Veri'ye odaklanan dijitalleşme çabaları (Elmassah ve Mohieldin, 2020) fiziksel dünyanın sanal aktarımını temsil etmekte ve nesnelerin/görsellerin/seslerin sinyal kanalı aracılığıyla hızlı ve kendiliğinden bilgi akışını gerçekleştirmesi sonucu gelişim göstermektedir. Dijitalleşme ile birlikte tanımsal olarak meydana gelen değişimler sonucunda ise yeni tür sosyoekonomik büyüme fırsatları, yeni verimlilik seviyeleri ve daha fazla şeffaflık talebi ortaya çıkmaktadır (Bhutani ve Paliwal, 2015). Bu talepler neticesinde, verimlilik ve refah artışının uzun dönemli olarak teminat altına alınması anlayışına dayanan sürdürülebilirlik ilkesi, ekonomik büyümenin sosyal yapı ve çevre ile etkileşiminin koordineli şekilde ele alınması gerektiğini vurgulayan Ortak Geleceğimiz (1987) Raporu'nda, gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneğinden ödün vermeden bugünün ihtiyaçlarının karşılanması olarak tanımlanmakta ve insanlığın refahının; ekonomik büyüme, sosyal eşitlik, çevre koruma ve kültür ile ilişkili olduğunu ifade etmektedir (Jovanović ve diğerleri, 2018).

İnsan ihtiyaçlarının artması ile birlikte devletlerin sürdürülebilir kalkınma politikaları uygulaması yönünde baskı altına alan süreç; teknolojik değişikliklerin sürdürülebilir kalkınma, ekonomi, toplum ve çevrenin sinerjik gelişimi üzerindeki etkisini ölçmeyi gerekli kılmaktadır. Dijitalleşmeden aldığı güç ile iş süreçlerinin odağını fiziksel ürünlerden veriye dayalı hizmetlere çeviren bu yeni süreç, IoT gelişimine katkı sağlamaktadır. Bu gelişmeler ile derin öğrenme ve yeni nesil iletişim ağları toplumun günlük yaşamını

basitleştiren daha verimli hizmet taleplerini (Nizetic ve diğerleri, 2020) karşılamaktadır. Gelişmelerin merkezinde yer alan akıllı teknolojiler ise devletlerin ve özel sektörün gelecekteki dijitalleşmesini yönlendirerek değişimlerin uygulamaya konmasını teşvik ederek sürdürülebilir kalkınmaya katkı sağlamaktadır (Maheswar ve Kanagachi Dambaresan, 2020). Dijitalleşme ve sürdürülebilirlik ilişkisi çerçevesinde Büyük Veri, meta veri, analitik, bulut altyapısı vb. pek çok unsur, sürdürülebilir kalkınmayı gerçekleştirebilmek için ekonomik gelişme, teknoloji düzeyi ve fiziksel çevre gibi unsurlarla etkileşime girerek (Layton, 2009) maliyet verimliliği ve büyüme fırsatı yaratılmakta ve genel büyüme hedefi üzerinden sürdürülebilir kalkınma desteklenmektedir (Bhutani ve Paliwal, 2015). Bu süreçte, IoT, dijital veri odaklı ekosistemi geliştirmek için temel bir dijitalleşme platformu sunmaktadır. Geniş alana hizmet edebilen, sınırlı güçle çalışan, daha az kurulum süresi olan ve farklı düzeylerde çalışan IoT (Degada ve diğerleri, 2021), dijitalleşme ve verimlilik ilişkisinde bir diğer önemli araç olan Yapay Zekâ (AI) le birleşerek, öğrenme ve problem çözme gibi insan zihniyle ilişkilendirilen bilişsel işlevleri taklit eden makineler veya bilgisayarlar aracılığı ile dijitalleşmeyi hızlandıran kritik araçlar olarak sürdürülebilir süreçler için kalkınmanın destekleyicisi niteliğini kazanmaktadır (Yiğitcanlar ve Cugurullo, 2020).

Kamu ve özel sektörde girdileri çıktıya çevirerek katma değeri yaratan verimlilik (Kepil, 2010), teknolojik değişiklikleri yakından izleyen süreç olarak, plan-proje bazında soyut şekillerde ya da çıktı miktarı ve kalitesinde kaydedilen ilerlemeler olarak somut şekillerde (Griliches, 1987:100) ortaya çıkmaktadır. Bu süreçte, üretimde yaşanan gelişmelerin teknolojik gelişmeler ile artan birlikteliği ve BİT'in ekonomik/sosyal hayata hızla entegre olan yayılımı, emek ve sermayenin verimliliğini artırarak ekonominin geneline yayılan bir verimlilik artışı yaratmaktadır. BİT kullanımında gerçekleşen artış ile birlikte sürdürülebilir kalkınma önündeki engellerin aşılması da kolaylaşmaktadır. Teknoloji faktörlerinin kullanımındaki artışa paralel olarak verimlilik üzerinde etkili olan teknolojik araştırmalar ise BİT girişim sayısında ve pazar payında büyüme ortaya koymaktadır.

Hüresel teknoloji kullanılarak PSTN'ye erişim sağlayan *Mobil Hüresel Abonelikler (MHA)* ve hızı 512 Kbit/s-2 Mbit/s arasında olan interneti ifade eden *geniş bant aboneliği*, verimlilik ve sürdürülebilir kalkınma üzerinde önemli katkılar sunmaktadır (International Telecommunication Union-ITU, 2021). Luo ve Bu (2016), bulut bilişim, Büyük Veri, akıllı terminaller gibi yeni bilgi iletişim kanallarının hızlı gelişiminin verimlilik üzerinde etkili olarak sürdürülebilir rekabet avantajına katkı sağladığını ifade etmektedir. Kontrollü İnternet Erişimi (İE) ile geniş ağ bağlantısı, yüksek otomasyona sahip işlerde emek verimliliği üzerinde önemli düzeyde etkili olmaktadır (Yılmaz, 2021). Geniş bant aboneliği, uzak bölgelerin birbirine bağlanması, sosyal hizmetlere erişimin teşvik edilmesi ve eğitim fırsatlarında yarattığı imkanlarla üretkenliği artırarak ekonomik büyümeye katkıda bulunmaktadır. Ek olarak, kamu hizmetlerine erişimi kolaylaştırması ile sosyoekonomik kalkınma için kapsayıcı ve sürdürülebilir bir büyüme yaratabilmektedir. Analog sabit telefon hatlarının, IP üzerinden ses (VoIP) aboneliklerinin, sabit kablosuz yerel döngü (WLL) aboneliklerinin, ISDN ses kanalı eşdeğerlerinin ve sabit kamu ankesörlü telefonlarının aktif sayısının toplamını ifade eden Sabit Telefon Abonelikleri ise bireylerin günlük yaşamı, üretim ilişkileri, beşeri faaliyetleri, iletişim için gereksinimleri üzerinde etkili olarak kullanılan bilgi işlem gücünde, bilgi sistemlerinde ve alınan/sağlanan hizmetlerin değişime uğramasını sağlamakta ve bu durum dijitalleşmenin hızlanarak verimlilik üzerinde etkili olmasına olanak sunmaktadır (Khotamov, 2019).

Sürdürülebilir kalkınma adımı olarak dijitalleşme ve BİT'in tüm alanlarda yoğun kullanımı, devletleri, dijitalleşme politikalarında e-Devlet, IoT, Büyük Veri ve AI odaklı politikalar geliştirmeye zorlamakta ve verimlilik odaklı *kamu BİT yatırımlarının* uzun dönemli olarak kalkınma politikalarına dahil edilmesini gerekli kılmaktadır. BİT yatırımlarının büyüme üzerinde yarattığı etki, emek verimliliği (beşeri sermayenin bilgi, beceri ve analiz yeteneği), sermayenin derinleşmesi ve talep üzerindeki artış gibi farklı kanallar üzerinden yaratılan zincirleme etki vasıtasıyla toplam faktör verimliliğinde artışa neden olmaktadır (Erçakar ve Çolakoğlu, 2019). Devletin iş hizmetleri sürecindeki rolü; emek gücünün eğitilmesinde dijitalleşme araçlarının kullanımı ile dijital devrimin yayılımının emek üzerindeki etkisinin daha kısa sürede ortaya çıkarılması ve emek yoğun işletmelerin sermaye yoğun işletmelere kıyasla daha ucuz olması gibi nedenler de dijitalleşme sürecine uyum sağlanması olarak gösterilmektedir (Yılmaz, 2021). BİT'in büyüme hızı ve yaygınlaşması ile birlikte, veri işleme ve bilgi ağları ile milyarlarca cihazın etkileşim halinde olduğu ve insan-makine etkileşiminin de aynı hızla arttığı görüldüğünden *İnternet Erişimi (İE)* sağlanması da önemli faktörlerin içinde yer almaktadır. Dijitalleşme sürecinde, 2000'li yıllardan itibaren artan İnternet Erişimi (İE), Yapay Zekâya (AI) sahip akıllı cihazların kullanımı ile birlikte verimlilik üzerinde, yatırım imkanları ve daha yetenekli emeğin iş gücü piyasasına girişini kolaylaştıracak bir etki yaratmaktadır (Yılmaz, 2021).

Devletin dijitalleşme sürecinde; ulusal dijital altyapı yatırımlarının gerçekleştirilmesi, teknoloji transferinin sağlanması, Ar-Ge merkez kurumlarının gerçekleştirilmesi, teknoloji merkezli iş süreçlerinin geliştirilmesi vb. dijital yöntem, süreç ve uygulamaların planlanması önem arz etmektedir. Emek verimliliğindeki büyümenin ana faktörlerinden biri olan teknolojik ilerlemenin sağlanması *Ar-Ge faaliyetleri* ile mümkün olmaktadır. Ar-Ge faaliyetlerinin yaygınliğı hem üretim sürecinde kullanılan teknoloji

seviyesini yükseltmekte hem de emek gücünün daha fazla çıktı üretmesini sağlamaktadır. Bu çerçevede, teknolojik ilerlemenin göstergelerinden olan Ar-Ge faaliyetleri, toplam faktör verimliliği üzerinde olumlu katkı sağlamaktadır (Ünsal, 2017). Verimlilik üzerinde doğrudan etkiye sahip olan ve dijitalleşmenin bir aracı olarak sürdürülebilir kalkınma için etkili bir araç olarak görülen *BİT girişim sayısı*, kamu sektörü reformlarını gerçekleştirmede ülkelerin ekonomik büyümelerine katkı sağlamaktadır. Özellikle gelişmekte olan Türkiye gibi ülkelerde, sosyal ve ekonomik kalkınmayı sağlamak için Birleşmiş Milletler ve Dünya Bankası gibi uluslararası kuruluşlar tarafından BİT girişimleri önerilmekte ve finanse edilmektedir. Ülke ve girişimci ölçeğinde artan *BİT pazar büyüklüğü*, kazandırdığı rekabet gücü sayesinde katma değeri yüksek olan ürün ve hizmetlerin üretilmesi ile sonuçlandığından sürdürülebilir sosyoekonomik büyüme sağlayarak verimlilik üzerinde etki yaratmaktadır (Mofleh ve diğerleri, 2008).

Dijitalleşmenin, üretilen varlıkların amortismanı veya doğal kaynakların tükenmesi ve bozulması için kesinti yapılmadan hesaplanan ve ekonomideki tüm yerleşik üreticilerin katma değeri artı ürün verileri ve ürünlerin değerine dahil edilmeyen sübvansiyonların toplamı olan *Sabit Sermaye Oluşumu* üzerinde etkisi bulunmaktadır (World Bank, 2021). Büyüme performansını belirleyen faktörlerden biri olan Sabit Sermaye Oluşumu, ülkenin ekonomik büyüme performansını belirleyen yatırımlarının artması ve emek gücünün üretkenliğindeki artış ile birleşerek üretimde kullanılan sermaye yoğunluğu artışı üzerinden ekonominin genelinde verimlilik artışı ortaya çıkarmaktadır (Ekren ve diğerleri, 2020). Sürdürülebilir kalkınmanın gerekliliklerinden olan ve üretimde daha az Enerji Kullanımı ile daha fazla mal/hizmet üretimini ifade eden Enerji Kullanımı verimliliği, üretimin performans ve kalitesini düşürmeden enerji tasarrufunun sağlanabilmesi için yeni teknolojik gelişmelerin kullanımından kaynaklanan bir gelişmeyi ifade etmektedir. Enerji verimliliğindeki artış, yenilenebilir enerjinin genişletilmesi ile birlikte gayri safi yurt içi hasıla ve ek iş imkanları üzerinden emeğin refah artışını sağlamaktadır (Aydın, 2016). Üretim sürecinde çevre üzerinde kirlenici etkileri olan girdi ve üretim teknikleri ile çevre üzerinde kirlilik yaratan tüketim mallarının vergilendirilmesi *emisyön* olarak ifade edilmektedir (Yıldız, 2017). Kirlilik Emisyonları (EMS) üzerinden vergi olarak elde edilen gelir ekonominin diğer alanlarındaki vergilerin azaltılmasının finansmanı için kullanılmaktadır. Bu uygulama, sürdürülebilir kalkınma ve verimlilik açısından, Karbondioksit Emisyonları (EMS) azaltma ve daha düşük işsizlik amacına hizmet ederek çevre dostu BİT uygulamalarının kullanımını teşvik etmektedir (İnan, 2018).

Dijitalleşme, sürdürülebilir kalkınmanın elde edilmesi için gerçek bir sanallık yaratmaya yönelik çok iyi bir adımdır (Bhutani ve Paliwal, 2015). Sürdürülebilirliğin emek gücü ile olan ilişkisi; bilgiyi öğrenme, değerlendirme ve üretime sokabilme yeteneği ile ilgili olduğundan, BİT'e yönelik eğitim alanlarının kodlama ve yaratıcılık ekseninde sistematik bir şekilde yenilenebilmesi gerekmektedir (Göçenoğlu, 2016). Teknoloji ve verimlilik ilişkisi ele alındığında BİT, emek verimliliğindeki artışın en önemli belirleyicisi olarak görülmektedir (Akarsu ve diğerleri, 2020). BİT ile gelişmişlik düzeyi ve sürdürülebilir kalkınma arasındaki bağlantının gösterilebilmesi için Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (ITU) tarafından, ülkelerin BİT alanındaki gelişmişliklerini ölçmek için geliştirilen bilişim ve iletişim teknolojileri geliştirme endeksi kullanılmaktadır. Bu çerçevede gelişmiş ekonomiler üzerinden eğitim, sağlık, yaşam kalitesi, okur-yazarlık gibi kritik göstergeler bazında elde edilen sonuçlar ile BİT alanında kaydedilen gelişmişliğin, ekonomik ve sosyal gelişmişlik ile ilişkisi ortaya konmaktadır (YASED, 2012:60). Dijitalleşme sürecinde toplam faktör verimliliğinin artırılmasına yönelik izlenen kamu politikaları ele alındığında, dijitalleşmenin büyük bir hız ile kamu program ve politikalarına entegre edilmesi gerekliliği (Örneğin Almanya'nın yenilikçilik kapasitesinin artırılmasını destekleyen devlet yatırımları ve emeğin eğitimi temeli üzerinde yükselen emek gücü piyasasına yönelik düzenlemeleri, Kore'nin teknolojik yeteneği geliştirme çabalarını ekosistem, emek, yenilikçilik ve rekabeti artırma adımlarında milli bir proje olarak benimsemesi) ön plana çıkmaktadır (Çağlar ve Koyuncu, 2018:52).

Bu çalışmanın amacı; verimlilik odaklı, istikrarlı bir büyüme-gelişme için kalkınmanın yönünün daha sürdürülebilir bir yöne evrilmesine dikkat çekmek ve dijitalleşme-sürdürülebilirlik ilişkisinin verimlilik üzerindeki etkisini ortaya koymaktır. Çalışma kapsamında; 2005-2020 dönemleri kapsamında dijitalleşmenin emek verimliliği üzerindeki etkisinin yapay sinir ağları kullanılarak ortaya çıkartılması ve ele alınan dijitalleşme göstergelerinin verimlilik üzerindeki etkilerinin önem sıralaması yapılarak politika önerilerinde bulunulmasıyla literatüre katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

Çalışmayı literatürdeki benzerlerinden ayıran en önemli özellikleri; dijitalleşme ve verimlilik kavramları sürdürülebilir kalkınma bağlamında incelenerek, 2005-2020 dönemleri kapsamında dijitalleşmenin emek verimliliği üzerindeki etkisinin yapay sinir ağları kullanılarak ortaya çıkartılması ve ele alınan dijitalleşme göstergelerinin verimlilik üzerindeki etkilerinin önem sıralamasının yapılmasıdır. Çalışmanın kapsamı, temel amacı ve özgünlüğü; sürdürülebilir kalkınma odaklı dijitalleşme belirleyicilerinin verimlilik ile ilişkisi ve tanımlamaların yapıldığı giriş bölümü; konuyla ilgili yapılmış çalışmaların kısa özetinin sunulduğu literatür bölümü; ampirik analizin gerçekleştirildiği yöntem ve bulgular bölümü ve son olarak sonuç ve değerlendirmelerin yer aldığı sonuç bölümü olmak üzere çalışma dört bölümden oluşmaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Dijitalleşmenin verimlilik üzerindeki etkisini ölçmeye yönelik olarak yapılan çalışmalar incelendiğinde, dijitalleşme sürecinde BİT'in yaygın kullanımına bağlı olarak, 1990'lı yıllardan itibaren hızla arttığı bunun yanı sıra yapılan çalışmalarda konuyla ilgili ampirik analizlerin eksik olduğu ve ulaşılabilen sınırlı sayıdaki ampirik çalışma incelendiğinde ise yapay sinir ağları ile yapılan analiz olmadığı görülmektedir. Sürdürülebilir kalkınma odaklı dijitalleşme belirleyicilerinin verimlilik üzerindeki etkileri ile ilgili yapılmış çalışmaların kısa özeti tarih sırasına göre burada sunulmaktadır.

Bassanini ve diğerleri (2000) OECD ülkelerinde 1985-1996 yılları arasındaki dönemde verimlilik ve Ar-Ge harcamaları ilişkisini incelemekte ve yeni teknolojilerin verimliliği olumlu yönde etkilediğini ifade etmektedir. Gust ve Marquez (2004), 1993-2000 yılları arasındaki dönemde emek verimliliğindeki artışa ilişkin olarak, 13 OECD ülkesi için ülkeler arasındaki büyüme farklılıklarını BİT, nüfus oranı ve istihdam girdilerini kullanarak büyüme muhasebesi tekniği ile incelemekte ve BİT üretimi ve BİT yatırımlarının verimlilik artışı üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır.

Şoltan (2009), enerji tüketimi ile ekonomik büyümenin bir göstergesi olan GSYİH'deki değişmeler arasındaki nedensellik ilişkisini incelediği çalışmada, GSYİH'deki değişim sonrasında enerji tüketiminde de değişim yaşandığını ve bu durumun yenilenebilir enerji kaynaklarının teşviki ile verimlilik ve sürdürülebilirlik arasındaki ilişkiyi vurguladığını ifade etmektedir. Czernich ve diğerleri (2011) geniş bant altyapı çalışmalarının ekonomik büyüme üzerine olan etkisini 25 OECD ülkesi için incelemiştir. Çalışmada panel veri analizi 1996-2007 yılları için kullanılmıştır. Geniş bant altyapısındaki yayılımının ekonomik büyüme üzerine olumlu etkisi, geniş bantlı altyapı yayılımının %1 oranında bir artış göstermesi ile kişi başına yıllık büyüme oranında ortaya çıkan %0,09-0,15 oranında artış sağlaması olarak ifade edilmektedir. Mittelstaedt ve diğerleri (2014), makroekonomik değişkenler ile ilgili olarak ortaya çıkan faaliyetlerinin toplumu bilinçlendirerek davranış değişikliğine teşvik ettiğini ve dijitalleşmenin toplum tarafından benimsenmesini sağladığını, dijitalleşme ise sürdürülebilir kalkınma için en uygun değer birimi olduğunu ifade etmektedir.

Dang ve Pheng (2015), yeni ekonomik kalkınma teorileri çerçevesinde sürdürülebilir kalkınmanın uluslar ve işletmeler için giderek artan bir şekilde öncelik haline geldiğini vurgulamaktadır. Sabbagh (2015), dijitalleşme sürecinde küresel olarak dijitalleşme girişimlerinin yaşanmasını ve teknoloji kullanım sayısının artmasıyla, tüm faaliyetlerde dijitalleşmenin etkisinin artarak emek verimliliğinin arttığını ifade etmektedir. Bertini (2016), hızla dinamik bir hale gelen dijitalleşme sürecinin sadece yaşamı değil bireylerin deneyimlerini de etkilediğini vurgulamaktadır. Şaf (2015), BİT'in emek verimliliği üzerindeki etkilerini ele aldığı çalışmasında, Türkiye'de BİT sektöründe hane halkı tüketimi ve sabit sermaye birikimindeki artışın ülkenin milli geliri ve diğer sektörlere olan etkilerini ele almakta ve BİT tüketimi ile GSYİH'deki artış arasındaki pozitif ilişkiyi BİT sermaye birikiminin emek verimliliği artışı için önemli avantajlar sunduğu yönünde açıklamaktadır. Schwab (2016), dijitalleşme sürecinin Yapay Zekâ (AI), makine öğrenimi ve Nesnelerin İnterneti (IoT) tarafından yönetildiğini ifade etmektedir. McKinsey Global Institute (2017) tarafından hazırlanan Rapor'da; Yapay Zekâ (AI) ve robotik dahil olmak üzere otomasyon teknolojilerinin artan oranda benimsenmesinin verimliliği ve ekonomik büyümeyi artırdığı ve sürdürülebilir kalkınma ile ilgili geniş kapsamlı bir etki yarattığı belirtilmektedir. Arthur (2017), dijital devrim olarak adlandırılan yeni bir ekonomik çağa geldiğini ifade etmektedir. Zheng ve diğerleri (2017), yatırım, yabancı yatırım ve ihracat düzeylerinin dijitalleşme farklılıklarından etkilendiğini ifade etmektedir. Samargandi (2018), dijitalleşme sürecinde istihdam oranları, emek verimliliği, beşerî ve sabit sermaye, ticari açıklık ve inovasyon arasındaki ilişkiyi belirtmektedir.

Lee ve diğerleri (2020), BİT'in emek verimliliği üzerinde olumlu etkileri olduğunu ortaya koymaktadır. Tayyar (2021), BİT araçlarını sınıflandırılması kapsamında, Türkiye'de 1990-2015 yılları arasında mobil hücresel abonelikler ve sabit hat telefon aboneliği ile enerji yoğunluğu olarak belirlenen değişkenler arasındaki uzun vadeli ilişkilerin tespiti için Johansen & Juselius (1990) eşbütünlüşme testinden yararlanmakta ve sabit telefon aboneliği kullanımındaki %1'lik artışın enerji yoğunluğunu %0,68 oranında artırdığı, mobil telefon aboneliğinde %1'lik artışın ise enerji yoğunluğunu %0,15 oranında azalttığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte dijitalleşmenin verimliliği üzerindeki etkisini yapay sinir ağ mimarisi ile inceleyen herhangi bir çalışmaya rastlanılmamakla birlikte, dijitalleşmenin belirleyicilerinin verimlilik üzerindeki etkilerinin ayrımını ortaya koyan neredeyse hiçbir çalışmaya ulaşılamamaktadır. Geleneksel istatistikî yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçlar hem örnekleme ilişkin verilerden hem de geçmiş verilerden yola çıkılarak tahminleme işlemi yaparak gelecekte ortaya çıkması muhtemel sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır. Bu kapsamda, küreselleşme ve dijitalleşme faaliyetlerinin artmasıyla sosyal ve ekonomik verilerde ortaya çıkan karmaşık problem yapısının çözümünde, ihtiyaçların karşılanabilmesi için öğrenme yeteneğine sahip yapay zekâ uygulamalarını içinde barındıran yöntemlerle tahmin ve öngörü aşamalarına geçilmektedir. Bu kapsamda, sinir hücrelerinden yola çıkılarak modelleme yapısı kurgulanan yapay zekâ modeline dayalı yapay sinir ağ mimarisinin ele alınmasıyla verimlilik üzerindeki dijitalleşmeye

ilişkin belirleyicilerin etki oranlarının etkin ve güvenilir bir yapıda belirlenmesi sağlanarak birçok etkene bağlı olan dijitalleşmenin karmaşık yapısı çözümlenmekte ve verimlilik üzerindeki etkisi ortaya konabilmektedir.

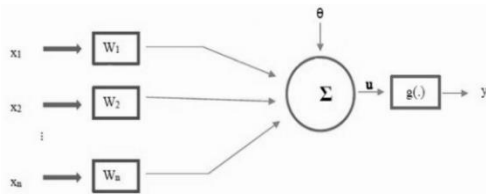
3. YÖNTEM ve BULGULAR

3.1. Makine Öğrenmesi ve Yapay Sinir Ağları

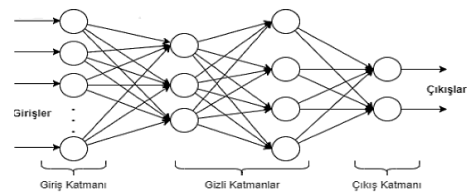
Veri miktar ve boyutlarının artması ile yaygınlık kazanan Büyük Veri kavramı, Yapay Zekâ (AI), makine öğrenmesi ve yapay sinir ağları gibi kavramları ortaya çıkarmaktadır (Russel, 2019:73). Mevcut verilerden model veya algoritma oluşturarak yeni verilerin tahmin edilmesi olarak tanımlanan makine öğrenmesi, bilgisayara programlamasız öğrenme kabiliyeti veren çalışma alanı olarak ifade edilebilmektedir (Albon, 2018:36). Matematik ve istatistik altyapısına sahip olan makine öğrenmesi, sınıflama ve tahmin/öngörü alanlarında başarılı algoritmalara sahip olmaktadır. Sınıflandırma uygulamalarında hedef değişken nominal değerler alırken; regresyon uygulamalarında hedef değişken sürekli değerler almaktadır (Müller ve diğerleri, 2016:200).

Makine öğrenmesinin eğitim alanında kullanılan yöntemlerinden biri olan yapay sinir ağları, insan beyninin öğrenme ve yeni bilgiler üretebilme kabiliyetleri esas alınarak geliştirilen bilgisayar sistemleri olarak değerlendirilen sayısal zekâ yapısına sahip sistemler olarak ifade edilmektedir (Öztemel, 2012:150). Yapay sinir ağları, sayısal zekâ veya zeki sistemler olarak bilinmekte olup insan beyninin çalışma şeklini taklit eden gelişen bir makine öğrenme yöntemi olarak değerlendirilmektedir. Sinir hücresi mimarisine sahip yapay sinir ağları, geleneksel model tabanlı yöntemlerin aksine varsayımlara değil veriye dayalı kendinden uyarlamalı bir yöntem olup bilgi iletimini çoğunlukla tek taraflı sağlamaktadır (Silva ve diğerleri, 2016:86). Yapay sinir ağları kullanılarak örneklerden öğrenme işlemi gerçekleştirilmekte ve tanımlanması zor olan veriler arasındaki fonksiyonel ilişkiler yakalanabilmektedir. Ek olarak, yapay sinir ağları, eksik gözlemleri doğru bir şekilde tamamlayabilmektedir. Geçmiş gözlemlerden yararlanarak gelecek tahmini yapılmasına olanak sağlandığından yapay sinir ağları çok değişkenli doğrusal olmayan yöntemler arasında yer almaktadır (Cheng ve Titterton, 1994).

Geleneksel istatistiksel yöntemlerden daha genel ve esnek işleve sahip olmasıyla gerçek hayattaki problemlerin karmaşıklığının çözümü için iyi bir alternatif tahminci olan yapay sinir ağları, sisteme giren verilere göre en uygun kuralı veya fonksiyonu kullanarak, model seçimini, işlev tahminini, en uygun değeri bulmayı ve veri sınıflandırmasını başarılı şekilde gerçekleştirmektedir (Elmas, 2011:42). Hazır algoritmaları kullanan ve işlem adımları belli olan geleneksel yöntemler ile kıyaslandığında; karşılaştığı önceki durumlara ilişkin veriler ile kendi kendini eğiten yapay sinir ağları ile elde edilen sonuçlar daha gerçekçi olabilmektedir (Swingler, 2001:94). Yapay sinir ağlarında kullanılan verilerin ele alınan problemle ilgili benzer durumları içermesi oranı eğitim aşamasının verimli olarak geçirilmesini ve dolayısıyla sonuçların güvenilirliğini artırmaktadır (Russel, 2019:27). Yapay sinir ağı mimarisinde, ele alınan konunun tasarımı, fizibilitesi, verinin toplanması ve kodlanması, ağı tasarımı ve fizibilitesi, eğitim-test-geçerlilik aşamaları, hata analizi, ağı analizi ve sistem uygulaması önem arz etmektedir (Swingler, 2001:98).



Şekil 1. Yapay bir sinir hücresinin yapısı



Şekil 2. Çok katmanlı yapay sinir ağı mimarisi

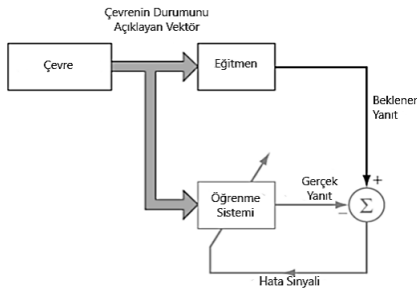
Yapay sinir ağları, hücre gövdesi (hücre aktivitelerini yönlendirme), dendrit (diğer hücrelerden gelen mesajları alma ve nakletme) ve akson (mesajları diğer hücrelere veya kaslara iletme) olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır. Yapay sinir hücresi biyolojik sinir hücresine benzer olarak dış çevreden ağa gelen çoklu girdi sinyalleri (girdileri) x_i , ağıdaki sinaps kavşakları tarafından gerçekleştirilen ağırlıklandırma işlemi W_i , toplama fonksiyonu Σ , aktivasyon fonksiyonu $g(\cdot)$, aktivasyon potansiyeli (u) ve eşik değeri θ yapılarını barındırmaktadır. Şekil 1'de yapay sinir ağının yedi temel bileşenden oluştuğu gözlemlenmektedir. Veri girişinin sağlandığı nöronların bulunduğu katman giriş katmanı olarak tanımlanmaktadır. x_1, x_2, \dots, x_n olarak gösterilen girdi sinyalleri çevreden gelen örneklerle olup öğrenme algoritmasının sayısal etkinliğinin artması için aktivasyon fonksiyonu tarafından belirlenen limit değerleri içerisinde normalleştirilmektedir. W_1, W_2, \dots, W_n ağırlıkları girdi değişkenlerini ağırlıklandırarak nöronun fonksiyonelliğinin ölçümünde kullanılmaktadır. Toplama fonksiyonu Σ ile bir aktivasyon gerilimi üretmek için ağırlıklandırılan girdilere ait tüm sinyallerin toplanması sağlanmaktadır (Yakut,2020:55). θ olarak gösterilen aktivasyon eşik değeri veya sapması uygun eşik değerinin belirlenmesinde kullanılan bir değişkendir. Doğrusal toplama ve aktivasyon eşik değeri arasındaki farktan meydana gelen aktivasyon potansiyeli $u \geq 0$ olmadığında engelleyici potansiyel

üretmektedir. Eşitlik 1'de j . nöronunun girdisi a_j , j . ve i . nöron arasındaki bağlantı ağırlığı w_j , i . nöronunun çıktı değeri x_i ve eşik değeri θ_j olmak üzere, nörona ilişkin toplam girdi ile aktivasyon fonksiyonu kullanılarak işlenen girdi sonucunda son süreç elemanı olarak ifade edilen çıktı (y),

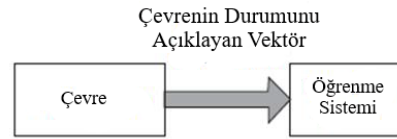
$$a_j = \sum_i w_{ij}x_i + \theta_j \quad (1)$$

$$y = g(\sum_i w_{ij}x_i + \theta_j) \quad (2)$$

şeklinde gösterilmektedir. Eşitlik 2'de $g(\cdot)$ aktivasyon fonksiyonu yapay sinir hücrelerinin hareketini yönetirken; y çıktı sinyali ilgili nöron tarafından üretilen son değeri içermekte olup komşu nöron için girdi olarak kullanılabilir. Sadece girdi ve çıktı katmanından oluşan yapay sinir ağı karmaşık problem çözümünde başarılı olamadığından ağ yapısında en az bir adet gizli katmanın bulunması gerekmektedir. Bu nedenle, yapay sinir ağı girdi katmanı, gizli (ara) katmanlar ve çıktı katmanından oluşmaktadır. Giriş katmanındaki nöronlar, girilen verileri, ağın yapısına göre gizli katmanlara ya da çıkış katmanına iletmektedir. Ağ mimarisinde gizli katmanlar mevcutsa, giriş katmanından alınan veriler ağırlıklandırılarak bir sonraki gizli katmana veya çıkış katmanına iletilmektedir. Gizli (ara katman veya görülmez) katmanda, sürecin veya sistemin analiz edilebilmesi için örüntülerin çıkarılmasından sorumludur. Çıkış katmanında bulunan nöronlar ise giriş katmanından veya gizli katmanlardan elde ettikleri veriler ile nihai ağ çıktısını oluşturmaktadır. Nöronlar birçok nörondan giriş almakla birlikte diğer nöronlara aktarılan tek bir çıkış üretmektedir. Katmanlar arasında kullanılan bağlantı yapıları tam bağlantı, kısmi bağlantı, ileri beslemeli, çift yönlü, hiyerarşik ve rezonans bağlantı olarak sınıflandırılmaktadır (Elmas, 2011:74). Şekil 2'de bir giriş, iki gizli katman ve bir çıkış katmanı olmak üzere dört katmandan oluşan yapay sinir ağı mimarisi verilmektedir. Bir katmandaki her bir nöron, bir sonraki katmanın bütün nöronlarına bağlanmakla birlikte aynı katmandaki nöronlar arasında bağlantı bulunmamaktadır.



Şekil 3. Denetimli öğrenme süreci

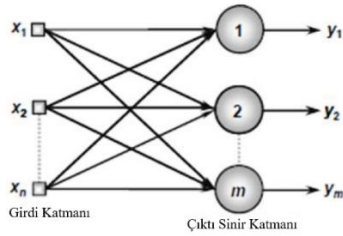


Şekil 4. Denetimsiz öğrenme süreci

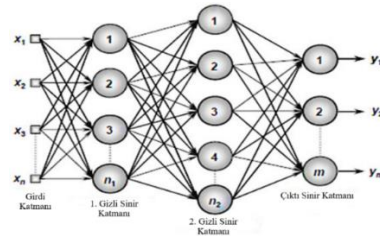
Yapay sinir ağı öğrenme kurallarına göre denetimli, denetimsiz ve pekiştirmeli ağlar olmak üzere üçe ayrılmaktadır; yapı açısından ise ileri ve geri beslemeli ağlar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Şekil 3'te gösterilen denetimli öğrenmede bir öğreticiye ihtiyaç duyulmaktadır. Denetimli öğrenme yaklaşımı, yapay sinir ağı modeline tahmini çözümlerini karşılaştırması amacıyla ağa her adımda beklenen çıktının etkin bir şekilde bildirilmesi temeline dayanmaktadır. Denetimli öğrenme algoritmalarında, öngörülen çıktı ile belirli çıktının karşılaştırılması yapılarak sinir ağının ağırlığı olan tüm parametreler karakterize edilmektedir (Eberhart ve Shi, 2007:67). Denetimli öğrenmede çıkış hatasının düşürülmesi ve ağırlıkların uyarlanabilir hale getirilmesi ile ağ çıktısının elde edilmesi istenmektedir. Bu öğrenmedeki eğitim süreci, yapay sinir ağı tarafından üretilen tahmini çözümlerin gerçek çözümler ile karşılaştırılarak sonuçlara ilişkin hata miktarının belirlenmesi ve modelin yapay sinir hücreleri arasındaki bağlantıların kuvvetlerini en küçük hata değerine ulaşana kadar güncellemesi şeklinde gerçekleşmektedir. Her bir giriş değeri için istenen çıkışın sisteme tanıtıldığı ve yapay sinir ağlarının giriş-çıkış ilişkisini gerçekleştirene kadar ağırlıkların aşamalı ayarlandığı denetimli öğrenme sürecinde, kapalı döngü geri beslemeli bir sistem oluştururken; bilinmeyen çevre ise döngü dışında kalmaktadır (Haykin, 2008:16). Şekil 4'te gösterilen kendi kendini örgütlenme olarak da adlandırılan denetimsiz öğrenmede, eğitim sırasında ağ tarafından üretilen tahmini çözümlerin karşılaştırılabileceği gerçek çözümler mevcut olmamakta, öğrenme işlemi kendi kendine gerçekleşmekte ve öğrenme işleminin ne zaman tamamlanacağına ağ karar vermektedir. Ağ, veriyi üyeleri birbirinin benzeri olan öbeklere ayırmaktadır (Elmas, 2011:25). Tüm uyarılma süreci boyunca yalnızca yerel bilgilere yer veren denetimsiz öğrenme algoritmalarında verilerin kümelenmesini sağlamakta ve sunulan veriler düzenlenerek ortaya çıkan kolektif özellikler keşfedilmektedir (Eberhart ve Shi, 2007: 47). Denetimli ve denetimsiz algoritmalar tek başlarına doğru sonuçları elde etmek için yeterli olmadığında iki veya daha fazla algoritma analizde bir arada kullanılmaktadır. Denetimli ve denetimsiz algoritmaların bir arada kullanıldığı algoritmalar olan pekiştirmeli öğrenme yönteminde ise ağ doğrudan gerçek ağ çıkışını vermemekte ve ağ çıkışının iyi veya kötü olarak değerlendirilmesini sağlamaktadır (Elmas, 2011: 302).

Pekiştirmeli öğrenme, dinamik bir yapıya sahiptir ve deneme yanılma etkileşimleri yoluyla öğrenme işlemi gerçekleşmektedir (Kaelbling ve diğerleri, 1996).

Yapay sinir ağı yapısında, nöronların konumlanması ve birbirleriyle olan ilişkilerinin belirlenmesi sinir hücrelerinin sinaps bağlantıları (ağırlıklar) tarafından belirlenmektedir. Yapay sinir ağları, düğümleri ve bağlantıları farklı biçimlerde bir araya getirmekte, bu düğüm ve bağlantı yapılarına göre farklı isimler almaktadır (Elmas, 2011: 25). Yapay sinir ağları, nöronlar arasında oluşturulan bağlantıların bilgi taşıma yönlerine göre geri döngüye girmeden ileriye doğru tek yönlü ileri beslemeli ağ ve aynı düzeyde veya bir öncekinin girdisi olan düğüm çıktısında geriye döngü bağlantı oluşturabilen geri beslemeli ağ olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Esnek-çoklu katmanlar şeklinde oluşturulan ve farklı fonksiyonları tahmin edebilen çok katmanlı algılayıcı, bir veya birden fazla gizli katman ve çıktı katmanından oluşan ileri beslemeli sinir ağı olarak ifade edilmektedir. İleri beslemeli ağ yapısında bir girdi belirli bir çıktıyla ilişkili ve sinyaller tek yönlü hareket ettiği için durağan (statik) olmaktadır. Aynı işlem, çıkış katmanındaki nöron tarafından da yapılarak tamamlanmaktadır. Şekil 5'te gösterilen tek katmanlı ileri beslemeli yapay sinir ağı mimarisinde, n tane girdi ve m tane çıktıdan oluşan ağ yapısında sadece bir girdi katmanı ve çıktı katmanı yer alırken gizli katman yer almamaktadır. Bilgi akışı girdi katmanından çıktı katmanına doğru tek yönde gerçekleşmekte ve çıktı sayısı, sinir hücresinin sayısına eşit olmaktadır. Bu ağlar genellikle, örüntü sınıflandırma ve doğrusal filtreleme problemlerinde kullanılmaktadır (Silva ve diğerleri, 2016:17). İleri beslemeli ağların önemli bir alt türü de geri yayımlı ileri beslemeli yapay sinir ağlarıdır. Birbirinden bağımsız olarak geniş disiplinlerden türetilen geri yayılım ağı, etkili ve karmaşık, tanımlanmamış problemlere doğrusal olmayan çözümler getirebilen ağ çeşidi olmaktadır. Geri yayılım ağları çok katmanlı ağlarda kullanılan delta kuralı için geliştirilmiş bir algoritmaya sahip olup hiyerarşik yapıdadır. Geri yayılım ağlarında katman sayısının ve her katmandaki düğüm sayısının dikkatli seçilmesi gerekmektedir. Girdi verisi ile istenilen çıktı arasındaki ilişkinin karmaşıklığı arttıkça, gizli katmanlardaki işleme elemanlarının sayısı artırılmakta ve ele alınan süreç birçok aşamalara ayrılabilirse çok sayıda gizli katmanın kullanılması gerekmektedir. Süreç aşamalara ayrılamıyorsa ve çok fazla sayıda gizli katman kullanılıyorsa ağda yalnızca ezberleme ortaya çıkmakta ve genel sonuçlara yol açmaktadır. Diğer bir kural ise ağda kullanılan eğitim verisinin miktarı, gizli katmanlardaki işleme elemanlarının sayısı için bir üst sınır oluşturmaktadır. Bu üst sınırı bulmak için ilk olarak eğitim kümesindeki girdi ve çıktı çiftlerinin sayısı bulunmakta ve ağdaki toplam giriş ve çıkış düğümlerinin sayısına bölünerek beş ile on arasında bir dereceleme faktörüne oranlanmaktadır. Gizli katmanların az miktarda işleme elemanına sahip olması önemli bir faktör olmaktadır (Elmas, 2011: 144).

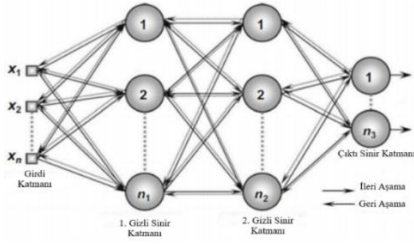


Şekil 5. Tek katmanlı ileri beslemeli sinir ağı

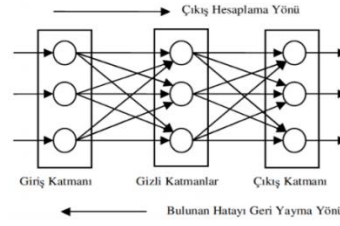


Şekil 6. Çok katmanlı ileri beslemeli sinir ağı

En az iki sinir katmanından oluşan çok katmanlı ağ yapısında sinir hücreleri gizli ve çıktı katmanları arasında dağıtılmaktadır. Farklı alanlardaki problemlerde geniş uygulama aralığına (evrensel yaklaşım teorisi, örüntü tanıma, sürecin tanımlanması ve kontrolü, zaman serileri tahmini ve öngörüsü, sistem optimizasyonu vb.) sahip olan çok katmanlı ileri beslemeli yapıya sahip olan ağın eğitim süreci denetimli öğrenme şeklinde gerçekleşmektedir. Şekil 6'da gösterilen bir veya birden fazla gizli katmandan oluşan ileri beslemeli çok katmanlı ağda n adet sinyale sahip bir adet girdi katmanı, birinci gizli katmanda n_1 tane nörona, ikinci gizli katmanda n_2 tane nörona, çıktı değerlerini gösteren m adet sinir hücresinden oluşan bir adet çıktı katmanı bulunmaktadır. Çok katmanlı ağın eğitim süreci boyunca öğrenme algoritması olarak geri yayımlı algoritma kullanılmaktadır (Silva ve diğerleri, 2016: 42). Genelleştirilmiş delta kuralı olarak da bilinen geri yayılım algoritmasının kullanıldığı çok katmanlı ağının eğitim süreci, iki aşamanın birbiri ardına uygulanmasıyla tamamlanmaktadır.



Şekil 7. İki gizli katmanlı geri yayılım algoritması



Şekil 8. Geri beslemeli ağ yapısı

Şekil 7'deki ilk aşama ileriye doğru yayılım (forward propagation) olarak adlandırılmaktadır. Eğitim kümesinden alınan örnekler girdi ağına yerleştirilmekte ve girdilerden elde edilen çıktı değerleri ortaya çıkana kadar bir katmandan diğerine iletim sağlanmaktadır. Bu aşama sadece nöronların ağırlıkları ve eşik değerini de dikkate alan ağdan elde edilen çıktıları içermektedir. Ağ çıktısı tarafından elde edilen cevap, daha önce denetimli öğrenme sürecinde bahsedildiği gibi, istenilen cevap ile karşılaştırılmaktadır. Elde edilen hatalar, geriye doğru besleme olarak adlandırılan ikinci aşamada uygulanmaktadır. İlk aşamadan farklı olarak, ağırlıklar ve eşik değerleri değiştirilmemektedir. Diğer bir ifadeyle her bir yinelemede birbiri ardına gerçekleşen ileri ve geriye doğru aşamalar ağırlıkların ve eşik değerlerin düzenlenmesine izin vermekte ve hatalar azaltılmaktadır. Yinelenen ağlarda ise sinir hücresinin çıktı değerleri, diğer sinir hücreleri için yinelemeli girdi olarak kullanılmaktadır. Çıktı sinyallerinden birisinin gizli katmanı beslediği geri beslemeli ağın kullanılmasıyla, bir önceki çıktı dikkate alınarak çıktı üretilmektedir (Silva ve diğerleri, 2016: 84). Geri beslemeli ağ yapıları, genellikle denetimsiz öğrenme algoritmalarının uygulandığı ağlarda kullanılmaktadır. Geri beslemeli ağ, dinamik bir yapıda olup bir girdi için bir denge noktasına ulaşmaya dek birçok döngüyü değiştirebilmektedir. Böylelikle bir girdi birden çok çıktı serisi üretebilmektedir. Şekil 8'de geri beslemeli ağ yapısında bir nöron çıkışının diğer her bir nöronun girişine bağlı olduğu gösterilmektedir.

3.2. Bulgular

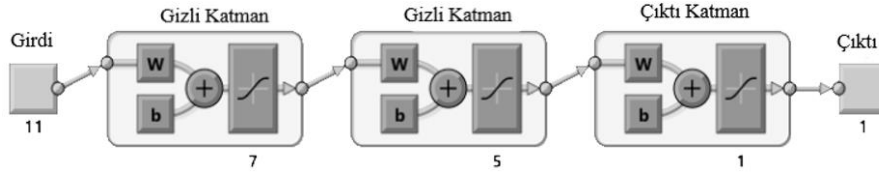
Ülkelerin dijitalleşme çabaları incelendiğinde verimlilik ve dijitalleşmenin önemli bir neden sonuç bağının olduğu ve sürdürülebilir kalkınma için uygulanan ya da uygulanacak politikalarda bir bütün içinde ele alındıkları görülmektedir. Çalışma kapsamında, dijitalleşme göstergelerinden olan Mobil Hücresel Abonelikler (MHA), Geniş Bant Abonelikleri (GBA), İnternet Erişimi (IE), Sabit Telefon Abonelikleri (STO), Kamu BİT Yatırımları (KBİTY), BİT girişim sayısı (BİTGS), BİT pazar büyüklüğü (BİTPB) ile birlikte dijitalleşmeyi destekleyen Araştırma Geliştirme (Ar-Ge) ve Sabit Sermaye Oluşumu (SSO) ve dijitalleşme kazanımları arasında yer verilebilen Enerji Kullanımı (EK) ve emisyon (EMS) değişkenlerinin verimlilik (V) üzerindeki etkileri ele alınarak, 2005-2020 arası dönem Türkiye'de dijitalleşme ve verimlilik üzerinde etkili olan değişkenlerin önem sıralamalarının yapay sinir ağ mimarisini çerçevesinde incelenmektedir. Çalışmada ele alınan düzenlenmiş veri seti Dünya Bankası, Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü (OECD), T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ve Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu veri dağıtım sistemlerinden elde edilmektedir.

Eğitim yoluyla öğrenen ve sinir ağlarına benzeyen yapısıyla doğrusal olmayan kestirimci modellerden olan yapay sinir ağları ile tahmin edicilerin değişkenler arasındaki olası tüm etkileşimleri saptanmıştır. Her katmanda yer alan nöronlar, bir sonraki katmandaki nöronlara bağlı olduğundan, her bağlantının kendine özgü ağırlığı belirlenmiş ve bağlı nöronun çıktısının ağırlıklı kombinasyonu bir sonraki nöronun girdisine etki ettirilmiştir. Gerçek ve hesaplanan çıktı arasındaki farka dayanarak çıktı düğümlerinden iç düğümlere kadar olan ağırlıklarının ayarlayan geri yayılım algoritması kullanılmıştır. İşlem elemanı ağırlık değerleri (ağın eğitilmesi) rastgele atandıktan sonra seriler ağa devamlı gösterilerek en doğru ağırlık değerleri belirlenmiş ve genellemeye ulaşıldığında ağın öğrenme süreci sonlandırılmıştır. Eğitim aşamasından sonra ise ağırlıklar değiştirilmeden, daha önce tanıtılmayan örnekler için çıktı üretimi sağlanarak eğitim süreci test edilmiş ve performans ölçümü sağlanmıştır. Eşitlik 3'te sinaptik bağlantılar x_i , bağlantı üzerindeki ağırlıklar w_i ve aktivasyon fonksiyonunun aktiflediği eşik değeri b olmak üzere,

$$Y(V) = \sum_{i=1}^n w_i x_i - b = w_1 MHO + w_2 GBA + w_3 İE + w_4 STO + w_5 KBİT + w_6 BİTGS + w_7 BİTPB + w_8 ARGE + w_9 SSO + w_{10} EK + w_{11} EMS - b \quad (3)$$

şeklinde model belirtilebilmektedir. Dijitalleşmenin verimlilik üzerinde etkili olan değişkenlerin incelenmesi için model kurulduğunda, ağın mimarisinden öğrenme kuralına ve hata payının hesaplama oranına kadar hata girdi, çıktı ve gizli katmanlarının sayısının belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu çerçevede, parametrelerin tespit edilmesi ve uygun parametre belirlenene kadar model tahmininin

gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Uygun mimari belirlendikten ve çok sayıda model tahmin edilerek uygun modele karar verildikten sonra en iyi performansa sahip ağ belirlenmiştir.



Şekil 9. En iyi performansa sahip çok katmanlı algılayıcı model gösterimi

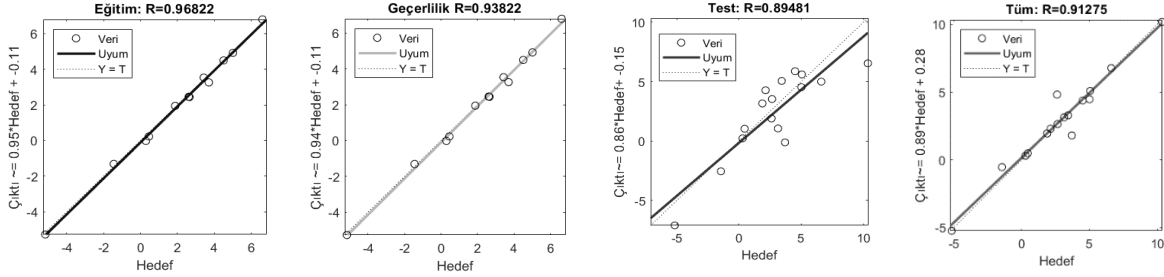
Eğitim seti ağın eğitilmesi için, geçerlilik seti gizli katman process eleman sayısının belirlenmesinde ve test seti ise kurulan modelin performansının ölçülmesinde kullanılmaktadır. Yapay sinir ağı modellemesinde en iyi tahminde bulunulan ağ mimarisi Şekil 9'da gösterilmektedir. Yapay sinir ağlarından çok katmanlı algılayıcı bir (1) girdi-iki (2) gizli katman-bir (1) çıktı katmanı olarak dizayn edilmiştir. Girdi katmanında dokuz (11) bağımsız değişken (nöron) çıktı katmanında ise bir (1) bağımlı değişken (nöron) bulunmaktadır. Ağ oluşumunda her bir test işlemi için hata kareler toplamı incelenerek model yapısı karşılaştırmaları sonucunda Model 3 üstünden analize devam edilmiştir. Gizli katmana ilişkin aktivasyon fonksiyonu hiperbolik tanjant ve çıktı katmanına ilişkin aktivasyon fonksiyonu sigmoid olarak belirlenmiştir. Gizli katman nöron sayıları ise sırasıyla 7 ve 5 olarak elde edilmiştir. Tablo 1'de serilerin eğitim (%70), test (%15) ve değerlendirme-geçerlilik (%15) olmak üzere üçe ayrıldığı gözlemlenmektedir.

Tablo 1. Çok katmanlı algılayıcı model performans karşılaştırması-ağ mimari bilgisi

Model Yapıları	Aktivasyon Fonksiyonu		Nöron Sayısı		Performans (SSE)	
	Gizli Katman	Çıktı Katman	Gizli Katman-I	Gizli Katman-II	Eğitim	Test
Model 1	Hiperbolik Tanjant	Doğrusal	7	5	0.358	0.764
Model 2	Hiperbolik Tanjant	Hiperbolik Tanjant	7	5	0.156	0.047
Model 3	Hiperbolik Tanjant	Sigmoid	7	5	0.123	0.020
Model 4	Sigmoid	Doğrusal	7	5	0.650	0.987
Model 5	Sigmoid	Hiperbolik Tanjant	7	5	0.850	0.055
Model 6	Sigmoid	Sigmoid	7	5	0.211	0.120
Girdi Katmanı		Bağımsız Değişkenler				
					BITPB	
					KBITY	
					SSO	
					BITGS	
					STA	
					GBA	
					MHA	
					IE	
					ARGE	
					EK	
					EMS	
		Nöron (Birim) Sayısı			11	
		Ölçekleme Yöntemi			Normalleştirme	
		Başlangıç Öğrenme Oranı			0.4	
		Momentum Katsayısı			0.9	
		Optimizasyon Algoritması			Gradyan İniş (Eğim Azaltma)	
		Öğrenme Kuralı /Algoritması			Momentum/Geri Yayılım	
		Doğrulama Türü			%70 Eğitim %15 Geçerlilik %15Test	
Gizli Katman		Katman Sayısı			2	
		Gizli Katman-I Nöron Sayısı			7	
		Gizli Katman-II Nöron Sayısı			5	
		Aktivasyon Fonksiyonu			Hiperbolik Tanjant	
Çıktı Katmanı		Bağımlı Değişken			V	
		Nöron (Birim) Sayısı			1	
		Ölçekleme Yöntemi			Normalleştirme	
		Aktivasyon Fonksiyonu			Sigmoid	
		Hata Fonksiyonu			Hata Kareler Toplamı	

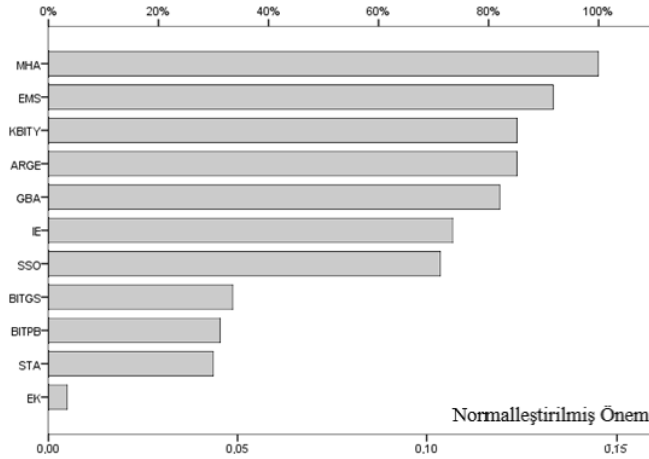
En iyi performansa sahip ağın belirlenmesinde çeşitli aktivasyon fonksiyonları denenmekte ve Tablo 1'de belirtilen aktivasyon fonksiyonu ile kurulan Model 3'ün en düşük hata payına sahip olduğu belirlenmektedir.

Gizli katman sayısının belirlenmesinde, gizli katman sayıları artırılarak geçerlilik verilerine ilişkin hata kareler toplamının en duşuk olduğu katman belirlenmiştir. Gizli katman sayısındaki artış, geçerlilik setindeki ağ performansını artırmakla birlikte, aşırı renme olasılığından dolayı test performansında azalmada ortaya çıkartabilmektedir. Şekil 10'da yapay sinir ağ çıktısı ve gerçek verimlilik değeri uyumları incelendiğinde, Model 3 çerçevesinde, ele alınan bağımsız değişkenlerin verimliliği doğru Şekilde tespit edilip yorumlanmasında önemli birer etken olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 10. Yapay sinir ağ çıktısı-gerçek değer uyumu

Performans lm ve test sonuçları ele alındığında bağımsız değişkenlerin verimlilik üzerinde belirleyici etkileri olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 10'da ağ yapısına ilişkin tahmin edilen eğitim, test ve geçerlilik veri setleri için tahmin edilen regresyon doğrusuları gösterilmiştir. Yatay eksen gerçekleşen değerleri, dikey eksen tahmin değerlerini ve $Y=T$ doğrusu ise ağ sonucu istenen durumu göstermektedir. Tahmin değerlerin $Y=T$ doğrusuna yakınlığı ve paralellik'e yaklaşması ağın uyumunu ve renme yetkinliğini gösterdiğinden ağın hatasının az olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 11. Bağımsız değişkenlere ilişkin önem düzeyleri–normalleştirilmiş önem

Yapay sinir ağları kullanılarak tahmin modelinin oluşturulması sonrasında bağımsız değişkenlerin verimlilik üzerindeki önem düzeyleri belirlenmiştir. Şekil 11'de model yapısındaki bağımsız değişkenlerin verimlilik üzerindeki etkilerinin önem sıralaması çerçevesinde bağımsız değişkenlere ilişkin ağrlık değerleri incelendiğinde, sırasıyla, Mobil Hücresel Abonelikler (MHA-%100), Emisyonlar (EMS-%92), Kamu BİT Yatırımları (KBİTY-%86), Araştırma Geliştirme (Ar-Ge-%86) Faaliyetleri, Geniş Bant Abonelikleri (GBA-%80), İnternet Erişimi (İE-%77), Sabit Sermaye Oluşumu (SSO-%75), BİT Girişim Sayısı (BİTGS-%37), BİT Pazar Büyüklüğü (BİTPB-%35), Sabit Telefon Abonelikleri (STO-%33) ve Enerji Kullanımı (EK-%4) değişkenlerin verimliliği açıklama üzerinde etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

4. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Çalışma kapsamında, Türkiye'de 2005-2020 yılları arasında dijitalleşmenin emek verimliliği üzerindeki etkisi incelenmektedir. Türkiye'de emek verimliliğini etkileyen dijitalleşme göstergeleri ortaya konulduktan sonra, sürdürülebilir kalkınma odaklı dijitalleşmenin belirleyicilerinin verimlilik üzerine etkilerinin değerlendirilmesinde veri odaklı olma özelliğinden dolayı n bilgiye sahip olunmasını gerekli kılmayan ve fazla sayıda olası doğrusal olmayan modellemeye imkân sağlayan, yapay sinir ağ mimarisi kullanılmaktadır. Dijitalleşme sürecinde altyapı çalışmaları gerektiren mobil hücresel abonelik ve geniş bant aboneliği ele alındığında, IoT, Büyük Veri ve AI kullanımında artış meydana getirdiklerinden dijital hizmet talebinde artış sağlamaktadır. Talep artışı ise beraberinde hem dijitalleşme için ayrılan kaynak ve yatırım

artışlarını beraberinde getirmekte hem de yeni bilgi ve iletişim kanalının hızlı gelişimini desteklemektedir. Ek olarak, dijital çağda etkisini gösteren afet, pandemi, vb. diğer olayların yaşanması ile birlikte ortaya çıkan eğitim, sağlık ve kamu hizmetlerinin online olma gerekliliği dijitalleşme süreci içinde olan ülkelerde altyapı çalışmalarının hızlanmasını sağlamaktadır. Bu kapsamda altyapı çalışmaları sonucunda Mobil Hücresel Abonelikler (MHA) ve geniş bant aboneliğinde artış yaşanması, İnternet Erişimi (İE) sağlayan kişi sayısında da artış yaratılmasına neden olarak üretkenliği ve beraberinde verimliliği artırmaktadır. Sosyoekonomik kalkınma için kapsayıcı ve sürdürülebilir büyümenin yaratılmasına katkı sağlanması sonucunda dijitalleşmede hızlanma gözlemlenmektedir. Dijitalleşmede yaşanan hızlanma ile birlikte ortaya çıkan verimlilik artışları ise yeni fırsatların yaratılarak sürdürülebilir kalkınmada rekabet avantajı sağlanmasına olanak sunmaktadır. İnternet Erişimi (İE) sağlayan kullanıcılardaki artış katılımın artmasını sağlayarak hizmetlerin dijitalleşmesi yönündeki talepleri artırmakta ve daha fazla bilginin sunulmasının sağlanması nedeniyle emek verimliliğinde artış gözlemlenmektedir.

Performans ölçümü ve test sonuçları ele alındığında bağımsız değişkenlerin verimlilik üzerinde belirleyici etkileri elde edilmiştir. Verimlilik üzerindeki en büyük etkiye sahip olan Mobil Hücresel Aboneliklerin (MHA) sayısının artması verimlilik üzerinde iki yönlü doğrudan etki yarattığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu doğrudan etkilerden ilki altyapı yatırımlarının talep edilmesi ve ikincisi de bireysel kullanımın artması şeklinde gözlemlenebilmektedir. Altyapı talepleri devletin altyapı yatırımlarına hız vermesini sağladığından sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılmasının kolaylaşmasının yanı sıra kamu-özel sektör ve vatandaşların BİT kullanımının artmasında neden olmaktadır. Bu durum da genel bir sürdürülebilir kalkınma sağlamaktadır. Elde edilen bulgulara göre verimliliğe etki eden Emisyonlar (EMS) ile ilgili gelişmiş ülkeler dijitalleşme süreçlerinde iklim koruma ve iklim krizi ile ilgili adımlar atmaktadır. Dijitalleşme sürecinin yürütülebilmesi için enerjiye ihtiyaç olduğundan gelişmiş ülkeler yenilenebilir enerji kaynaklarını (güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, vb.) kullanarak emisyon oranlarını azaltmaktadır ve dijitalleşme sürecinde emisyon oranları düşerken, gelişmekte olan ülkelerde ise enerji ihtiyacının karşılanması için gerekli kaynak olmaması ve enerjinin pahalı olması emisyon oranlarında artış yaşanmasına neden olmaktadır. Gelişen altyapılar nedeniyle ortaya çıkan ve fosil kaynak tüketimini azalttığından sera gazı ve CO₂ Emisyonlarının (EMS) düşmesine neden olan dijitalleşmenin çevre ve iklim koruması ile ilgili olumlu ve olumsuz (artan enerji ve kaynak tüketimi) makroekonomik etkileri, sürekli artan internet trafiği ve sürekli artan kalite arayışları nedeniyle telekomünikasyon şirketleri dijital altyapıları genişletmek için sürekli yatırım yapmaktadır. Bu kaynak ve enerji tüketimi olumsuz etki olarak görülse de aynı zamanda altyapının güçlendirilmesi sonucu nedeniyle olumlu bir etki olarak da değerlendirilebilmektedir.

Verimlilik üzerinde etkiye sahip bir diğer değişken olan Kamu BİT Yatırımlarının (KBİTY) emek verimliliği üzerinde etkisi e-Devlet kullanımının genişletilmesi ile açıklanabilmektedir. Emek verimliliğindeki artış fiziki sermaye, tasarruf ve yatırım, yeni teknoloji ve insan sermayesi olmak üzere üç ana faktöre bağlı olduğundan dijitalleşmede e-Devlet kullanım oranının yüksek olmaktadır. E-Devlet ve diğer Kamu BİT Yatırımları (KBİTY) ile kamu hizmetlerinin sunulması ve kamu yararı edinilmesi hedeflendiğinden, sürdürülebilir kalkınmanın sağlanmasında önemli etkenler arasında yer almaktadır. Türkiye’de Kamu BİT Yatırımlarının (KBİTY) sektörel bazdaki dağılımında, en büyük payı; eğitim, ulaştırma ve haberleşme olmak üzere diğer kamu hizmetleri sınıfı almaktadır. Verimlilik üzerindeki etkiye sahip bir diğer değişken olan Araştırma Geliştirme (Ar-Ge) Faaliyetleri Türkiye’de emek verimliliğini artırmak için e-Devlet hizmetlerinin genişletilmesi ve kullanım oranının yükseltilmesi amacıyla yürütülmektedir. Ar-Ge çalışmalarının dijitalleşmeyi hızlandırıcı etkisi ile yeni bilgi oluşumu ve kullanımının artması sağlanmakta ve emek verimliliğinde artış ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, Türkiye’de dijitalleşmenin temel belirleyicisi olarak Ar-Ge’nin bütçe içerisindeki payının artırılması gerekmektedir.

Geniş Bant Abonelikleri (GBA) değişkeni ise yüksek hızlı internet sağlayarak internet kullanım oranını artırmaktadır. İnternet erişimi ve hızı yüksek olan kullanıcı kamu hizmetleri ve diğer hizmetleri daha fazla kullanmaktadır. Kamu/özel sektörde ekonomik büyümenin ve beraberinde sürdürülebilir kalkınmanın sağlanabilmesi için verimlilik üzerinde etkiye sahip altıncı değişken olan BİT girişim sayısı (BİTGS) ve dijitalleşmede yol gösterici unsur olan ve verimlilik üzerinde etkiye sahip olan BİT pazar büyüklüğü (BİTPB) rakamları belirleyici olmaktadır. Verimlilik üzerinde etkiye sahip olan bir diğer değişkenler Sabit Telefon Abonelikleri (STO) ve Enerji Kullanımıdır (EK). Gelişmekte olan ülkeler sınıfından olan Türkiye’de enerji tüketimi, internet kullanımı, BİT ithalatı ve sayısı arasında aynı yönlü ilişki bulunmaktadır. Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeler enerji ihtiyaçlarını karşılamak için nükleer santral ve hidroelektrik santrali kurma stratejilerini uygulamaktadır. Bunun yanı sıra Türkiye’de emisyon ile ilgili çevre vergileri artırılarak, çevre dostu BİT uygulamalarının kullanımı teşvik edilmektedir. Emisyonların (EMS) azaltılmasına yönelik en önemli strateji e-Devlet hizmetlerinin genişletilmesi ve geliştirilmesi olarak ortaya çıkmaktadır. Kamu hizmetlerinin çoğunluğu internet aracılığıyla erişilebilir hale getirilerek kaynak israfının ve çevre kirliliğinin önüne geçilmektedir. Bu sayede, emisyon oranı düşük olan yeni teknolojiler emek verimliliğini artırarak sürdürülebilir kalkınmaya katkı sağlamaktadır.

Bilgi ve iletişim teknolojilerine dayalı dijitalleşme, ilgili makroekonomik alanlarda verimlilik iyileştirmeleri ve işlem maliyetlerinin azaltılması için önemli potansiyel sunmaktadır. BİT tabanlı dijital uygulamalar, yüksek refah, ürün ve süreç yeniliklerini ortaya çıkarmaktadır. Devletin sunduğu hizmetler e-Devlet aracılığıyla dijitalleştiğinden, ülkeler e-Devlet çalışmalarına önem vererek emek verimliliğini artırmaya çalışmaktadır. Özellikle gelişmiş ülkelerde e-Devlet iyileştirme çalışmaları dijitalleşme politikaları ile birlikte yürütölmektedir. Türkiye’de bu çalışmalar kapsamında özellikle altyapı çalışmalarına önem verilmekte ve İnternet Erişiminin (İE) önündeki altyapı eksikliği ortadan kaldırılmaya çalışılmaktadır. Türkiye’de internet altyapısı ile ilgili yapılan çalışmalar bazı bölgeler için yeterli olmadığından, o bölgelerde dijitalleşmenin gerçekleşmesi Sabit Telefon Abonelikleri ile sağlandığından mobil telefon aboneliklerinin sayısı arttığında sabit telefon aboneliklerinin sayısı azalmaktadır. Gelişmekte olan ülke sınıfında yer alan Türkiye’de dijitalleşme için yasal düzenlemeler ile devlet politikaları yürütölmekte ve dijitalleşme sürecinin etkin biçimde gerçekleştirilmesine çalışılmaktadır. Bu gelişmeler ışığında Türkiye’de sürdürülebilir dijitalleşme sağlamak amacıyla devlet politikası olarak yasal düzenlemeler yapılmış ve T.C. Cumhurbaşkanlığı Dijital Dönüşüm Ofisi açılmıştır. Bu ofis kapsamında e-Devlet hizmetlerinin geliştirilmesi ve artırılması amacıyla “Dijital Türkiye” çalışmaları hız kazanarak dijitalleşme sürecinde emek verimliliğinin artırılması amaçlanmıştır. Bu çalışma alanında ilk ve tek olması nedeniyle elde edilen bulgularla benzer çalışmaların sonuçları tartışılmamıştır. Dijitalleşme belirleyicilerinin verimlilik üzerindeki etkilerini ölçebilecek verilerin elde edilmiştir. Yeni çalışmalarda yeni değişkenler tanımlanarak araştırmacıların analizlerinde bu verileri kullanmaları daha net sonuçlara ulaşmalarını ve karşılaştırma yapmalarını sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Agricola, G., (1556). "De Re Metallica, Translated from the First Latin Edition (1912), RareBooks", <https://scholarsmine.mst.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1000&context=rare-books>, (Erişim Tarihi: 07.08.2021).
- Akarsu, Y., Kurt, S. ve Alacahan, N.D. (2020). "OECD Ülkelerinde Bilgi ve İletişim Teknolojilerinin İşgücü Verimliliği Üzerine Etkisi", *Journal of Life Economics*, 7(4), 309-322.
- Albon, C. (2018). "Python Machine Learning Cookbook: Practical Solutions from Preprocessing to Deep Learning", O'Reilly Media, Sebastopol.
- Aly, H. (2020). "Digital Transformation, Development and Productivity in Developing Countries: Is Artificial Intelligence a Curse or a Blessing?", *Review of Economics and Political Science*, DOI: 10.1108/REPS-11-2019-0145.
- Andriushchenko, K., Buriachenko, A., Rozhko, O., Lavruk, O., Skok, P., Hlushchenko, Y., Muzychka, Y., Slavina, N., Buchynska, O. ve Kondarevych, V. (2020). "Peculiarities of Sustainable Development of Enterprises in the Context of Digital Transformation", *Journal of Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 7(3), 2255-2270.
- Ateş, G. ve Halışçelik, E. (2014). "Pareto Optimumu Çerçevesinde Keynes'den Piketty'e Liberallerin Devletçi Politika Açmazları", *Mülkiye İktisadi ve Sosyal Araştırmalar Merkezi Politika Öneri Raporu/1*, 1-5.
- Aydın, M. (2016). "Enerji Verimliliğinin Sürdürülebilir Kalkınmadaki Rolü: Türkiye Değerlendirmesi", *Yönetim Bilimleri Dergisi*, 14(28), 409-441.
- Bassanini, A., Scarpetta, S. ve Visco, I. (2000). "Knowledge, Technology and Growth: Recent Evidence from OECD Countries", *National Bank of Belgium Working Paper*, No. 6.
- Becker, J., Bergener, P., Kleist, S., Pfeiffer, D. ve Räckers, M. (2008). "Business Process Model-Based Evaluation of ICT Investments in Public Administrations", *Fourteenth Americas Conference on Information Systems*, Toronto, ON, Canada, 1-10.
- Bertani, F., Raberto, M., Teglio, A. (2020). "The Productivity and Unemployment Effects of the Digital Transformation: An Empirical and Modelling Assessment", *Review of Evolutionary Political Economy*, 1, 329-355.
- Bertini, P. (2016). "Focus on Technology Inders True Digital Transformation", <https://www.brandknewmag.com/focus-on-technology-hinders-true-digital-transformation/> (Erişim Tarihi: 2. 09. 2020).
- Beyoğlu, A. (2021). "Yerel Kalkınmada Turizmin Rolü: Yabancı Ziyaretçilerin Etkisi Üzerinden Edirne İli Örneği", *İktisadi ve İdari Bilimlerde Araştırma ve Değerlendirmeler*, Editör: Vatanserver, K., Cilt 2, Gece Kitaplığı, Ankara, 21-42.
- Bhutani, S. ve Paliwal, Y. (2015). "Digitalization: A Step Towards Sustainable Development", *OIDA International Journal of Sustainable Development*, 8(12), 11-24.
- Bocutoğlu, E. (2012). "İktisat Teorisinde Emeğin Öyküsü: Değerin Kaynağı Olan Emekten Marjinal Faydanın Türevi Olan Emeğe Yolculuk", *Hak-İş Uluslararası Emek ve Toplum Dergisi*, 1(2), 127-150.
- Bondarenko, S., Liganenko, I. ve Mykytenko, V. (2020). "Transformation of Public administration in Digitalconditions: World Experience", *Prospects of Ukraine, Socialdevelopment&Security*, 10(2), 76-89.
- Camba, A.L. ve Camba, A.C. (Jr). (2020). "The Cointegration Relationship and Causal Link of Internet Penetrationand Broadband Subscription on Economic Growth: Evidence from ASEAN Countries", *Journal of Economicsand Business*, 3(1), 1-8.
- Cheng, B. ve Titterington, D.M. (1994). "Neural Networks: A Reviewfrom a Statistical Perspective", *Statistical Science*, 9(1), 2-30.
- Czernich, N., Falck, O., Kretschmer, T. ve Woessmann, L. (2011). "Broadband Infrastructure and Economic Growth", *The Economic Journal*, 121(552), 505-532.
- Çağlar, E. ve Koyuncu, E. (2018). "Toplam Faktör Verimliliği İçin Politika Çerçevesi Geliştirilmesine Destek Projesi Beyaz Kitap", <https://www.tr.undp.org/content/turkey/tr/home/library/poverty/toplam-faktoer-verimlili-projesi-beyaz-kitap.html> (Erişim Tarihi: 24.07.2021).
- Dang, G. ve Pheng, L. S. (2015). "Theories of Economic Development, In Infrastructure Investments in Developing Economies", Springer, Singapore.
- Degada, A., Thapliyal, H. ve Mohanty, S. P. (2021). "Smart Village: An IoT Based Digital Transformation", *IEEE 7th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, New Orleans.
- Demirkıran, S. (2020). "Dijital Kamu Yönetimini Anlamak, Yönetim, Liderlik ve Pazarlama", İksad Yayınevi, Ankara.
- Demirkıran, S., Yücel, M.A., Terzioğlu, M.K. ve Selvi, A. (2021). "Dijital Dönüşüm Sürecinde Akıllı Yönetişim". *Tesam Akademi Dergisi*, 8(2), 489-519.
- Dobrolyubova, E. (2021). "Measuring Outcomes of Digital Transformation in Public Administration: Literature Review and Possible Steps Forward", *The NISPAcee Journal of Public Administration*, 14(1), 61-86.

- Eberhart, R.C. ve Shi, Y. (2007). "Computational Intelligence: Concepts to Implementations", Elsevier/Morgan Kaufmann Publishers.
- Ekren, N., Erdoğan, M.F. ve Bildik, K.H. (2020). "Makro Ekonomik Performansın Kişi Başına Düşen Göstergelerle Alternatif Analizi", *İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 19(37), 493-514.
- Elmas, Ç. (2011). "Yapay Zekâ Uygulamaları: Yapay Sinir Ağı, Bulanık Mantık, Genetik Algoritma", Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- Elmassah, S. ve Mohieldin, M. (2020). "Digital Transformation and Localizing the Sustainable Development Goals (SDGs)", *Ecological Economics*, 169, 1-12.
- Erçakar, M.E. ve Çolakoğlu, H. (2019). "Bilgi Ekonomisinin Ekonomik Büyüme Üzerindeki Etkileri: Bricks Ülkeleri ve Türkiye İçin Bir Analiz", *Yönetim ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 17(4), 248-268.
- Gerşil, M. (2007). "APC (Amerikan Verimlilik Merkezi) Çok Faktörlü Verimlilik Ölçme Modeli ve Bir Uygulama", *Ege Akademik Bakış*, 7(2), 527-542.
- Göcenöğlu, G. (2016). "BIT Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri İçin Ne Sunar?", <https://hburturkiye.com/blog/bilgi-ve-iletisim-teknolojileri-surdurulebilir-kalkinma-hedefleri-icin-ne-sunar>, (Erişim Tarihi:19.07.2021).
- Griliches, Z. (1987). "Productivity: Measurement Problems", The New Palgrave: A Dictionary of Economics, Editor: J. Eatwell, M. Milgateand P. Newman, Palgrave MacMillan, Basingstoke.
- Gust, C. ve Marquez, J. (2004). "International Comparisons of Productivity Growth: The Role of Information Technology and Regulatory Practices", *Labour Economics*, 11(1), 33-58.
- Güner, A. (2018). "Endüstri 4.0 Ekseninde İşletmelerde Yüksek Potansiyelli Verimliliğin Sağlanması İnsan Kaynakları Yönetiminin Rolü", Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Sakarya.
- Haykin, S. (2008). "Neural Networks and Learning Machines", Pearson Education, New Jersey.
- Henriette, E., Feki, M. ve Boughzala, I. (2016). "Digital Transformation Challenges", *MCIS 2016 Proceedings*,1-8.
- ITU (International Telecommunication Union), (2021). "World Telecommunication/ICT Indicators Database", <https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Pages/publications/wtid.aspx>, (Erişim Tarihi: Ağustos,2021).
- İnan, M. (2018). "Kamu Ekonomisi ve Dışsalılıkların İçselleştirilmesi", *Harran Üniversitesi İİBF Dergisi*, 2(2), 76-107.
- Jovanović, M., Dlačić, J. ve Okanović, M. (2018). "Digitalization and Society's Sustainable Development-Measures and Implications", *Zbornik radova Ekonomskog fakulteta u Rijeci :časopis za ekonomsku teoriju i praksu*, 36, 905-928.
- Kaelbling, L.P., Littman, M.L. ve Moore, A.W. (1996). "Reinforcement Learning: A Survey", *Journal of Artificial Intelligence Research*, 4, 237-285.
- Kamu BİT Yatırımları (KBİTY) Raporu, <https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2021/06/2021-Yili-Kamu-BIT-Raporu.pdf>, (Erişim Tarihi: 16.07.2021).
- Kepil, K.S. (2010). "İnsan Kaynakları Yönetimi", http://dso.org.tr/userFiles/File/insan_kay_yon_.pdf, (Erişim Tarihi: 19.07.2021).
- Khotamov, I.S. (2019). "World Tendencies and Development of the Digital Economy in Uzbekistan", *Архивнаучныхисследований*, 1(1), 1-5.
- Krugman, P. (1994). "The Age of Diminished Expectations", The MIT Press Cambridge Massachusetts, London.
- Layton, R. A. (2009). "On Economic Growth, Marketing Systems, and the Quality of Life", *Journal of Macromarketing*, 29(4), 349-362.
- Lee, J.W., Song, E. ve Kwak, D.W. (2020). "Aging Labor, ICT Capital, and Productivity in Japan and Korea", *Journal of the Japanese and International Economies*, 58, 101095.
- Liu, S.M. ve Yuan, Q. (2015). "The Evolution of Information and Communication Technology in Public Administration", *Public Administration and Development*, 35, 140-151.
- Luo, Y. ve Bu, J. (2016). "How Valuable is Information and Communication Technology? A Study of Emerging Economy Enterprises", *Journal of World Business*, 51(2), 200-211.
- Maheswar, R. ve Kanagachidambaresan, G. R. (2020). "Sustainable Development Through Internet of Things", *Wireless Network*, 26, 2305-2306.
- Mckinsey Global Institute. (2017). "Report, Jobs Lost, Jobs Gained: Workforce Transitions in a Time of Automation," <https://www.mckinsey.com> (Erişim Tarihi: 4.09.2021).
- Mete, M.H. (2010). "İmalat Sanayi İşletmelerinde Verimlilik Yönetimi ve Karşılaştırılmalı Bir Alan Araştırması", Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara.

- Mittelstaedt, J.D., Shultz, C.J., Kilbourne, W.E. ve Peterson, M. (2014). "Sustainability as Megatrend: Two Schools of Macromarketing Thought", *Journal of Macromarketing*, 34 (3) 253-264.
- Mlitz, K. (2021). "Global ICT Market Share by Country 2013-2021", <https://www.statista.com/statistics/263801/global-market-share-held-by-selected-countries-in-the-ict-market/>, (Erişim Tarihi: 8.09.2021).
- Mofleh, S., Wanous, M. ve Strachan, P. (2008). "Developing Countries and Ict Initiatives: Lessons Learnt from Jordan's Experience", *The Electronic Journal on Information Systems in Developing Countries*, 34(5),1-17.
- Müller, A.C. ve Guido, S. (2016). "Introduction to Machine Learning with Python: A Guide for Data Scientists", O'Reilly Media, Sebastopol.
- Nizetic, S., Solic, P., Artaza, D. L. I. G. ve Patrono, L. (2020). "Internet of Things (IoT): Opportunities, is Sues and Challenge Stowards a Smart and Sustainable Future", *Journal of Cleaner Production*, 274, 1-32.
- OECD, (2021). "Productivity", https://www.oecd-ilibrary.org/economics/productivity/indicator-group/english_0bb009ec-en, (Erişim Tarihi: 30.07.2021).
- Öztemel, E. (2012). "Yapay Sinir Ağları", Papatya Yayıncılık, İstanbul.
- Prokopenko, J. (1998). "Verimlilik Yönetimi", (Çev: Olcay Baykal, Nevda Atalay ve Erdemir Fidan), Milli Prodüktivite Merkezi Yayınları, 476, Ankara.
- Russel, R.R. (2019). "Neural Networks for Beginners: An Easy Text Book for Machine Learning Fundamentals to Guide You Implementing Neural Networks with Python and Deep Learning, (Artificial Intelligence)", Zanshin Honya Ltd, Brentford.
- Sabbagh, K., Friedrich, R., Darwiche, B., Singh, M. ve Ganediwalla, S. (2015). "Maximizing the Impact of Digitization, the Global Information Technology Report 2012", World Economic Forum.
- Samargandi, N. (2018). "Determinants of Labor Productivity in MENA Countries", *Emerging Markets Finance and Trade*, 54(5), 1063-1081.
- Schwertner, K. (2017). "Digital Transformation of Business", *Trakia Journal of Sciences*, 15(1),388-393.
- Serin, D. (2015). "Bilgi ve İletişim Teknolojilerinin Verimlilik Üzerine Etkisi: Türkiye Örneği", Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Adana.
- Silva, I.N., Spatti, D.H., Flauzino, R.A., Liboni, L.H.B. ve Reis Alves, S.F. (2016). "Artificial Neural Networks: A Practical Course, Springer, Berlin.
- Solow, R.M. (1957). "Technical Change and the Aggregate Production Function", *The Review of Economics and Statistics*, 39(3), 312-320.
- Suiçmez, H. (2002a), "Türkiye Ekonomisinin Verimlilik Performansı", <https://content.csbs.utah.edu/~ehrbbar/erc2002/pdf/P445.pdf>, (Erişim Tarihi: 19.07.2021).
- Suiçmez, H. (2002b), "Verimlilik ve Etkinlik Terimleri (Tarihsel Bakış)", *Mülkiye Dergisi*, 26(234), 169-183.
- Swingler, K. (2001). *Applying Neural Networks: A Practical Guide*, (3. Printing), Kaufman.
- Şaf, M.Y. (2015). "BİT Sektörünün Makroekonomik Etkileri: Uluslararası Karşılaştırma ve Türkiye Değerlendirmesi", T.C. Kalkınma Bakanlığı, Yayın No: 2918, Ankara.
- Şoltan, T. (2009). "Enerji Tüketimi ile GSYİH Arasındaki Nedensellik İlişkisinin Granger, Toda-Yamamoto ve ARDL Testleri ile İncelenmesi", Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Ekonometri Anabilim Dalı, İstanbul.
- Talas, C. (1997). "Toplumsal Ekonomi Çalışma Ekonomisi", İmge Kitabevi, Ankara.
- Tayyar, A. E. (2021). "BİT ve Enerji: Teledensite Enerji Yoğunluğunu Azaltıyor mu? Türkiye'den Kanıtlar", *6. İKSAD International Congress on Social Sciences*, 4, 281-294.
- Terzioğlu, M. K., Bulut, M. ve Erkut, E. N. (2018). "Göç: Girişimcilik ve Bilgi Teknolojilerinin Etkisi", *IV. International Conference on Applied Economics and Finance & Extended With Social Sciences (ICOAEF'18)*, Kuşadası, Turkey, 1227-1240.
- Terzioğlu, M. K., Yücel, M. A., Demirkıran, S. ve Acaroğlu, D. (2020). "Kentsel İnovasyonun Kentleşme Üzerine Mekânsal Etkisi", *İdealkent*, 11(30), 592-620.
- Tüzel, B. G. (2018). "Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri ve Toplam Faktör Verimliliği", Miki Matbacılık, Ankara.
- Ünsal, M. E. (2017). "Eğitim, Sağlık ve Ar-Ge Harcamalarının İşgücü Verimliliği Üzerindeki Etkileri: OECD Ülkeleri Üzerine Bir Panel Regresyon Analizi", *Uluslararası Ticaret ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 1(1), 17-28.
- Varlamova, J. ve Larionova, N. (2020). "Labor Productivity in the Digital Era: A Spatial-Temporal Analysis", *International Journal of Technology*, 11(6), 1191-1200.

- Walkowiak, E. (2021). "Neurodiversity of the Work Force and Digital Transformation: The Case of Inclusion of Autistic Workers at the Workplace", *Technological Forecasting & Social Change*, 168, 120739.
- WB (World Bank), (2021). World Bank nationalaccounts Data, and OECD NationalAccounts data files, <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD>, (Erişim Tarihi: Ağustos,2021).
- Wu, B., Tian, F., Zhang, M., Zeng, H. ve Zeng, Y. (2020). "Cloud Services with Big Data Provide a Solution for Monitoring and Tracking Sustainable Development Goals", *Geography and Sustainability*, 25-32.
- Yakut, E. (2020). "Veri Madenciliği ve Yapay Sinir Ağları: İşletmelerde Finansal Başarısızlık Tahminlemesi", Akademisyen Kitapevi, Ankara.
- YASED (Uluslararası Yatırımcılar Derneği). (2012). "2023 Hedefleri Yolunda Bilgi ve İletişim Teknolojileri", <https://www2.deloitte.com/tr/tr/pages/technology-media-and-telecommunications/articles/2023-hedefleri-yolundabilgiveletimteknolojilerideloittetuerkiye.html>, (Erişim Tarihi: 17.07.2021).
- Yıldız, S. (2017). "Sürdürülebilir Kalkınma İçin Karbon Vergisi", *Muhasebe ve Vergi Uygulamaları Dergisi*, 10(3), 367-384.
- Yılmaz, Y. (2021). "Dijital Ekonomiye Geçiş Süreci, Ölçümü ve Dijitalleşme Verimlilik İlişkisi", *İstanbul İktisat Dergisi*, 71, 283-316.
- Yiğitcanlar, T. ve Cugurullo, F. (2020). "The Sustainability of Artificial Intelligence: An Urbanistic Viewpoint from the Lens of Smart and Sustainable Cities", *Sustainability*, 1-24.
- Zheng, L., Batuo, M.E. ve Shepherd, D. (2017). "The Impact of Regional and Institutional Factors on Labor Productive Performance: Evidence from the Township and Village Enterprise Sector in China", *World Development*, 96, 591-598.
- Ziyadin, S.T., Shaikh, A. ve Ismail, G.Zh. (2019), "Digital Transformation of Public Administration: Proactive Customer Support", *The Journal of Economic Research & Business Administration*, 4(130), 127.

KESTİRİMCİ BAKIM PLANLAMA İÇİN MAKİNE ÖĞRENMESİ TEMELLİ BİR KARAR DESTEK SİSTEMİ VE BİR UYGULAMA

Banu SOYLU¹, Hatice YİĞİTER², Venüs SARIKAYA³, Zinnet SANDIKÇI⁴, Asena UTKU⁵

ÖZET

Amaç: Üretim sistemlerinde meydana gelen arızaları önlemek için Endüstri 4.0 altyapısını kullanan kestirimci bakım planlama işletmelerin gündemine girmiştir. Bu çalışmada, bir sistemde meydana gelen arızaların ve üretim duruşlarının en küçüklenmesi için nesnelerin interneti (IoT) ve makine öğrenmesi tabanlı bakım karar destek sistemi oluşturulmuş ve bir makine üzerinde pilot çalışma yapılmıştır.

Yöntem: Bu çalışmada, sistemin sürekli izlenebilirliğini sağlamak için sıcaklık, nem ve ses sensörleri kullanılmıştır. Bu sensörlerle alınan veriler IoT kullanılarak veri tabanına bir ağ aracılığı ile aktarılmıştır. Aktarılan bu verilerden sistemin durumunu (“arıza olabilir”, “sağlam”) tahmin etmek için makine öğrenmesi teknikleri (Destek Vektör Makinesi ve Karar Ağacı) kullanılmıştır.

Bulgular: Geliştirilen karar destek sistemi, bakım kararı verebilmektedir. Böylece pilot çalışma yapılan makinede gerçekleşmiş olan 1419 dk. beklenmeyen duruşların en küçüklenmesi sağlanacaktır.

Özgünlük: Yenilikçi bir yön olarak; sisteme giren ürün sırasının da arızaya etkisinin olabileceği sıralı örüntü madenciliği yöntemleriyle incelenmiştir. IoT, makine öğrenmesi, kestirimci bakım, sıralı örüntü madenciliği ve dinamik çizelgelemenin entegrasyonunu içeren bir bakım karar destek sistemi oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Nesnelerin İnterneti (IoT), Makine Öğrenmesi Teknikleri, Kestirimci Bakım, Sıralı Örüntü Madenciliği, Dinamik Çizelgeleme.

JEL Kodları: C38, M11, O32.

A MACHINE LEARNING-BASED DECISION SUPPORT SYSTEM FOR PREDICTIVE MAINTENANCE PLANNING AND AN APPLICATION

ABSTRACT

Purpose: In order to prevent breakdowns in production systems, predictive maintenance planning using Industry 4.0 infrastructure has been the focus of companies. In this study, a predictive maintenance decision support system integrated with internet-of-things (IoT) was developed and a pilot study was carried out on a machine to minimize the breakdowns and production downtime.

Methodology: Temperature, humidity, and sound sensors have been used in order to provide continuous monitoring of the system. The data obtained with these sensors is transferred to a database via a network using IoT. In order to predict the system state (“breakdown may occur”, “good”) from this data, the machine learning techniques (Support Vector Machine and Decision Tree) are used.

Findings: The proposed decision support system is able to make self-maintenance decision. Thus, it would be possible to minimize 1419 min. downtime of the machine that the pilot study was performed on.

Originality: The effect of production sequence on system breakdowns has been investigated with sequential pattern mining algorithms. A maintenance decision support system including the integration of IoT, machine learning, predictive maintenance, sequential pattern mining and dynamic scheduling has been developed.

Keywords: Internet-of-Things (IoT), Machine Learning Techniques, Predictive Maintenance, Sequential Pattern Mining, Dynamic Scheduling.

JEL Codes: C38, M11, O32.

¹ Prof. Dr., Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye, bsoylu@erciyes.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4164-7583 (Sorumlu Yazar-Corresponding Author).

² Endüstri Müh., Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye, haticeyigiterr@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9269-0111.

³ Endüstri Müh., Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye, venus.sarikayaa@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0429-948X.

⁴ Endüstri Müh., Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye, san.zinnet@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0968-5010.

⁵ Endüstri Müh., Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye, asenautku32@gmail.com ORCID: 0000-0001-6793-1369.

1. GİRİŞ

Dördüncü sanayi devrimi ile birlikte üretimde hızlı bir dijitalleşme başlamış, böylece makinelerin uzaktan kontrolünü ve sürekli çalışmasını sağlamak da sistemin sürdürülebilirliği açısından önem kazanmıştır. Dolayısıyla, sensörler, IoT (nesnelerin interneti), siber-fiziksel sistem, kestirimci bakım, büyük veri vb. kavramlar işletmelerin gündemine girmiştir (Pamuk ve Soysal, 2018). Çalışan bir makineden sensörler yardımıyla sürekli veri elde etmek ve bu verinin belirli sınırlar içinde olup olmadığını anlık olarak takip etmek mümkündür. Makinelerin online olarak sürekli takip edilebilmesi, IoT ve dijital teknolojilerdeki gelişmeler ile popülerlik kazanmıştır (Çakır ve diğerleri, 2021).

Kestirimci bakım stratejisi, bir sistem bozulmadan önce onun mevcut durumunu analiz ederek bakıma ihtiyacı olup olmadığını belirler. Dolayısıyla sistem parametrelerinin (sıcaklık, basınç, titreşim, ses, voltaj vb.) sürekli takip edilmesi gerekmektedir. Bu takipler için kullanılacak olan sensörlerin/cihazların veri toplaması, toplanan verinin IoT kanallarıyla depolanması ve depolanan büyük verinin de analiz edilmesi önemli ve zahmetlidir. Verilerin analizi sonucunda, arızalar meydana gelmeden önce kestirilip gerekli bakım planı hazırlanarak sistem güvenilirliği artırılır (Karaduman, 2020). Bu sebeple kestirimci bakım günümüzde diğer bakım stratejilerine göre en etkili ve doğru bakım planını oluşturduğu için oldukça önem kazanmıştır (Carvalho ve diğerleri, 2019). Kestirimci bakım sayesinde sistemde meydana gelecek uzun süreli aksamalar, yedek parça maliyetleri, üretim çizelgesindeki değişiklikler, termin sürelerindeki gecikmeler vb. pek çok problem önlenmektedir (Carvalho ve diğerleri, 2019; Köksal ve Uzun, 2016).

Endüstri 4.0 ile hayatımıza giren kestirimci bakımı uygulamak için IoT ve makine öğrenme teknikleri kullanılmaktadır (Zonta ve diğerleri, 2020). Yeni nesil üretim süreçlerinde veri transferinin sağlanması için nesnelerin internetinin kullanımı üretimdeki verimliliğin artmasına sebep olmuştur (Lu, 2017). Makine öğrenme teknikleri, büyük verileri analiz ederek faydalı bilgi üretme avantajı sayesinde işletmelere karar verme süreçlerinde yardımcı olur ve küresel pazarda rekabet gücünü artırır (Wamba ve diğerleri, 2020). Ayrıca bu analizler sayesinde dinamik endüstriyel ortamlara ait verilerin içerisindeki bilinmeyen/anlamlandırılmayan ilişkilerin çözülmesi de mümkün olur (Wuest ve diğerleri, 2016). Literatürde sensör verilerini makine öğrenmesi teknikleri ile analiz eden pek çok çalışma mevcuttur (Çınar ve diğerleri, 2020; Dalzochio ve diğerleri, 2020; Lei ve diğerleri, 2020; Carvalho ve diğerleri, 2019). Ancak bu çalışmalarda sensörler dışında üretim sisteminden gelen veriler genellikle analizlerde kullanılmamaktadır. Dolayısıyla sensör verileri ile birlikte üretim planlama, kalite kontrol, tedarik zinciri verileri de dikkate alınarak sistem verimliliği artırılabilir. Literatürde bu entegrasyon konusunda boşluk bulunmaktadır.

Bakım faaliyetlerinin etkilediği en önemli unsurlar arasında planlama faaliyetleri yer almaktadır. Üretimin bir aşamasında gerçekleşecek olan arıza hem üretim planını hem de dağıtım planını geciktirebilir. Statik bir üretim çizelgesi bakım faaliyetini dikkate almakta zorlanabilir. Ancak dinamik çizelgeler daha proaktifler ve beklenmedik arızaları absorbe etmekte daha yeteneklidirler. Dinamik çizelgeleme, düzensiz ürün gelişleri, sipariş iptali, işlem sürelerindeki farklılık, makine arızaları, teslim tarihindeki değişkenlik vb. tahmin edilemeyen durumlara en kısa sürede tepki vermeyi, üretim çizelgesini optimize etmeyi ve tutarlı bir bakım planının oluşturulmasını sağlar (Fang ve Xi, 1997; Baykasoğlu ve diğerleri, 2020).

Bu çalışmada, yatak üretiminin son aşaması olan paketleme makinesinden elde edilen geçmiş arıza ve bakım verileri, geçmiş üretim planları ve sensörlerden elde edilen anlık veriler kullanılarak bir bakım karar destek sistemi geliştirilmiştir. İlk olarak arızalar kaynağına göre gruplandırılmıştır. Elde edilen gruplar bakım uygulama metoduna göre "elektrik" ve "mekanik" olarak iki sınıfa ayrılmıştır. Her iki sınıfın da bakım yapma teknikleri farklı olduğu için Weibull analizi ile periyodik bakım süreleri belirlenmiştir. Periyodik bakımın yeterli olmayacağı, yaşanacak bir duruşun hem üretim planını hem de dağıtım planını geciktireceği için kestirimci bakım tekniklerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Sensörlerden elde edilen veriler, makine öğrenme tekniklerine girdi olarak verilmiş ve makinenin bakıma ihtiyacı olup olmadığı kestirilmiştir. Çalışmanın iki yenilikçi yönü bulunmaktadır. Bunlar;

- Makineye gelen ürün sırasının arızaya olan etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, sıralı örüntü madenciliği teknikleri kullanılarak arıza oluşturabilecek örüntüler keşfedilmiş ve üretim planında bu örüntülerin kullanılmaması önerilmiştir. Literatür araştırmamıza göre, bu konu daha önce literatürde ele alınmamıştır.
- Bütünleşik bir karar destek sistemi oluşturulmuştur ve bu sistemin bileşenleri şunlardır: Sistem durumunun makine öğrenme teknikleri ile tahminlenmesi, ürün sıralamasının arızaya olan etkisinin sıralı örüntü madenciliği ile keşfedilmesi ve üretim planlama departmanına bu örüntüler hakkında bilgi verilmesi, kestirilen bakım faaliyetinin üretime olan etkisini azaltmak için dinamik çizelgeleme stratejinin uygulanmasıdır.

Bölüm 2’de literatür özeti sunulmuştur. Bölüm 3’te problem tanımı yapılmıştır. Bölüm 4’te kullanılan yöntemler ve yapılan analizler açıklanmıştır. Bölüm 5’te bulgular verilmiştir. Bölüm 6’da ise bütün sonuçlar özetlenmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

İşletmelerin sistemlerini verimli kullanmasında makinelerin bakım politikaları önemli rol oynamaktadır. Bakım faaliyetlerinin sistematik olarak yürütülmesi, üretim veya hizmet sektörü fark etmeksizin, işletmelerde oluşacak kayıpların azaltılması, sistemdeki aksamaların giderilmesi, performansın artırılması açısından önem arz etmektedir (Çolak ve diğerleri, 2017).

Bakım stratejileri, düzeltici (plansız), önleyici (planlı) ve kestirimci bakım olarak üçe ayrılmaktadır (Susto ve diğerleri, 2012; Susto ve diğerleri, 2015; Carvalho ve diğerleri, 2019).

- **Düzeltilici bakım**, anlık arızalar meydana geldiğinde yapılmaktadır. Bu bakım stratejisi ile uzun duruş süreleri ve yüksek bakım maliyetleri olduğu literatürde bilinmektedir.
- **Önleyici bakım**, sistemde meydana gelmesi muhtemel arızaları önlemek için periyodik olarak tekrarlanan ve belirli bir zamana çizelgelenmiş bakımdır. Bu politika ile optimum bakım periyodu tespit edilebilir. Weibull analizi, bu periyodu tahmin etmek için sıklıkla kullanılan yöntemlerden birisidir. Weibull dağılımı, arızalar arasındaki ortalama sürenin tahmin edilmesinde ve deney/gözlem yoluyla elde edilmiş geniş veri yelpazesine uyum sağlama avantajlarından dolayı tercih edilir. Weibull parametrelerinin güvenilir olarak tahmin edilmesi sistemin daha doğru değerlendirilmesini sağlar (Liu ve diğerleri, 2019).
- **Kestirimci bakım** stratejisi, istatistiksel yöntemlerin ve makine öğrenme tekniklerinin kullanılmasıyla arızaların önceden tespit edilmesini sağlar. Bu stratejinin amacı, duruşları ve bakım maliyetini en küçükmek, ekipman verimliliğini ise artırmaktır. Li ve He (2015) iki çeşit kestirimci bakım uygulamasının popüler olduğunu belirtmişlerdir. Birincisi, makinenin durumunu tahmin eden sınıflandırma (classification) yaklaşımları, ikincisi ise bir sonraki arızaya kalan süreyi (remaining useful lifetime, RUL) tahmin eden, regresyon yaklaşımlarıdır.

2.1. Kestirimci Bakımda Makine Öğrenme Teknikleri

Kestirimci bakım için yapılan çalışmalarda kullanılan makine öğrenme teknikleri, %33 oranında Rastal Orman (RF), %27 oranında Yapay Sinir Ağları (YSA), %25 oranında Destek Vektör Makineleri (SVM), %13 oranında k-ortalamlar algoritmaları olarak yer almaktadır (Carvalho ve diğerleri, 2019). Literatürde, kestirimci bakımda makine öğrenme tekniklerinin kullanımını araştıran pek çok inceleme makalesi mevcuttur. Doğan ve Birant (2021) makine öğrenmesi ve veri madenciliği yöntemlerinin üretimde kullanımına yönelik bir inceleme makalesi sunmuşlardır. Carvalho ve diğerleri (2019), Çınar ve diğerleri (2020), Dalzochio ve diğerleri (2020), Lei ve diğerleri (2020) kestirimci bakım planlamasında makine öğrenme teknikleri kullanımına yönelik sistematik inceleme makaleleri yayınlamışlardır. Kang ve diğerleri (2020) üretim hatlarında makine öğrenmesi yöntemlerini kullanan çalışmaları incelemişlerdir. Çakır ve diğerleri (2021) Endüstri 4.0 uyumlu, makine öğrenme teknikleri kullanarak bir motor şaftının durumunu takip eden bir sistem geliştirmişlerdir. Titreşim, ses, dönme hızı, sıcaklık gibi nitelikleri takip eden sistem %95-99 oranında doğru durum tespiti yapmaktadır. Dos Santos ve diğerleri (2017) endüksiyon motorlarında stator sargısı kısa devre arızalarını tespit edilebilmek için RF kullanarak sistemin durumunu “kısa devre var” veya “yok” olarak tahminlemişlerdir. Li ve diğerleri (2014) çalışmada demiryolu ağındaki hizmet kesintilerini önleyebilmek ve demiryolu ağının hızını arttırabilmek için SVM yöntemi ile mantıksal kurallar üretmek alarm ve arıza tahmini yapmışlardır. Böylelikle her biri birkaç bin ile birkaç milyon dolar arasında maliyete yol açabilen günlük 20’den fazla hizmet kesintisinin önüne geçmişlerdir. Kulkarni ve diğerleri (2018) çalışmada buzdolabı ve soğuk depolama sistemlerindeki problemlerin önceden tespit edilebilmesi için soğutma ve işlem sinyallerinin trendine bakarak RF yöntemi ile anormal durumları tespit etmişlerdir. Uhlmann ve diğerleri (2018) seçici lazer eritme tezgahlarının önceden arıza tespitini yapmak için sıcaklık, oksijen yüzdesi ve basınç olmak üzere 3 farklı sensör verisi kullanarak k-means yöntemiyle verileri bir normal ve üç arızalı kümeye ayırmışlardır.

Yukarıda verilen literatür araştırmasından da anlaşıldığı üzere kestirimci bakım için sensörlerden elde edilen verilerin makine öğrenme ve yapay zekâ teknikleri ile analizi literatürde oldukça yaygın olarak çalışılmaktadır. Ancak yeni gündeme gelen bir diğer husus ise üretim, bakım ve arıza log kayıtlarının incelenerek kestirimci bakıma bilgi sağlanmasıdır. Zhai ve diğerleri (2021) çalışmada sensörlerden elde edilen durum bilgisi ve üretim çizelgesindeki işlere bakılarak makinenin ilk arızaya ne kadar zamanı kaldığını tahmin etmektedir. Lim ve diğerleri (2017) bir üretim sürecinde meydana gelen rastgele olayların sıralamasını örüntü madenciliği yöntemleri ile analiz ederek bir üretim partisinin hatalı ürün içerip içermediğini tahmin etmişlerdir. Dangut ve diğerleri (2021) uçaklardaki hata mesajları log kayıtlarını örüntü madenciliği yöntemleri ile analiz etmiş ve önemli sorunlara sebep olan mesaj sıralarını

keşfetmişlerdir. Rezig ve diğerleri (2018) çalışmasında sıralı bakım faaliyetlerini incelemiş ve bazı bakım faaliyetlerinin yapılmasının başka bakım faaliyetlerini de gerektirdiğini keşfetmiştir. Arena ve diğerleri (2022) kestirimci bakım planlama için karar ağaçlarını kullanan bir karar destek sistemi geliştirmişlerdir. Hata türleri ve etkileri analizi sonuçlarına göre kestirimci bakım politikasının mı yoksa düzeltici bakım politikasının mı daha az maliyetli olduğuna karar verilmektedir.

2.2. Dinamik Çizelgeleme

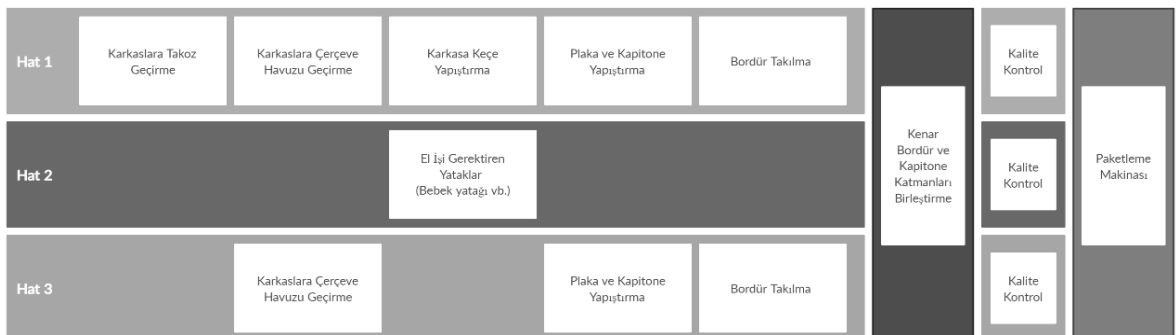
Gerçek-zamanlı olayların durumu da düşünülerek yapılan çizelgelemeye dinamik çizelgeleme denilmektedir (Ouelhadj ve Petrovic, 2009). Bu olaylar, kaynak temelli (Örneğin; makine bozulmaları, hammadde yokluğu, kalitesiz hammadde, operatör yokluğu vb.) ve iş temelli (teslim tarihi değişen siparişler, aniden gelen önemli siparişler, sipariş iptalleri vb.) olabilir (Cowling ve Johansson, 2002; Vieira ve diğerleri, 2003). Dinamik çizelgeleme, tümüyle reaktif çizelgeleme, kestirimci-reaktif çizelgeleme ve gürbüz-önleyici çizelgeleme olmak üzere üç şekilde yapılmaktadır. Tümüyle reaktif çizelgelemede sabit bir sistem yoktur ve kararlar gerçek-zamanlı alınır. Bu durumda bilinen klasik öncelik kuralları kullanılmaktadır. Ancak bütün kriterlerde iyi sonuç veren bir kural olmadığı da literatürde bilinmektedir. Kestirimci-reaktif çizelgelemede gerçek-zamanlı olaya göre mevcut çizelge güncellenir. Gürbüz-önleyici çizelgelemede ise performans ölçütleri tahmin edilerek çizelge oluşturulur ancak bu performans ölçütlerinin tahmininde zorluklar mevcuttur (Ouelhadj ve Petrovic, 2009).

Genellikle makinelerin her zaman kullanılabilir durumda olduğu varsayılarak çizelge hazırlanır ama üretimde özellikle dar boğazı oluşturan makinede meydana gelen arızalanmalar sonucunda oluşan aksamalar çizelgede çok sık değişime sebep olabilmektedir. Literatürde bu gibi durumlarda çizelgeye esneklik sağlamak için dinamik yeniden çizelgeleme yöntemleri kullanılmaktadır. Genellikle mevcut çizelgenin onarılması veya baştan yapılması olmak üzere iki strateji uygulanmaktadır (Cowling ve Johansson, 2002). Sabuncuoğlu ve Bayız (2000) çalışmasında atölye tipi üretim sisteminde yeniden çizelgeleme sıklığını, “mevcut çizelgeyi koru” ve “sürekli çizelge” arasında çeşitli sayıda periyotlarda yapmak üzere bir yöntem önermişlerdir. Baykasoğlu ve diğerleri (2020) çalışmasında, çizelgede bozulmaya neden olan beş sebep; “makine bozulmaları”, “teslim tarihinde değişimler”, “sipariş iptalleri”, “acil siparişler” ve “periyodik yeniden çizelgeleme” olarak belirtilmiştir. Periyodik yeniden çizelgeleme yaklaşımı, toplam işlem süresi, gecikme, kararsızlık vb. kriterler açısından daha iyi sonuç vermiştir. Pan ve diğerleri (2012) çalışmasında, tek makine çizelgeleme problemi için kestirimci bakım operasyonunu da dikkate alan bir yaklaşım önermişlerdir. İşlerin sırası ve bakım operasyonu birlikte çizelgenmektedir. Amaç en fazla gecikmeyi en küçüklemeektir.

Zhang ve diğerleri (2019), Endüstri 4.0 şartlarında atölye çizelgeleme çalışmaları literatürünü incelemişler ve dinamik çizelgeleme yöntemlerinin akıllı fabrikalar ve akıllı bakımda etkin olarak kullanıldığını belirtmişlerdir. En çok kullanılan çizelge onarım yaklaşımları, sağdan-kaydırma sezgiseli, eşleştirme sezgiseli ve kısmi çizelge onarım sezgiselidir. Mehta ve Uzsoy (1999) ve O'Donovan ve diğerleri (1999) çalışmasında çizelgeye boş zaman eklemek için sağdan-kaydırma sezgiselini kullanmışlardır. Aktürk ve Görgülü (1999) eşleştirme sezgiselinin çizelge kalitesi, işlem zamanı ve çizelge durağanlığı açısından etkili olduğunu göstermişlerdir.

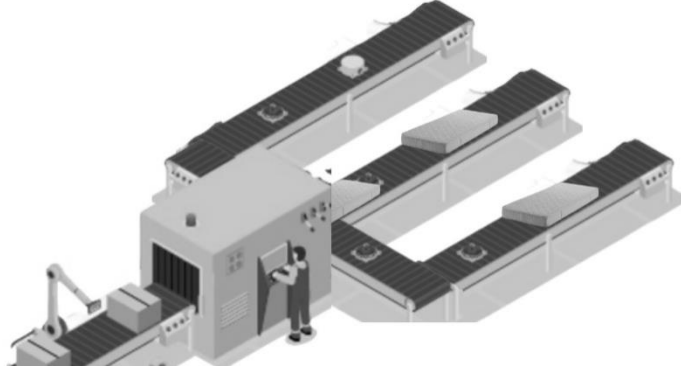
3. PROBLEM TANIMI

Ele alınan üretim sisteminde akış tipi üretim ile siparişe göre yatak üretimi yapılmaktadır. Şekil 1’de üç paralel yatak üretim hattı ve her hattın aşamaları verilmiştir. Bu hatların her birinde farklı tipte yatak üretilmektedir. Hat 1’de 7 aşama sonucunda yatak ortaya çıkmaktadır. Hat 2’de el işçiliği yapılmaktadır. Hat 3’de ise 5 tane aşama sonucunda yatak ortaya çıkmaktadır. Ancak yatağın boyutlarına göre üretim aşamalarında üretim süreleri değişkenlik gösterebilmektedir.



Şekil 1. Üretim akış sistemi

Çalışmanın yapıldığı sistemde mevcut olan makineler, uzmanlar tarafından profesyonel bakım için kritiklik durumlarına göre sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma sonucunda, AA (çok yüksek) önem seviyesine sahip makinelerden biri olan paketleme makinesi çalışmada ele alınmıştır. Paketleme makinesi, üç ayrı hattan gelen yatakların paketleme işlemini tek başına yapmaktadır (Şekil 2). Bu yataklar çeşitli büyüklüklerde ve ağırlıklarda olabilmektedir. Bu makineye ürünlerin geliş sıklığı yüksektir ve işlemin çevrim süresi düşüktür. Dolayısıyla herhangi bir arıza meydana geldiğinde kısa süre içerisinde paketleme makinesi girişinde yığılma olmakta ve bu da üç üretim hattında üretimin durmasına sebep olmaktadır. Aynı zamanda paketleme makinesi üretim hattının en sonunda yer aldığından dolayı oluşabilecek bir arıza sonucunda dağıtım planı da aksamaktadır. Bu makinenin alternatifi ve işlemin fason olarak yaptırılması mümkün olmadığından akıllı bakım stratejilerinin uygulanması fabrika için oldukça önem arz etmektedir.

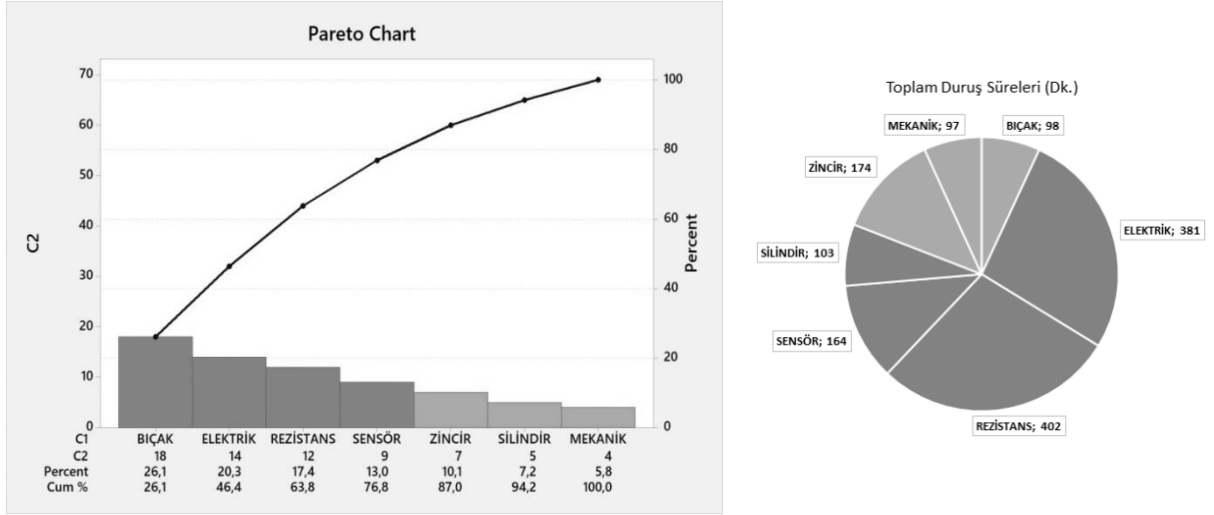


Şekil 2. Paketleme makinesi üretim akışı örnek görseli

Paketleme makinesinde 2017-2021 yılları arasında meydana gelen toplam 141 adet arıza kaydına ulaşılmıştır. Arızaların çoğunun (72 adet) 2017'de meydana geldiği ve bu arızalardan bazılarının kök neden analizleri yapılarak ortadan kaldırıldığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla 2017 kayıtları analizlere dahil edilmemiştir.

Makinenin alt-sistemlerinde oluşan arızalanmalar rastgele olduğu için bu alt-sistemlerin ömürleri ve dolayısıyla düzeltici/plansız bakımlar da rassal özellik gösterir. Makine elemanlarının arızalanma davranışları incelenirken genellikle Weibull, Log-normal, Normal ve Gamma dağılımları kullanılmaktadır (Eroğlu, 1998). Bakım periyodunu tahmin edebilmek için arızalar arasındaki ortalama süre verisi alınmış, verilerin bağımsız ve özdeş dağılıma sahip olduğu kabul edilmiştir.

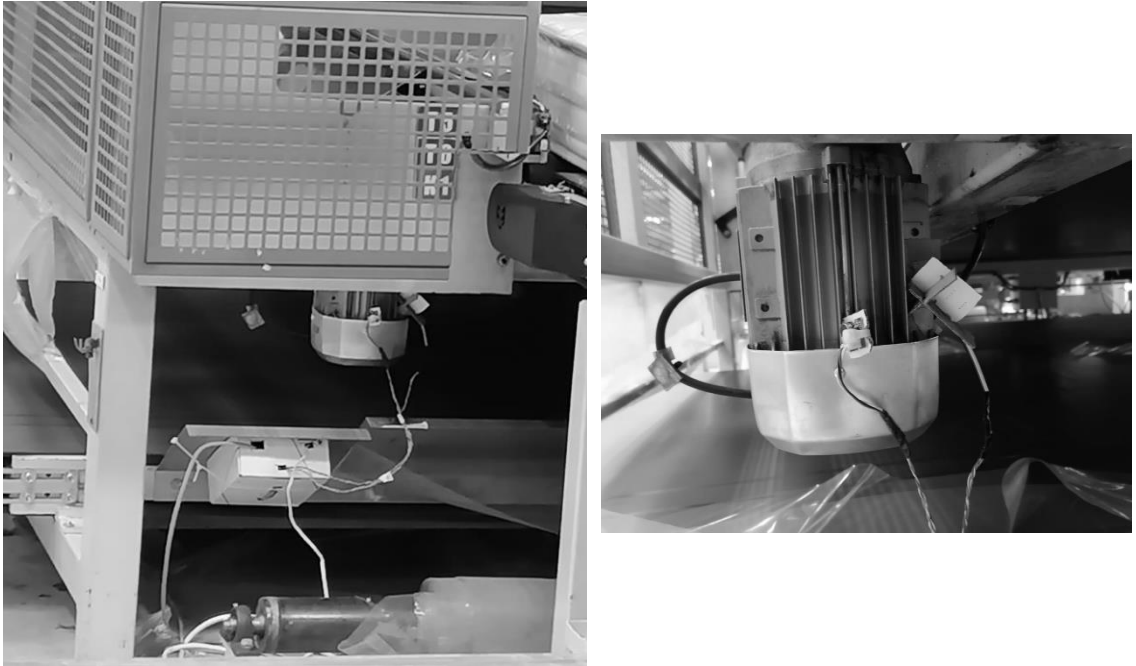
Şekil 3'te son 3 yılda meydana gelen arızaların (69 adet) nedenlerine göre Pareto analizi verilmiştir. Bu arızaların sebep olduğu en önemli maliyet, sistemin durma maliyetidir. Şekilde duruş süreleri (toplam 1419dk.) arıza nedenlerine göre verilmiştir. Dolayısıyla, akıllı bakım stratejileri ile öncelikli olarak bu duruş maliyetinin azaltılması hedeflenmektedir. Geçmiş bakım kayıtlarındaki bakım talebi, yapılan işin açıklaması, arızanın nedeni ve çözümü incelenerek arızalar; *bıçak*, *elektrik*, *rezistans*, *sensör*, *zincir*, *silindir*, *mekanik* olmak üzere 7 temel sınıfa ayrılmıştır. Pareto analizine göre *bıçak*, *elektrik* ve *rezistans* arızaları önlenemediği takdirde toplam duruşların %63,8'i ortadan kalkacaktır. Bakım yapma şekline göre bu 7 arıza, *mekanik bakım* ve *elektrik bakım* olarak iki temel gruba ayrılmaktadır. Şekil 3'de koyu renkli grup elektrik bakım ile giderilebilecek arızaları, açık renkli grup ise mekanik bakım ile giderilebilecek arızaları göstermektedir.



Şekil 3. Arıza nedenlerine göre Pareto grafiği ve duruş süreleri

Önleyici bakım stratejisine göre, mekanik bakım periyodu ve elektrik bakım periyodu Weibull analizi yapılarak belirlenmiştir. Elektrik kaynaklı arızalar duruşların önemli bir kısmını ihtiva ettiğinden her elektrik arızası için Weibull analizi yapılmış ve sonuçlar Ekler bölümünde yer alan Şekil A1-A4'te verilmiştir. Buna göre Weibull dağılımının Anderson Darling istatistik testi daha iyi sonuç verdiği için ortalama bakım periyodunun bıçak, elektrik, sensör ve rezistans için ortalama 90 gün olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla ortalama 90 günde bir elektrik bakımının yapılması makul olacaktır. Mekanik kaynaklı arızalar (zincir, silindir ve mekanik) ise sayıları az olduğu için birleştirilmiş ve Weibull analizi yapılmıştır. Sonuçlar Şekil A5'te verilmiştir. Buna göre ortalama 70 günde bir mekanik bakımın yapılması makuldür. Ancak bu önleyici bakım faaliyeti giriş bölümünde açıklanan sebeplerden dolayı yeterli olmayacağı için kestirimci bakım faaliyetleri ile desteklenmelidir.

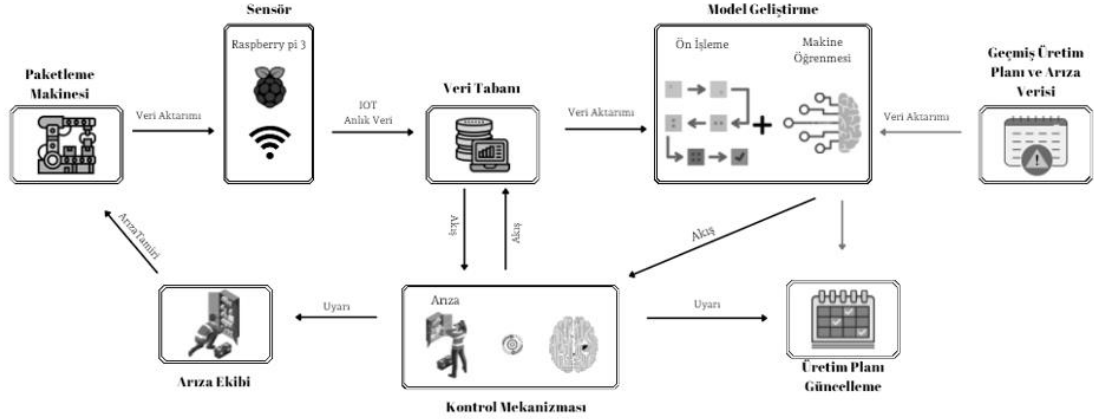
Makinelere ait sıcaklık, titreşim, yağ kalitesi, gürültü, basınç, güç, açılmal hız, akım gibi ölçütler kablolu/kablosuz veri aktarma özelliğine sahip sensörler yardımıyla toplanıp IoT ile veri tabanına aktarılabilir (Koçer, 2017). Bu çalışmada, paketlenme makinesinin IoT ile takip edilecek bölümü literatür incelemesi ve uzman görüşü alınarak belirlenmiştir. Buna göre motor redüktörü alt-sistemine sıcaklık, nem ve ses sensörleri yerleştirilmiş (Şekil 4) ve IoT yardımıyla 2 saniyelik periyotlarla veri toplanmıştır.



Şekil 4. Sensörlerin yerleştirildiği konum

4. YÖNTEM

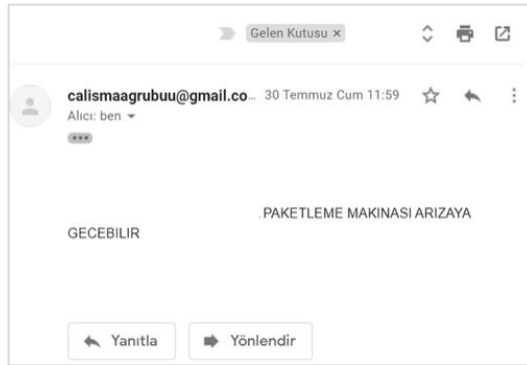
Çalışmada geliştirilen bakım karar destek sistemi temel olarak, geçmiş/anlık verilerin toplanması, sistemin durumunun tahminlemesi, sonucun karar destek sisteminde değerlendirilmesi ve bakım ekibine sonucun bildirilmesi olmak üzere dört temel aşamadan oluşmaktadır. Endüstri 4.0 uyumlu bu kestirimci bakım sisteminin şematik gösterimi Şekil 5’de verilmiştir. Sistemin bu şekilde tasarlanmasının en önemli sebebi, anlık verinin dijital teknolojiler ile toplanması, üretim planlama ve geçmiş arıza verileri ile birleştirilerek analiz edilebilmesidir.



Şekil 5. Paketleme makinesi için Endüstri 4.0 uyumlu, düşük maliyetli bir bakım karar destek sisteminin şematik diyagramı

Şekil 5’e göre ilk olarak paketleme makinesinin “geçmiş üretim planı” ve “geçmiş arıza verisi” Model Geliştirme bölümüne aktarılmaktadır. Burada sıralı örüntü madenciliği yöntemleri kullanılarak analiz edilmekte ve arızaya etkisi olan sakıncalı örüntüler belirlenmektedir. Tespit edilen sakıncalı örüntüler üretim planlama departmanına iletilmektedir. Sakıncalı örüntülerin güncellenmesi işlemi belirli periyotlarda (örneğin 6-12 aylık) yapılabilir. Sürekli olarak bir güncelleme yapılmamasının sebebi; arıza oluşmadığında yeni bir örüntü oluşmayacaktır.

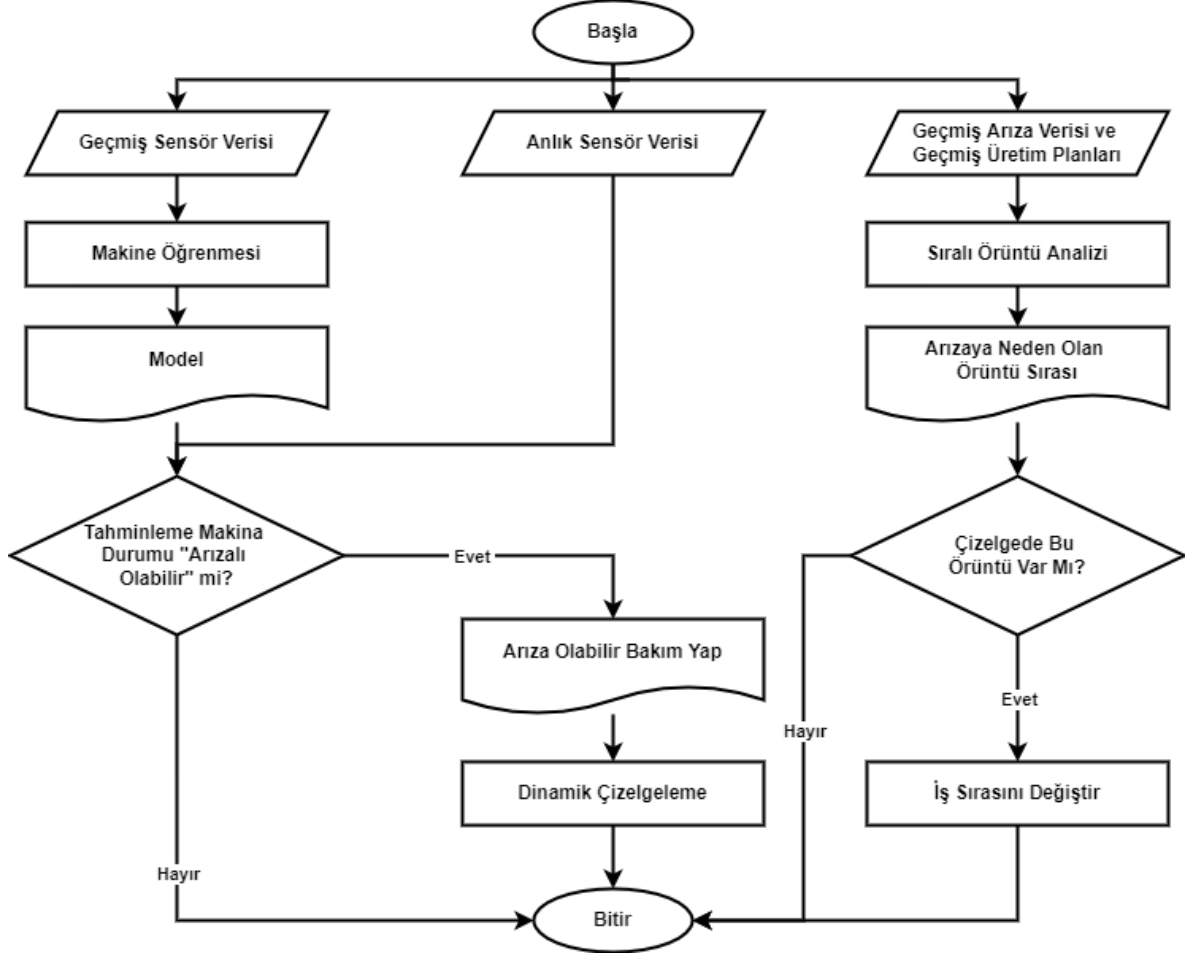
Paketleme makinesinin motor redüktörüne yerleştirilen sensörlerden alınan anlık sistem verileri de IoT aracılığı ile veri tabanına aktarılmaktadır. Veri tabanından eğitim amaçlı alınan verilere sınıflandırma algoritması uygulanmıştır. Ön işleme yapılmış veri, makine öğrenme algoritmasına girdi olarak verilmiş ve model oluşmuştur. Oluşan modele göre artık her 2sn.’de bir gelen veriye bakılarak makinenin durumu tahmin edilmektedir. Makine durumu “arıza olabilir” olarak tahmin edilirse bakım ekibi ve planlama departmanına e-posta gönderilmektedir (Şekil 6).



Şekil 6. Bakım karar destek sisteminden gönderilen otomatik uyarı e-posta örneği

Şekil 7’de ise yukarıda anlatılan bu sistemin akış şeması sunulmuştur. Bu şemanın temel girdileri “geçmiş sensör verileri”, “anlık sensör verileri” ve “geçmiş arıza bakım verisi ve geçmiş üretim planları”dır. Geçmiş sensör verileri ön işleme yapılarak, daha sonraki bölümlerde detayları açıklanacak olan makine öğrenmesi (destek vektör makineleri (SVM) ve karar ağacı (DT)) algoritmalarının eğitimi (model oluşturması) için kullanılmaktadır. Elde edilen model ve anlık sensör verileri kullanılarak sistemin durumu tahmin edilmektedir. Eğer sistem durumu “arıza olabilir” olarak tahmin edilirse acil bakım planı oluşturulmakta ve üretim çizelgesine yerleştirilmektedir. Bunun için dinamik çizelgeleme yaklaşımı

kullanılmaktadır. Bir diğer önemli konu ise Paketleme makinesinde arızaya sebep olabilecek bir ürün sırası örüntüsünün tespit edilmesidir. Bu amaçla geçmiş arıza verisi ve geçmiş üretim planları birleştirilerek sıralı örüntü madenciliği (SPADE) algoritmasına girdi olarak verilmektedir. Elde edilen sakıncalı örüntüler üretim planlama bölümüne bildirilmektedir ve onların proaktif olarak bu örüntüler oluşmayacak şekilde planlama yapması sağlanmaktadır.



Şekil 7. Bakım karar destek sistemi akış şeması

4.1. Sıralı Örüntü Madenciliği

Veri madenciliğinin alt konularından birisi olan sıralı örüntü madenciliği (sequential pattern mining), veri yığınları içerisinde düzenli bir biçimde birbirlerini takip eden ilginç bağlantıları keşfetmekte kullanılır. Sıralı örüntü madenciliğinin gerçek hayatta, market sepet analizi, metin madenciliği, doğal afet analizi, web sitesindeki gezinme loglarının analizi, DNA ve protein sarmallarının analizi gibi birçok alanda uygulamaları mevcuttur (Fournier-Vier ve diğerleri, 2017).

Çalışmada incelediğimiz makineye giren ürünler, üretim planına/çizelgesine bağlı olarak belirli bir sıraya göre geldikleri için sıralı örüntüler oluşturmaktadır. Örneğin; sisteme bir saat içerisinde, önce 1. tipte, belirli bir zaman sonra 5. tipte ve daha sonra 3. tipte bir ürün girmesi ({1}, {5}, {3}) sıralı örüntüsünü oluşturur. Bu örüntü bir arızaya sebep olmuş olabilir. Bu çalışmanın bir ayağı bu örüntüyü keşfetmek ve planlama bölümünün bu örüntü konusunda dikkatli olunması gerektiği hakkında bilgilendirmektir. Bu örüntüleri keşfedebilmek için arızanın meydana geldiği andan (olay zamanı) önceki 1, 2 ve 4 saatlik zaman dilimlerini ele alarak ve bu zaman dilimlerini de 15, 30 ve 60 dakikalık periyotlara bölerek analiz edilmiştir. Ek olarak, arızadan önce sisteme giren son 30 ürünü alarak da incelemeler yapılmıştır.

Paketleme makinesine giriş yapan ürün ve giriş saatlerinden oluşan (2020 yılı ilk 6 ayına ait üretim planı ve 50 duruş kaydı) verimiz içerisinden yukarıda bahsettiğimiz zaman dilimleri ve son 30 ürünü içeren kısımlar çekilmiştir. Çekilen bu verilere önışleme yapıp sıralı veri tabanlarına dönüştürülmüştür. Tablo 1, bir sıralı veri tabanı örneğini göstermektedir. Örneğin; 1 numaralı duruş için son 1 saatlik verinin ilk 15 dakikalık periyodunda 38 ve sonra 32 nolu ürünler paketlenmiştir. İkinci 15 dakikalık periyotta ise sırasıyla 19, 43 ve 19 nolu ürünler paketlenmiştir. Dördüncü periyodun sonunda 22 nolu ürün

paketlendikten sonra duruş meydana gelmiştir. 3 numaralı duruş verisinde ise bazı periyotlarda üretim yoktur. Bu çalışmada, duruşlar öncesinde sıklıkla gözlenen ürün sıraları tespit edilerek bu örüntüler konusunda üretim planlama bölümü bilgilendirilmiş ve ürün sıralamasının değiştirilmesi sağlanmıştır.

Tablo 1. Sıralı veri tabanı örneği

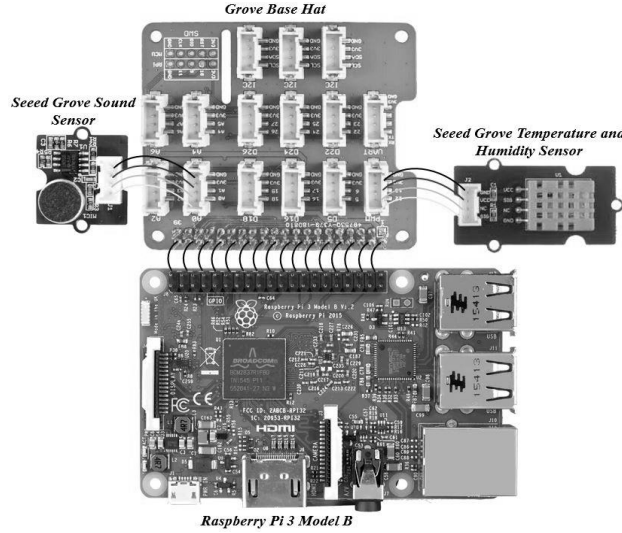
Duruş No	Son bir saatte paketlenen ürünler
1	[(38 32) (19 43 19) (38 38) (22 22 22)]
2	[(53 53) (53 53 32) (53 32) 53]
3	[22 (58 53 58)]
4	[(53 58) (58 48 58 53 58)]

Sıralı örüntü madenciliğinde PrefixSpan (Pei ve diğerleri, 2004), SPADE (Zaki, 2001), GSP (Srikant ve Agrawal, 1996), CloSpan (Yan ve diğerleri, 2003) gibi algoritmalar kullanılmaktadır. Python programlama dili ve SPMF kütüphanesi kullanılarak bu algoritmaların uygulanması mümkündür. Bu çalışmada belirtilen algoritmalar ile veri üzerinde denemeler yapılmıştır. SPADE algoritması daha fazla ve farklı örüntüler keşfedebildiği için tercih edilmiştir.

4.2. Devre Kurulumu ve Veri Toplanması

Pilot çalışmanın yapıldığı paketleme makinesinin hangi bileşenleri üzerinde kestirimci bakım uygulanacağına ve ne tip sensörler kullanılması gerektiğine literatür incelemesi (Zonta ve diğerleri, 2020) ve uzman görüşü yardımıyla karar verilmiştir.

Raspberry Pi 3 Model B; düşük maliyetli, küçük boyutlu, üçüncü nesil tek kartlı bir bilgisayardır. Verinin iletimi, toplanması, işlenmesi ve bağlantı çeşitliliği sunmak için kullanılır (Sezer ve diğerleri, 2018). Günümüzde kullanılan bilgisayarlara kıyasla daha az enerji harcaması ve paketleme makinesi üzerine yerleştirilmesi ergonomik olduğu için tercih edilmiştir. Raspberry Pi 3 Model B için tercih edilen eklenti kartı (Grove Base Hat) üzerine seeed grove ses sensörü ve seeed grove sıcaklık ve nem sensörleri yerleştirilerek veri toplama işlemi yapılmıştır. Bu sensörlere erişim sağlamak ve sensörlerin konfigürasyonunu gerçekleştirmek için Python programlama dili kullanılmıştır.



Şekil 8. Devre şeması

IoT, uzaktan alınan sensör verilerinin doğru izlenmesini ve gerçek zamanlı olarak toplanmasını sağlar. Sensörlerden gelen sıcaklık, nem ve ses anlık verilerini toplamak için IP adresi üzerinden Raspberry Pi ile bilgisayar arasında hızlı ve kolay bağlantı sağlanmaktadır. Bilgisayar ve Raspberry Pi sürekli iletişim kurarak SQL (Yapılandırılmış Sorgu Dili) veri tabanına verilerin IoT ile aktarımı ve depolanma işlemi sağlanmıştır.

4.3. Makine Öğrenmesi Tekniklerinin Uygulanması

Paketleme makinesinin motor redüktöründen 1 Haziran itibarıyla toplanan sensör verileri SQL'de başarılı bir şekilde depolanmaya başlanmıştır. Veri tabanında toplam 106430 adet kayıt mevcuttur. Toplanan veri setinden örnek Tablo 2'de verilmiştir. Son verinin alındığı tarihe kadar makinede herhangi

bir arıza oluşmamıştır. Weibull analizi sonuçlarına göre ilk arızayı yakalayabilmek için 90 günlük veriye ihtiyaç olduğu düşünülmektedir ancak veritabanında 20 günlük veri mevcuttur. Bu sebeple analizlerin yapılabilmesi için makine durumu hakkında tahminde bulunarak ilerlenmiştir. Bunun için sıcaklık, ses ve nem seviyelerinin maksimum ve minimum seviyeleri gözlemlenmiş ve uç noktalar “arıza olabilir” olarak varsayılmıştır. Bu şekilde 94 adet “arıza olabilir” durumu tespit edilmiş ve makine öğrenmesi modelinin oluşturulması için girdi olarak kullanılmıştır. Tablo 2’de sıcaklık, nem ve ses sütunları öznitelik iken makine durumu sınıf niteliğidir.

Tablo 2. Sensörlerden elde edilen veri örnekleri

Sıcaklık	Nem	Ses	Tarih/Saat	Makine Durumu
27	32	999	01.06.2021 15:46	Arıza Olabilir
22	28	988	03.06.2021 11:11	Sağlam
24	46	471	01.06.2021 08:18	Sağlam
22	34	999	02.06.2021 20:00	Arıza Olabilir
24	45	534	01.06.2021 09:26	Sağlam
24	26	999	09.06.2021 15:13	Arıza Olabilir
27	19	500	21.06.2021 18:06	Sağlam
24	22	614	14.06.2021 13:56	Sağlam
21	46	999	01.06.2021 20:28	Arıza Olabilir
23	23	238	02.06.2021 09:36	Arıza Olabilir

Sınıflandırma problemlerinde sıklıkla kullanılan DT (Breiman ve diğerleri, 1984; Quinlan, 1993) ve SVM (Boser ve diğerleri 1992; Cortes ve Vapnik, 1995) makine öğrenmesi teknikleri, binary (“arızalı olabilir”, “sağlam” sınıfları) sınıflandırmada ve sayısal niteliklerde başarılı olduğundan dolayı tercih edilmiştir. DT, tek (kök) bir düğümden başlanarak her dalında özniteliklere göre karar kuralları içermektedir ve bu kararlara göre oluşan yapraklarda bir sonuç (sınıf etiketi) vermeyi hedefler. Bir örnek, öznitelik değerlerine göre hangi düğüme ulaşıyorsa o düğümün etiketini almaktadır (sınıf tahmini yapılmaktadır). SVM ise sınıflandırmayı doğrusal ya da doğrusal olmayan bir fonksiyon yardımıyla yerine getirir ve veriyi birbirinden ayırmak için en uygun fonksiyonun tahmin edilmesi esasına dayanır. Bu fonksiyon aynı zamanda her sınıfın destek noktaları arasında da maksimum marjini sağlayan fonksiyondur. İki sınıflı sınıflandırma problemleri için oldukça başarılıdır. Farklı kernel fonksiyonları ile çalıştırmak da mümkündür.

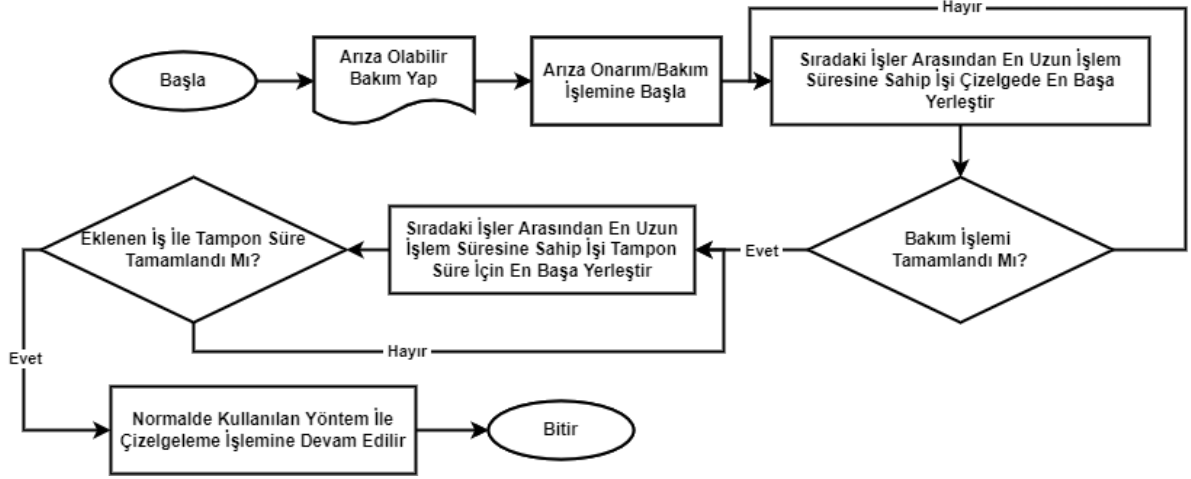
Python programlama dili ve scikit-learn kütüphanesi kullanılarak bu algoritmaların uygulanması yapılmıştır.

4.4. Dinamik Çizelgeleme İçin Önerilen Yaklaşım

Üretim çizelgesi hazırlanırken makinenin beklenmedik bir duruş yaşayabileceği genelde gözardı edilmektedir. Fakat uygulamada; beklenmedik makine arızaları, ani bakım kararları gibi belirsizliklerden dolayı üretim çizelgesinde aksamalar meydana gelebilmektedir. Bu aksamalardan dolayı oluşacak üretim duruşlarını en küçükleme için *dinamik yeniden çizelgeleme* yöntemleri kullanılmaktadır.

Bu çalışmada amacımız, önceki bölümlerde anlatılan prosedüre göre tahminlenen bakım faaliyetinin gerçekleştirilmesi için dinamik çizelgeleme metodolojisiyle entegre bir yaklaşım önermektir. Bunun için mevcut talepleri karşılamaya devam edecek şekilde “çizelgede boşluklar açılması” ve/veya “iş sıralamasını değiştiren” bir yaklaşım sunulmaktadır.

Şekil 9’da önerilen dinamik çizelgeleme prosedürünün akış şeması verilmiştir. Temel olarak arıza olan makine yeniden çalışana kadar önceki makinelerin yavaşlaması ama durmaması sağlanmaktadır. Bu amaçla çizelge, en uzun işlem süresine sahip iş öncelikli olacak şekilde güncellenmektedir. Böylece en uzun işlem süresine sahip iş ve/veya işlerin önceki makinelerde işlem gördükleri süre zarfında duruş olan makinede arıza onarım işlemi gerçekleştirilecektir. Bu çizelge arızalı makine tekrar hizmete girene kadar ve bir tampon süre geçene kadar yapılacaktır. Tampon süre boyunca da önceki makinelerde uzun işlem süresine sahip işleri yapmaya devam edilmesinin sebebi, arızalı makine açılınca yığılmaların oluşmasını yavaşlatmaktır. Eğer arızalı makine açılır açılmaz normal çizelgeleme prosedürüne geçilirse arızalı makine önünde yığılma fazla olacaktır. Dolayısıyla tampon süre, arızalı makinenin işleri toplaması için imkân sağlar.

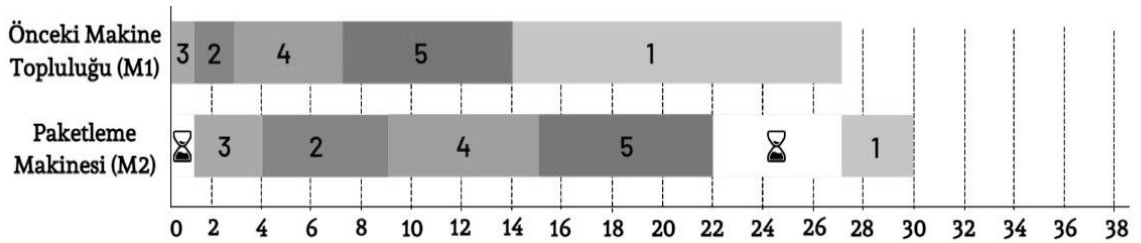


Şekil 9. Dinamik yeniden çizelgeleme akış şeması

İki makineden oluşan bir sistemi örnek olarak ele alırsak; sistemde yapılacak işlemler ve bu işlemlerin ilgili makinelerdeki işlem süreleri Tablo 3'te verilmiştir. M2 arızanın olduğu paketleme makinesini ve M1'de paketleme makinesi öncesindeki üretim hattında bulunan seri makineler topluluğunu göstermek üzere iki grubu ifade etmektedir. Mevcut durumda statik çizelgeleme yaklaşımı kullanılmaktadır. Yani çizelge arıza olabileceği düşünülmeden normal şartlarda hazırlanmıştır ve Gantt şeması Şekil 10'da verilmiştir. Kum saati (⌚) makine boş beklemelerini, ünlem işareti (!) ise arızaları göstermektedir.

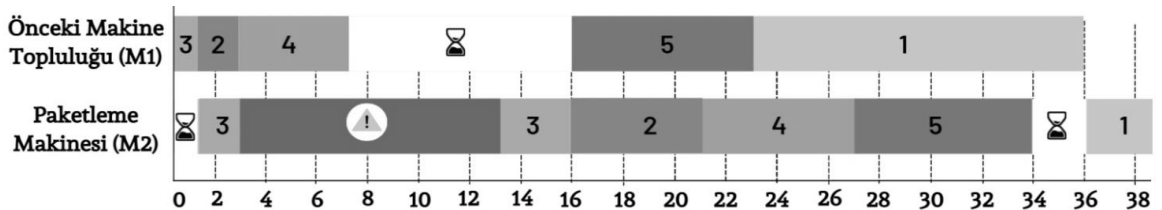
Tablo 3. Çizelgeleme örneği için işlem süreleri (dk.)

İş	Önceki Makine Topluluğu (M1)	Paketleme Makinesi (M2)
1	13	3
2	2	5
3	1	3
4	4	6
5	7	7



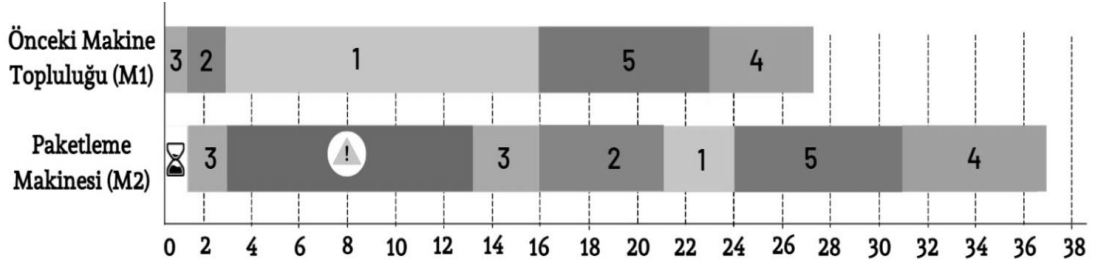
Şekil 10. Normal durum Gantt şeması

Şekil 11'de görüldüğü üzere paketleme makinesinde (M2) 3. dakikada bir arıza meydana gelmiştir ve bu arızanın onarımı 10 dk. sürmüştür. Arıza meydana geldiği anda M2 üzerindeki işler yarım kalmış ancak arızadan sonra çizelgeye kaldığı yerden devam edilmiştir. Arıza süresince M1 üretim hattı da üzerindeki işi bitirip boş beklemiştir.



Şekil 11. Arızalı durum Gantt şeması

Şekil 12'de bakımı da dikkate alarak önerilen dinamik yaklaşıma göre yeniden hazırlanan çizelge verilmiştir. Arızanın başladığı andan itibaren geçici bir süreliğine M1 makinesindeki en uzun işlem süresine sahip iş ve/veya işler başa yerleştirilmiştir. Buna göre mevcut işler arasından en uzun süreye sahip olan 1 numaralı iş seçilerek çizelge güncellenmiştir. En uzun işin çalışılmaya başlaması ile M2'ye ürün akışı yavaşlamıştır. Böylece M2 önünde ürün birikmesi sonucu M1'in durması önlenmiştir ve 13. zaman biriminde arıza giderilmiştir. Ancak bir tampon süre kadar (arıza öncesi işler, 2 ve 3 nolu iş, M2 makinesinde tamamlanana kadar) daha çizelgeye uzun süreli iş, örneğin 5 numaralı iş, seçilerek çalışılmaya devam edilmiştir. 5 numaralı iş de tamamlandıktan sonra, yani 23. zaman biriminden sonra, normal çizelgeleme prosedürüne dönülmektedir.

**Şekil 12. Dinamik olarak yeniden hazırlanan çizelge Gantt şeması**

Tablo 4'de mevcut durumda uygulanan statik çizelge ve önerilen dinamik çizelge örnek üzerinde karşılaştırılmıştır. Arızalı durumda dinamik çizelgeleme uygulandığında makinelerin boş beklemesi azalmıştır. Özellikle M1 makine topluluğunda işler daha önce (27.dk) tamamlanmıştır. Bu da M1'in sonundaki yığılmanın çabuk bertaraf edileceğinin ve bu sebeple M1'in duruş yaşamayacağını göstermektedir. Ayrıca son makinede son iş 2 dakika daha kısa sürede tamamlanmıştır.

Tablo 4. Üç farklı durumun karşılaştırılması

	Statik Çizelge		Dinamik Çizelge
	Normal Durum	Arızalı Durum	Arızalı Durum
Boş Süre (M1)	0	9	0
Boş Süre (M2)	6	3	1
Bekleyen ürünler	2-4-5	2-4-5	2-1-4-5
(Beklediği zaman)	(1+2+1)	(13+14+4)	(13+5+1+4)
M1'de son işin tamamlanma zamanı	27	36	27
M2'de son işin tamamlanma zamanı	30	39	37
Makespan	max{27,30}= 30	max{36,39}= 39	max{27,37}= 37

5. BULGULAR

Paketleme makinesinden elde edilen arıza verileri, geçmiş üretim planlama verisi ve sensörlerden gelen veriler kullanılarak önceki bölümlerde açıklanan sıralı örüntü madenciliği ve makine öğrenme teknikleri ile sınıflandırma uygulamaları gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar analiz edilmiştir.

5.1. Sıralı Örüntü Madenciliği Algoritma Sonuçları

Paketleme makinesine giriş yapan ürün ve giriş saatlerinden oluşan (2020 yılı ilk 6 ayı ve 50 duruş olan) veriden yukarıda bahsedilen zaman dilimleri ve son 30 ürünü içeren kısımlar çekilmiştir. Python programlama dili ve SPMF kütüphanesi kullanılarak, PrefixSpan, SPADE, GSP, CloSpan algoritmaları %70 destek eşliğinde çalıştırılmıştır.

Sonuçlar incelendiğinde GSP ve CloSpan algoritmaları ikili ürün kombinasyonlarını içeren sıralı örüntü bulamamıştır. PrefixSpan algoritması ise ['53 53 53'] ve ['53 53 53 53'] gibi aynı ürünün aynı periyot (itemset) içerisindeki farklı kombinasyonlarını da içeren birçok örüntü bulmuştur. Fakat bu istediğimiz bir sonuç değildir. SPADE algoritması, duruştan önceki zaman periyotlarında ikili ürün kombinasyonlarını içeren örüntüler bulmuştur. Bu nedenle SPADE algoritması tercih edilmiştir. SPADE algoritmasının sonuçları Tablo 5'te verilmiştir. Tablo 5'e göre duruştan hemen önceki 4 saat içinde yer alan 1'er saatlik periyotlar analiz edildiğinde örneğin; (kalın işaretli örüntülerde) 53 ve 58 nolu ürünlerin birlikte 50 duruşun 39'unda aynı periyotta görüldüğü, bir diğer örüntü de ise 58 nolu ürünün bir periyotta,

53 nolu ürünün ise daha sonraki periyotta 50 duruşun 35'inde gözlemlendiği görülmektedir. Bu örüntüler duruş için bir risk oluşturmaktadır.

Tablo 5. SPADE algoritması tarafından bulunan örüntüler

Son 4 saat 1 saatlik periyotlar		Son 2 saat 30 dk.lık periyotlar		Son 1saat 15 dk.lık periyotlar		Son 30 ürün	
Örüntü	Destek	Örüntü	Destek	Örüntü	Destek	Örüntü	Destek
['19']	40	['19']	37	['53']	40	['53']	45
['22']	41	['32']	38	['53', '53']	37		
['32']	43	['53']	45				
['38']	35	['53', '53']	40				
['48']	41						
['53']	47						
['58']	42						
['53 58']	39						
['58', '53']	35						
['53', '53']	40						
['48 53']	38						
['32 53']	38						
['32', '53']	35						
['53', '32']	37						
['19 53']	38						

5.2. Makine Öğrenmesi Algoritmaları ile Arıza Tahmini Sonuçları

DT ve SVM algoritmaları Python scikit-learn kütüphanesi ile çalıştırılmıştır. SVM çalıştırılırken Sigmoid fonksiyonu kullanılmıştır. Örneklem sınıflarındaki gözlem sayıları dengesizdir. Ancak özellik sayımız az olduğu için bu algoritmaların performansını etkilememektedir. Dengeyi kurmak için Tablo 6'da farklı örneklem sayıları ile denemeler de yapılmıştır.

Veri seti %75'i eğitim %25'i test verisi olarak ayrılmıştır ve aynı zamanda aşırı öğrenmeyi önlemek ve örnekleme sorunlarını ortadan kaldırmak için 5-katlı çapraz doğrulama (5-CV) tekniği uygulanmıştır.

Tablo 6 sonuçlarına göre DT algoritması hem 5-katlı çapraz doğrulama hem de eğitim verisi %75 oranında bölündüğünde çok yüksek doğruluk oranları vermiştir. Hata matrisinden de anlaşılacağı üzere hata 0'a yakındır. Ancak SVM algoritmasının performansı o kadar da iyi değildir. 5 katlı çapraz doğrulama yüzdesi yüksek olsa da hata matrisine baktığımızda "arıza olabilir" tahminlerinin tamamen yanlış olduğu görülmektedir. Özellikle veri dengesizliği fazla olan denemelerde (ilk üç deneme) bu hata örtülmektedir. Ancak hata matrisi böyle bir hatanın olduğunu ortaya çıkarmaktadır. Buna göre DT sonuçlarını kullanmak daha makuldür.

Tablo 6. DT ve SVM doğruluk sonuçları

Sınıfların örneklem sayısı		Doğruluk Sonucu			
		DT		SVM	
Arıza olabilir	Sağlam	5-CV	Hata matrisi (Test %25)	5-CV	Hata matrisi (Test %25)
94	106336	0.999	$\begin{bmatrix} 26590 & 0 \\ 0 & 18 \end{bmatrix}$	0.999	$\begin{bmatrix} 26588 & 2 \\ 18 & 0 \end{bmatrix}$
94	50000	0.999	$\begin{bmatrix} 12505 & 0 \\ 0 & 19 \end{bmatrix}$	0.997	$\begin{bmatrix} 12501 & 4 \\ 14 & 5 \end{bmatrix}$
94	10000	0.999	$\begin{bmatrix} 2500 & 0 \\ 0 & 24 \end{bmatrix}$	0.99	$\begin{bmatrix} 2500 & 0 \\ 24 & 0 \end{bmatrix}$
94	1000	0.997	$\begin{bmatrix} 251 & 0 \\ 0 & 23 \end{bmatrix}$	0.920	$\begin{bmatrix} 251 & 0 \\ 21 & 2 \end{bmatrix}$
94	100	0.99	$\begin{bmatrix} 28 & 0 \\ 0 & 21 \end{bmatrix}$	0.351	$\begin{bmatrix} 12 & 16 \\ 15 & 6 \end{bmatrix}$

6. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada sıralı örüntü madenciliği ve makine öğrenme algoritmaları kullanılarak bakım onarım planlaması için bir karar destek sistemi oluşturulmuştur. Sıralı örüntü madenciliğinde bazı ürün sıralarının arızaya etki edebileceği gösterilmiştir. Sınıflandırma ile sensörlerden alınan veriler sayesinde makinenin durumu "sağlam" veya "arızalı olabilir" olarak tahmin edilmiştir. Algoritmaların performanslarının iyi olduğu gösterilmiştir. Karar destek sistemi makinenin durumunu "arıza olabilir" olarak tahmin ederse sistemden

bir e-posta gitmektedir. Ancak bu bakım kararı statik çizelgelemede üretimi durduracağı için dinamik çizelgeleme kullanılarak sistemin yavaşta olsa çalışması sağlanmıştır. Mevcut duruma göre daha iyi performansı olan bir çizelge elde edilmiştir.

Oluşturulan bakım karar destek sistemi bütünleşik bir sistemdir. Fabrikadaki tüm makineler bu sistemle hızlı ve düşük maliyetli olarak takip edilebilir. Bu sistem sayesinde arızaların meydana gelmeden önce kestirilip makinenin bakıma alınması, beklenmedik duruşların engellenmesi, üretim çizelgesinde meydana gelebilecek beklenmedik gecikmelerin azaltılması ve dolayısıyla üretim kayıplarının azaltılması mümkün olacaktır. Pilot çalışmadan elde edilen verilere göre karar destek sistemi ile toplam 69 adet arıza ve 1419dk. plansız duruş süresinin ortadan kalkması amaçlanmaktadır. Böylece süreç verimliliği artacaktır.

Çalışmanın en önemli kısıtı paketleme makinesinin sadece motor redüktörü alt sisteminin sensörler ile takip edilmesidir. Gelecek çalışmalar için makinenin diğer alt sistemlerinin de sensörlerle takip edilmesi hedeflenmektedir. Hangi alt sistemin arızalanacağını kestirilmesiyle firma sadece gerekli olan yedek parçaların stoğunu tutarak yedek parça stok maliyetini azaltabilir. Ayrıca makineye titreşim, akım ölçer vb. sensörlerin yerleştirilmesi ve daha hassas sensörler kullanılması ile makine öğrenme tekniklerinin daha isabetli tahminler yapması mümkün olacaktır.

Teşekkür

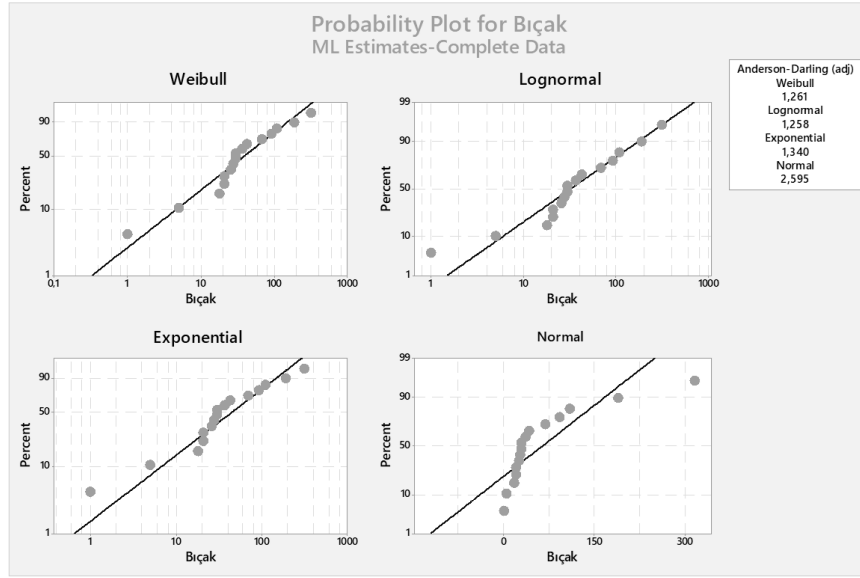
Bu çalışma TÜBİTAK 2209-B Üniversite Öğrencileri Sanayiye Yönelik Araştırma Projeleri Desteği Programı tarafından 2020/1 döneminde desteklenmiştir.

KAYNAKÇA

- Aktürk, M.S. ve Görgülü, E. (1999). "Match-up Scheduling under a Machine Breakdown", *European Journal of Operational Research*, 112(1), 81-97.
- Arena, S., Florian, E., Zennaro, I., Orrù, P.F. ve Sgarbossa, F. (2022). "A Novel Decision Support System for Managing Predictive Maintenance Strategies Based on Machine Learning Approaches", *Safety Science*, 146, 105529.
- Baykasoğlu, A., Madenoğlu, F.S., ve Hamzadayı, A. (2020). "Greedy Randomized Adaptive Search for Dynamic Flexible Job-Shop Scheduling", *Journal of Manufacturing Systems*, 56, 425-451.
- Boser, B.E., Guyon, I.M. ve Vapnik, V.N. (1992). "A Training Algorithm for Optimal Margin Classifiers", *Proceedings of the 5th Annual Workshop on Computational Learning Theory*, 144-152.
- Breiman, L., Friedman, J.H., Olshen, R.A., ve Stone, C.J. (1984). "Classification and Regression Trees", Wadsworth ve Brooks, Cole Statistics/Probability Series.
- Carvalho, T.P., Soares, F.A., Vita, R., Francisco, R.D.P., Basto, J.P. ve Alcalá, S.G. (2019). "A Systematic Literature Review of Machine Learning Methods Applied to Predictive Maintenance", *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106024.
- Cortes, C. ve Vapnik, V. (1995). "Support-Vector Networks", *Machine Learning*, 20(3), 273-297.
- Cowling, P. ve Johansson, M. (2002). "Using Real Time Information for Effective Dynamic Scheduling", *European Journal of Operational Research*, 139(2), 230-244.
- Çakır, M., Güvenç, M.A. ve Mıstıkoğlu, S. (2021). "The Experimental Application of Popular Machine Learning Algorithms on Predictive Maintenance and the Design of IoT Based Condition Monitoring System", *Computers & Industrial Engineering*, 151, 106948.
- Çınar, Z.M., Nuhu, A.A., Zeeshan, Q., Korhan, O., Asmael, M. ve Safaei, B. (2020). "Machine Learning in Predictive Maintenance Towards Sustainable Smart Manufacturing in Industry 4.0". *Sustainability*, 12(19), 8211.
- Çolak, M., Çetin, T. ve Atılğan, A. (2017). "Mobilya Endüstrisinde Tamir Bakımın Önemi ve Bir Uygulama", *Akademia Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 2(3), 60-70.
- Dalzochio, J., Kunst, R., Pignaton, E., Binotto, A., Sanyal, S., Favilla, J. ve Barbosa, J. (2020). "Machine Learning and Reasoning for Predictive Maintenance in Industry 4.0: Current Status and Challenges", *Computers in Industry*, 123, 103298.
- Dangut, M.D., Skaf, Z. ve Jennions, I.K. (2021). "An Integrated Machine Learning Model for Aircraft Components Rare Failure Prognostics with Log-Based Dataset", *ISA Transactions*, 113, 127-139.
- Doğan, A. ve Birant, D. (2021). "Machine Learning and Data Mining in Manufacturing", *Expert Systems with Applications*, 166, 114060.
- Dos Santos, T., Ferreira, F.J., Pires, J.M. ve Damásio, C. (2017). "Stator Winding Short-Circuit Fault Diagnosis in Induction Motors Using Random Forest", *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, 1-8.
- Eroğlu, A. (1998). "Planlı Bakım Sistemleri İçin Bazı Stokastik Yenileme Modelleri", *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 13(2), 173-184.
- Fang, J. ve Xi, Y. (1997). "A Rolling Horizon Job Shop Rescheduling Strategy in the Dynamic Environment", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 13(3), 227-232.
- Fournier-Viger, P., Lin, J.C.W., Kiran, R.U., Koh, Y.S. ve Thomas, R. (2017). "A Survey of Sequential Pattern Mining", *Data Science and Pattern Recognition*, 1(1), 54-77.
- Kang, Z., Catal, C. ve Tekinerdogan, B. (2020). "Machine Learning Applications in Production Lines: A Systematic Literature Review", *Computers & Industrial Engineering*, 149, 106773.
- Karaduman, G. (2020). "Raylı Sistemlerde Bilgisayarlı Görme ve Nesnelerin İnterneti Kullanılarak Kestirimci Bakım Yöntemlerinin Geliştirilmesi", Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Koçer, M. (2017). "CNC Kesim Makinesi İçin Mükemmel Olmayan Önleyici Bakım Politikasının Geliştirilmesi ve En İyilenmesi", Yüksek Lisans Tezi, TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Köksal, M. ve Uzun, A. (2016). "Bakım Planlaması", Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- Kulkarni, K., Devi, U., Sirighee, A., Hazra, J. ve Rao, P. (2018). "Predictive Maintenance for Supermarket Refrigeration Systems Using Only Case Temperature Data", *2018 Annual American Control Conference (ACC)*, 4640-4645.
- Lei, Y., Yang, B., Jiang, X., Jia, F., Li, N. ve Nandi, A.K. (2020). "Applications of Machine Learning to Machine Fault Diagnosis: A Review and Roadmap", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 138, 106587.

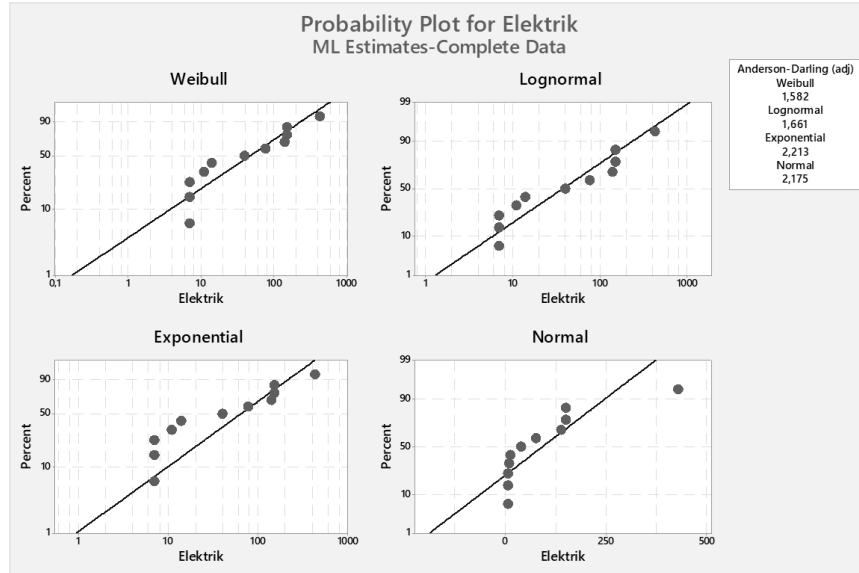
- Li, Z., ve He, Q. (2015). "Prediction of Railcar Remaining Useful Life by Multiple Data Source Fusion", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(4), 2226-2235.
- Lim, H.W., Kim, Y. ve Kim, M.K. (2017). "Failure Prediction Using Sequential Pattern Mining in the Wire Bonding Process", *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 30(3), 285-292.
- Liu, Q., Dong, M., Chen, F.F., Lv, W. ve Ye, C. (2019). "Single-Machine-Based Joint Optimization of Predictive Maintenance Planning and Production Scheduling", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 55, 173-182.
- Lu, Y. (2017). "Industry 4.0: A Survey on Technologies, Applications and Open Research Issues", *Journal of Industrial Information Integration*, 6, 1-10.
- Mehta, S.V. ve Uzsoy, R. (1999). "Predictable Scheduling of a Single Machine Subject to Breakdowns", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 12(1), 15-38.
- O'donovan, R., Uzsoy, R. ve McKay, K.N. (1999). "Predictable Scheduling of a Single Machine with Breakdowns and Sensitive Jobs", *International Journal of Production Research*, 37(18), 4217-4233.
- Ouelhadj, D. ve Petrovic, S. (2009). "A Survey of Dynamic Scheduling in Manufacturing Systems", *Journal of Scheduling*, 12(4), 417-431.
- Pamuk, N.S. ve Soysal, M. (2018). "Yeni Sanayi Devrimi Endüstri 4.0 Üzerine Bir İnceleme", *Verimlilik Dergisi*, 1, 41-66.
- Pan, E., Liao, W. ve Xi, L. (2012). "A Joint Model of Production Scheduling and Predictive Maintenance for Minimizing Job Tardiness", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60(9-12), 1049-1061.
- Pei, J., Han, J., Mortazavi-Asl, B., Wang, J., Pinto, H., Chen, Q., Dayal, U. ve Hsu, M.C. (2004). "Mining Sequential Patterns by Pattern-Growth: The Prefixspan Approach", *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 16(11), 1424-1440.
- Quinlan, J.R. (1993). "C4.5: Programs for Machine Learning", Morgan-Kaufmann, San Francisco.
- Rezig, S., Achour, Z. ve Rezig, N. (2019). "Using Data Mining Methods for Predicting Sequential Maintenance Activities", *Applied Sciences*, 8(11), 2184.
- Sabuncuoğlu, I. ve Bayız, M. (2000). "Analysis of Reactive Scheduling Problems in a Job Shop Environment", *European Journal of Operational Research*, 126(3), 567-586.
- Sezer, E., Romero, D., Guedea, F., Macchi, M. ve Emmanouilidis, C. (2018). "An Industry 4.0-Enabled Low Cost Predictive Maintenance Approach for SMEs", *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, 1-8.
- Srikant, R. ve Agrawal, R. (1996). "Mining Sequential Patterns: Generalizations and Performance Improvements", *International Conference on Extending Database Technology*, Springer, Berlin, Heidelberg, 1-17.
- Susto, G.A. Beghi, A. ve De Luca, C. A. (2012). "Predictive Maintenance System for Epitaxy Processes Based on Filtering and Prediction Techniques", *Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 25, 638-649.
- Susto, G.A., Schirru, A., Pampuri, S., McLoone, S. ve Beghi, A. (2015). "Machine Learning for Predictive Maintenance: A Multiple Classifier Approach", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 11, 812-820.
- Uhlmann, E., Pontes, R. P., Geisert, C. ve Hohwieler, E. (2018). "Cluster Identification of Sensor Data for Predictive Maintenance in a Selective Laser Melting Machine Tool", *Procedia Manufacturing*, 24, 60-65.
- Vieira, G.E., Herrmann, J.W. ve Lin, E. (2003). "Rescheduling Manufacturing Systems: A Framework of Strategies, Policies, and Methods", *Journal of Scheduling*, 6(1), 39-62.
- Wuest, T., Weimer, D., Irgens, C. ve Thoben, K.D. (2016). "Machine Learning in Manufacturing: Advantages, Challenges, and Applications", *Production ve Manufacturing Research*, 4(1), 23-45.
- Yan, X., Han, J. ve Afshar, R. (2003). "Clospan: Mining: Closed Sequential Patterns in Large Datasets", *Proceedings of the 2003 SIAM International Conference on Data Mining*, 166-177.
- Zaki, M.J. (2001). "SPADE: An Efficient Algorithm for Mining Frequent Sequences", *Machine Learning*, 42(1), 31-60.
- Zhai, S., Gehring, B. ve Reinhart, G. (2021). "Enabling Predictive Maintenance Integrated Production Scheduling by Operation-Specific Health Prognostics with Generative Deep Learning", *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 830-855.
- Zhang, J., Ding, G., Zou, Y., Qin, S. ve Fu, J. (2019). "Review of Job Shop Scheduling Research and Its New Perspectives under Industry 4.0", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(4), 1809-1830.
- Zonta, T., Da Costa, C.A., Da Rosa Righi, R., De Lima, M.J., Da Trindade, E.S. ve Li, G.P. (2020). "Predictive Maintenance in the Industry 4.0: A Systematic Literature Review", *Computers ve Industrial Engineering*, 106889.

EKLER



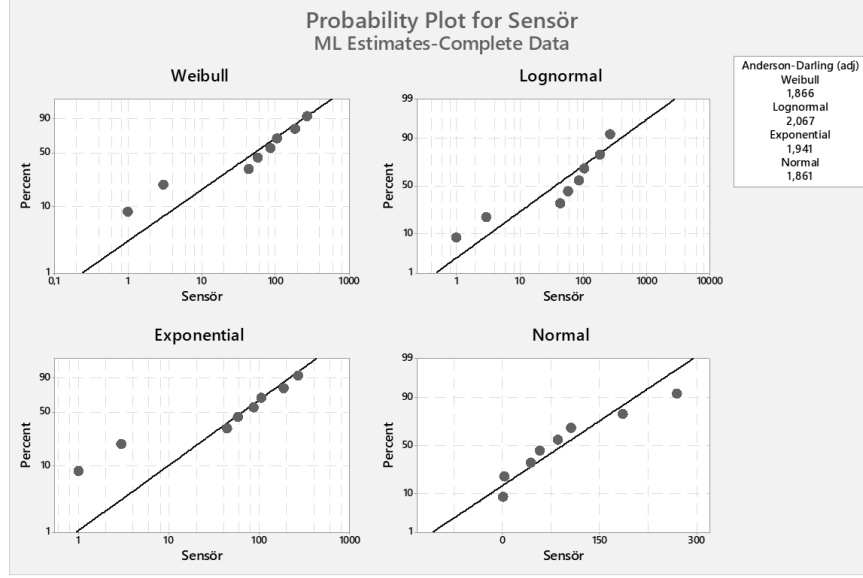
Distribution	Mean	Standard Error	95% Normal CI Lower	95% Normal CI Upper
Weibull	64,5883	18,2996	37,0668	112,544
Lognormal	78,5763	35,5807	32,3485	190,867
Exponential	64,9375	16,2344	39,7828	105,998
Normal	64,9375	19,9940	25,7499	104,125

Şekil A1. Elektrik kaynaklı arızalar - bıçak verisi - Weibull analizi sonuçları



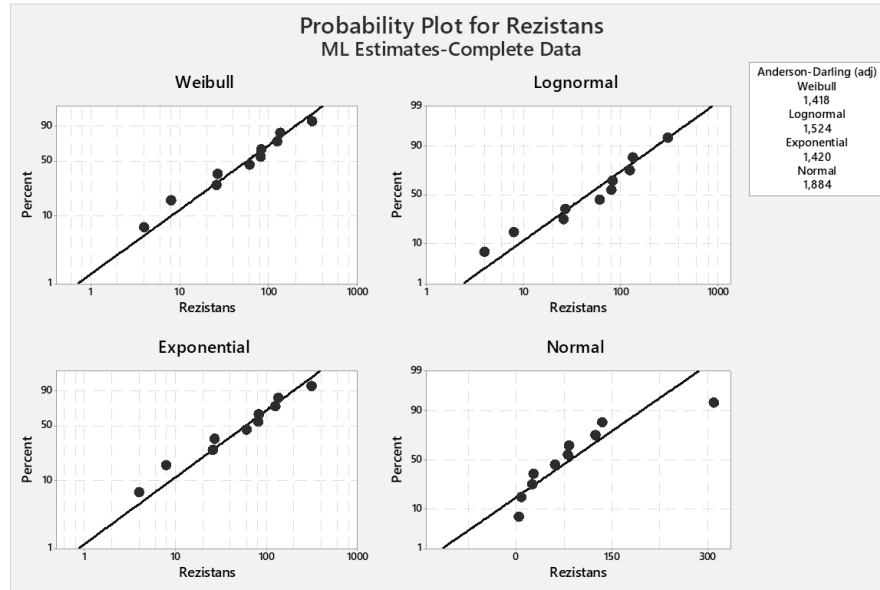
Distribution	Mean	Standard Error	95% Normal CI Lower	95% Normal CI Upper
Weibull	93,138	37,7183	42,1126	205,987
Lognormal	107,521	67,0751	31,6579	365,175
Exponential	94,091	28,3695	52,1076	169,900
Normal	94,091	36,4443	22,6613	165,520

Şekil A2. Elektrik kaynaklı arızalar - elektrik verisi - Weibull analizi sonuçları



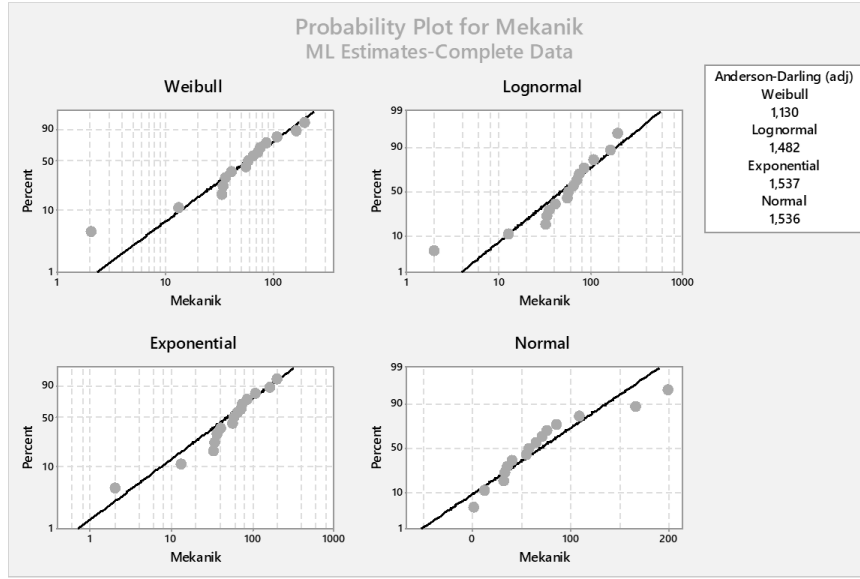
Distribution	Mean	Standard Error	95% Normal CI	
			Lower	Upper
Weibull	97,134	44,659	39,4477	239,18
Lognormal	212,325	232,618	24,7998	1817,84
Exponential	94,250	33,322	47,1342	188,46
Normal	94,250	30,714	34,0521	154,45

Şekil A3. Elektrik kaynaklı arızalar - sensör verisi - Weibull analizi sonuçları



Distribution	Mean	Standard Error	95% Normal CI	
			Lower	Upper
Weibull	86,100	28,2328	45,2781	163,726
Lognormal	104,721	56,6848	36,2480	302,541
Exponential	86,100	27,2272	46,3265	160,021
Normal	86,100	27,4034	32,3902	139,810

Şekil A4. Elektrik kaynaklı arızalar - rezistans verisi - Weibull analizi sonuçları



Distribution	Mean	Standard Error	95% Normal CI	
			Lower	Upper
Weibull	69,4639	13,7563	47,1185	102,406
Lognormal	84,9669	29,5540	42,9711	168,005
Exponential	69,7333	18,0051	42,0398	115,670
Normal	69,7333	13,4285	43,4140	96,053

Şekil A5. Mekanik kaynaklı arızalar için Weibull analizi sonuçları

RELATIONSHIP BETWEEN PRODUCTIVITY AND DIGITALIZATION WITH TOBIT MODEL BASED ON MALMQUIST INDEX

Eda BOZKURT¹, Özlem TOPÇUOĞLU², Ali ALTINER³

ABSTRACT

Purpose: The sources of economic growth include capital, labor and the Solow surplus, dedicated to the study of Solow (1956). Solow surplus is the inexplicable part of growth with labor and capital and is expressed as technological advances. Solow surplus also means total factor productivity (TFP). In other words, economic growth is explained by TFP depending on technology from the past to the present. These days, digitalization is known to be the new technological revolution. In light of this concept, the study aims to demonstrate the impact of digitalization on TFP.

Methodology: A TFP calculation based on the Malmquist index was made using labor, capital and gross domestic product data for 30 countries in the period 2012-2020. The Tobit Panel estimate was then used to determine the effect of digitalization on TFP in the relevant period.

Findings: the results of the panel estimate are that digitalization has a significant and positive impact on TFP. The findings suggest that digitalization contributes to productivity.

Originality: The most important feature that distinguishes research from studies in the literature is that a verification method is selected that uses real data. In addition, works covering many countries in literature is limited. The research has results from a multi-country perspective.

Keywords: Digitalization, Malmquist Index, Tobit Model, Productivity.

JEL Codes: C23, O4, O14.

MALMQUIST ENDEKSE DAYALI TOBIT MODEL İLE VERİMLİLİK VE DİJİTALLEŞME İLİŞKİSİ

ÖZET

Amaç: İktisadi büyümenin kaynakları arasında sermaye, emek ve Solow'un (1956) çalışmasına ithafen Solow Artığı yer almaktadır. Solow Artığı büyümenin emek ve sermaye ile açıklanamayan kısmı olup teknolojik ilerlemeler olarak ifade edilmektedir. Solow Artığı aynı zamanda toplam faktör verimliliği (TFV) demektir. Yani geçmişten günümüze ekonomik büyüme teknolojiye bağlı olarak TFV ile açıklanmaktadır. Bugünlerde dijitalleşmenin yeni teknolojik devrim olduğu bilinmektedir. İşte bu konsept ışığında çalışmada dijitalleşmenin TFV'ye etkisini ortaya koymak amaçlanmıştır.

Yöntem: 2012-2020 döneminde 30 ülke için emek, sermaye ve gayrisafi yurtiçi hasıla verilerinden faydalanılarak Malmquist Endekse dayalı TFV hesaplaması yapılmıştır. Daha sonra ilgili dönemde dijitalleşmenin TFV'ye etkisini tespit etmek için Tobit Panel tahmini yapılmıştır.

Bulgular: Panel tahmin sonuçları dijitalleşmenin TFV'yi anlamlı ve pozitif yönde etkilediği yönündedir. Bulgular dijitalleşmenin verimliliğe katkı sağladığını göstermektedir.

Özgünlük: Araştırmayı literatürdeki çalışmalardan ayıran en önemli özellik gerçek verilerin kullanıldığı bir doğrulama yönteminin seçilmiş olmasıdır. Ayrıca ilgili yazında birçok ülkeyi ele alan çalışma sınırlı sayıdadır. Araştırma çok ülke açısından sonuçlar barındırmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Dijitalleşme, Malmquist Endeksi, Tobit Model, Verimlilik.

JEL Kodları: C23, O4, O14.

¹ Assoc. Prof., Atatürk University, Faculty of Open Education, Department of Foreign Trade, Erzurum, Turkey, edabozkurt@atauni.edu.tr, ORCID: 0000-0001-7158-8049 (Corresponding Author).

² Asst. Prof., Atatürk University, Vocational School of Social Sciences, Department of Foreign Trade, Erzurum, Turkey, ozlemgunduz@atauni.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9821-5856.

³ Assoc. Prof., Recep Tayyip Erdoğan University, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Department of Economics, Rize, Turkey, ali.altiner@erdogan.edu.tr, ORCID:0000-0001-7362-8198.

1. INTRODUCTION

One of the most widely studied assumptions of economic theory is homo economicus. Classical and neoclassical economists claim that man is a homo economicus. Homo economicus meets the concept of economic man with its best-known definition. Economic man pursues personal interests. In economic jargon, as consumers people aim to maximize benefits and well-being. Although the rational assumption of man acting rationally continues to be debated in the economic literature, it is certain that man seeks to live comfortably, away from grief. Inventions and discoveries that have emerged throughout history have always served to facilitate the life of mankind. In the early ages, while man lived on the run from predators, he rose to ecological leadership and took control of life, putting an end to human weakness with the discovery of fire. Later, he invented the wheel and thus discovered the ease of carrying both the animals he hunted and other loads. Compass, printing press, gunpowder, microscope, steam machine, electricity and many other innovations have emerged as a result of human experience. No doubt, the first step of science and technology was taken with the Industrial Revolution. In the 18th century machines replaced muscle power. In the 19th and 20th centuries, integral parts of life such as cars, airplanes, radio, television, computers were discovered with modern scientific applications. Second industrial revolution was replaced by the third industrial revolution with radical technological changes at the end of the 20th century. As the concept of information and communication technologies entered our lives in the 21st century, artificial intelligence brought with it new concepts such as the Internet of things. Here, digitalization is also among the most decidedly spoken words of this century.

There's always something that comes to everyone's mind about what digitalization is. Manufacturers, companies, suppliers, consumers and states have been designing their policies and behaviors according to the next generation of technology for several decades. Production, distribution and consumption go beyond traditional methods and are carried out using online methods. Through online shopping portals, consumers can access other consumer experiences related to the products they buy. Shopping is no longer an activity that requires going out. Mobile phones have minimized the world, leaving it in the hands of humanity. Many people start their day by checking their social media accounts. In the '80s or '90s, people followed their favorite artists only on television, while young people hung posters of singers or athletes they were fans of by their bedside, this attitude is now considered quite outdated. Watching TV series is also no longer among today's trends. Because the series industry now uses digital platforms. No one on the streets anymore has to ask anyone for the address they are looking for. Applications installed on mobile phones can direct people to their destination without errors. For example, it can create and track nutrition, health and sports identity digitally using a mobile phone. Most people no longer follow the closing time of the banks. Banking operations can be easily done via internet banking without having to go to the branch. The digital world offers people much more than that. It has become possible to go to Şanlıurfa in a few minutes with virtual tours and to visit Göbeklitepe ruins. Similarly, connecting to the world's most famous museums, exhibitions or concerts is one of the blessings of the digital world decisively. Given the presence of a global pandemic in recent days, a lifestyle has been formed in which people work from home and students are allowed to study distantly. Over the past two years, closure processes in countries to reduce the risk of transmission of the outbreak have shown that the reality of digitalization is inevitable.

Although digitalization seems to be developing rapidly because it facilitates social life, it is believed that the main factor that increases digitalization is the economy. Because digitalization provides great potential in growing economies and creating opportunities. Although the effect of digitalization on improving economic well-being is found attractive by many, in fact, the adoption of digitalization varies from business to business. Digitalization practices can vary decidedly between sectors in terms of ratio and scope. While the possibility of digitalization is largely dependent on industry, the local economic situation is known as an important parameter. But still, the known fact is that digitalization is a concept applied to increase efficiency and reduce costs (Leon and Meyer, 2019).

Everyone agrees that our planet is undergoing a rapid digital transformation. So, what is the outcome as the world becomes more digitized? Can habit turn into addiction or even slavery? Is digital power beneficial or harmful? The main motivation of our research is whether digitalization contributes to economic productivity. Therefore, digitalization has been studied conceptually as a priority. An answer to how digitalization is measured was then sought to determine the true effect of digitalization. Then, the effect of digitalization on economic productivity was examined in 2012-2020 period by Tobit Panel Data Analysis for 30 countries. TFP has been calculated to perform Panel data analysis. Possible contributions of the study to the literature can be listed as:

- It is aimed to provide conceptual recognition by providing a detailed study of digitalization at a theoretical level.

- Productivity calculation was made by based on the Malmquist TFP Index. In this way, issues such as what productivity is and how it is calculated are also included in the research.
- It is noteworthy that there are few studies investigating the effect of digitalization on productivity in literature scanning. In particular, the research based on econometric techniques remains quite limited. It was intended to expand the analysis-based literature.
- Finally, unlike the article in question of digitalization, it is aimed to reveal a total productivity effect by examining not only the size of labor productivity, but also the size of capital.

2. THEORETICAL BACKGROUND and LITERATURE

It is not easy to draw any frame to “What is digitalization?” question given the unlimited human needs. Some terms are used interchangeably on issues related to digitalization, causing concept confusion. In literature, digitization, digitalization, and digital transformation are the most commonly used words. In particular, digitization and digitalization are quite confused due to the two-letter difference. In fact, the difference between these two concepts is decidedly more than a matter of letters (Savic, 2019).

Digitization refers to the conversion of information from physical format to digital format. For example, digitization is the process of scanning a contract, creating it as a PDF, and saving it to drive C. Digitalization, on the other hand, is the use of digitization to improve processes. Scanning an agreement, creating it as a PDF, and uploading it to the cloud ensures that you can reach this agreement from anywhere and anytime. This is an example of digitalization. Digital transformation, in short, is the effect caused by the digitalization process and to do things digitally again. More effective organizations, efficient service and satisfaction with rapidly developing information and communication technologies in the face of changing social needs, and the change that occurs in business processes are recognized as digital transformation. In fact, digital transformation is seen as a social phenomenon and a cultural evolution. (Leon and Meyer, 2019; Burkett, 2017; Henriette et al., 2016). The increasing popularity of digitalization, especially in the last decade, has pushed researchers and institutions to work in this field. At this point, various definitions related to digitalization have been put forward.

Regarding digitalization Hagberg et al. (2016) implies facilitating new forms of value creation. According to Katz, digitalization is a process of largely adopting information communication technologies to produce, process, and share information (Katz et al., 2013). Bhatnagar (2017) argues that the word digital means the use of binary numbers and that digitalization involves the adoption of this technology and the conversion of physical data into digital format (Bhatnagar, 2017). The International Energy Agency (IEA) deconstructs digitalization as the increasing interaction and convergence between the digital and physical worlds (IEA, 2017). The Ministry of Science, Industry and technology defines digitalization as “a process in which industrialists, employees, universities and the public are transformed and new business models and ways of doing business are created” in the Roadmap of the Industrial Revolution of digital Turkey (2018).

The common idea of the definitions is that digitalization is based on the use of digital technologies. Digital technologies include the Internet of things, social media, artificial intelligence, big data, cloud decks and mobile applications.

Another question that every actor in the economy is looking for an answer to is the extent to which digitalization occurs. Individuals, companies and institutions are making efforts to measure and increase digitalization, which is one of the most important sources of productivity growth. Since indicators in digitalization are very important for policy design, various indices are prepared by different international and national institutions, both economically and technologically. Some of these indices can be listed as follows (IT Industrialists Association-TÜBISAD, 2020; Pakdemirli, 2019)

- Information Communication Technologies Development Index prepared by United Nations-International Telecommunications Union (ITU),
- The Networked Readiness Index, designed by the World Economic Forum (WEF),
- Digital Economy and Society Index (DESI) prepared by the European Commission,
- Information and Communication Technology Development Indicators prepared by the United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD),
- Cámara and Tuesta (2016) Digitization Index (DiGiX),
- Among the indices of Turkish origin are the Accenture Digitalization Index calculated in 2015 and the Digital Transformation Index of Turkey presented by TÜBISAD in 2020.

The above-mentioned indices have various data sources and measurement methods and provide data for a specific year's period. Because some indices have not been calculated in recent years, researchers also make digitization measurements based on the survey method. Data is routinely collected and studies continue to be carried out in international databases to produce new indicators (Organization for Economic Co-operation and Development-OECD, 2020). To summarize, we cannot mention a single indicator with respect to digitalization measurement.

Despite the difficulties in the identification and measurement of digitalization, the economy and the ongoing digital transformation of society, encourage innovation, productivity improvement and welfare, besides it has the potential to improve services and increase sustainable and more inclusive growth (Pilat and Criscuolo, 2018; Ezracha and Stucke, 2018). In particular, the idea that digitalization will give economies momentum with productivity growth is open to debate. In general, productivity refers to how much output is provided by the inputs at hand, that is, the relationship between the output produced by a production or service system and the input used to achieve this output (Coelli et al., 2005; Prokopenko, 2005). How rational the inputs used in the production of an output are used is determined by the concept of productivity. An increase in productivity values is observed if output is produced at the same level as less input, more output is produced without changing the amount of input, more output is produced using less input, more output is generated when there is an increase in inputs, and less output is decreased when there is a decrease in the amount of input.

When the factors affecting productivity are examined, it is seen that researches focus on economic factors generally. But it is known that economic variables alone cannot be sufficient to explain productivity. Economic factors, as well as social, demographic, geographic and even psychological factors, are known to influence productivity. Among these factors, national and international policies, macroeconomic factors, financial opportunities of the firms, management decisions, labor, competition and decency of technology are counted. Digitalization, which is a new form of use of technology, is also considered among the parameters that affect productivity, as mentioned above. Furthermore, the influence of innovation or technology in the economic literature is based on the Schumpeterian hypothesis. In Schumpeter's view, economic events are formed with the entrepreneur emerging from innovation and technical progress. The economic transformation created by digitalization should also be seen as a result of the innovation process based on information technologies. These technologies are constantly and irreversibly reshaping today's economy. Digitalization seems to have the ability to expand, replicate and intensify the entrepreneurial function (Corduneanu, 2018). After Scumpeter, Solow (1956) proposed the Neo-classical theory of growth that economic development is formed by an external factor expressed as physical capital, labor, and technological change. It is accepted that the growth rate in the stationary state is determined externally in the production function. Therefore, according to neoclassical theory, the only factor that provides economic growth is the technological change that occurred by chance and is referred to as the Solow surplus (Solow 1956). According to Mankiw (2003), increased living standards can only be explained by technological improvement according to the Solow model. In new generation studies like Kravchenko et al. (2019), Mammadli and Klivak (2020), Habibi and Zabardast (2020) etc., variable, which represents technological progress that causes economic growth is used as digitalization. It is assumed that digitalization has an effect on yield with the size of supply and demand. From the supply side, production activities are formed by directly entering information into the production of goods and services. Thus, productivity increases and hence income increases. Investment in digital technologies, combined with Labor, constitutes a capital input that leads to deepening capital and increased labor productivity in other sectors of the economy. Digitalization contributes to economic growth through demand by means of the development of human capital achieved through education, training and better health care. Thus, positive externalities are formed that contribute to overall economic growth. For example, the proliferation of mobile phones in developing countries may facilitate long-distance communication, although states have little or no investment in fixed telecommunications infrastructure (Myovella, et al. 2020). But these opportunities may not happen automatically. Some policy actions are needed for digitalization to increase growth and prosperity. Because it is accepted that the opportunities brought by digitalization have negative effects on productivity. Despite the rapid rise of digital technologies that began in the mid-1990s, overall productivity growth is thought to have slowed over the past decade. Thus, there is a serious discussion about the potential of digital technologies to increase productivity. Even Solow said of digitalization, "you can see the computer age everywhere except productivity statistics" in his statements. This fact points out a paradox between technological change and decelerating productivity growth (Pilat and Criscuolo, 2018). Trying to size up the wave of digitalization is no easy task. Because digitalization offers significant opportunities to increase productivity, it also brings migration costs, as well as delay effects and adoption barriers. In other words, the short-term impact of digitalization on productivity can be considered uncertain. But today, companies have a direct impact on output and productivity growth, it is known that the changes that devotes significant time and resources (McKinsey Global Institute, 2018). In the literature studies presented below, it is seen

that the relationship between digitalization and productivity shows decidedly different results. For example; Jacobsen et al. (2011) examined digitization and firm productivity in Danish firms for 2008 and 2009 in their analysis based on a survey. The findings showed that digitalization has a strong positive correlation with productivity. It was determined that the percentage increase in the probability of digitization of a firm resulted in a 0.72 % increase in value added per employee.

Gal et al. (2019) examined the link between the least squares (OLS) method and firm-level digitalization productivity in 20 countries during 2010-2015 years. The results showed that there is no productivity paradox. Horvat et al. (2019) examined the impact of automation and digitalization on the performance of manufacturing companies in Germany during the 1993-2012 periods. Using surveys from the German Manufacturing survey, they determined that both automation and digitalization had a significant and positive impact on labor productivity by the OLS method. In terms of TFP, they found that only automation had a positive effect. Trasca et al. (2019) examined the impact of digitalization on economic performance in central and Eastern European countries with survey data published by the European Commission in 2018. Productivity and export rate have been seen to improve when digital technologies are integrated into commercial activities. Metlyakhin et al. (2020) examined the main factors of digitalization affecting labor productivity with data covering the period 2006-2017 with static panel data analysis in 77 regions in Russia. In organizations requiring automation, factors such as computerization of workplaces, use of server equipment, mobile subscriber devices and broadband internet connection have been found to significantly affect productivity. Akaev and Sadovnichii (2021) calculated labor productivity in the digital economy using a mathematical prediction method based on Kondrat'ev's long wave. The authors have suggested that the highest labor productivity will occur in a situation dominated by human labor in the collaboration of human and intelligent machine. They determined that the lowest labor productivity occurred when intelligent machines were dominant. Berlak et al. (2021) examined the productivity impact of digitalization based on event studies in building construction industry in Germany. They determined that digitalization had an impact on productivity. Cette et al. (2021), investigated the impact of digitalization on productivity in French firms with multiple correspondence analysis based on Banque de France 2018 survey data. According to the findings, the use of digital technologies outside the institution increases the firm's labor productivity by about 23% and the overall factor productivity by about 17%. Within the institution, it has a negative impact of 2.5 percentage on the workforce. Jeske et al. (2021) examined the impact of digitalization on management, productivity and human work in the German metal and electrical industry through surveys conducted in 2015, 2017 and 2019. From the perspectives studied in descriptive analyses, it was found that digitalization in the production industry has made progress and that there are multifaceted digitalization opportunities for companies and employees. Krutova et al. (2021) examined the impact of binomial logistic regression and digitalization on productivity and unemployment in Finland with data from the 2018 Quality of Work Life Survey. The study found that the contribution of traditional factors of production to labor productivity potentially reduces the risk of permanent job loss, and increases the risk of permanent job loss because innovative factors of production negatively affect TFP inputs. Yilmaz (2021) examined the place of Turkey in the digitization process and the effect of digitization on productivity by documentation method in the study. In the study, it was concluded that digitalization will positively affect both total factor productivity and labor productivity. But it has been determined that Turkey has not reached a sufficient level in the process of digitalization.

The literature review shows a limited number of studies examining the relationship between digitalization and productivity. In addition, it can be said that these studies are based on survey data in general, firm or sector-based elections are conducted, lack of multi-country analysis and focus on labor productivity rather than TFP in general.

3. METHODOLOGY

In the empirical analysis part of the study, the effect of digitalization on the productivity was investigated for period 2012-2020 for a total of 30 countries including 26 European Union (EU) member (Austria, Belgium, Bulgaria, Croatia, Cyprus, Czechia, Denmark, Estonia, Finland, Germany, Greece, Hungary, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Malta, Netherlands, Poland, Portugal, Romania, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden) countries, 1 country for which EU membership process is ongoing (Turkey) and 3 non-EU member European countries (Iceland, Norway, United Kingdom). The data was obtained from the EU statistical agency (Eurostat) and the World Bank database. Because the balanced panel data analysis method was used in the study, countries with discrete data were excluded.

The study consists of two phases. At the first stage, TFP values, which are considered to be one of the most obvious productivity indicators of countries, were calculated for the 30 countries concerned, both in terms of providing information about country performance and for use as a dependent variable in the Tobit model created. The Malmquist TFP Index, a data enveloping analysis (DEA) - based technique, was

preferred in TFP calculation. The next stage is a panel of Tobit estimates to investigate the impact of digitalization on TFP.

In regression estimation, if all the observation values of the dependent variable are not fully obtained, or if all the values of the dependent variable can be observed but defined within a certain interval, Limited Dependent Variable Models should be used in such models (Şengül et al. 2013). The fact that the dependent variable values (TFP values) used in the study are above 1 indicates that the productivity change has changed in the direction of increase compared to the previous year. For this reason, the Tobit estimate was preferred as a limited dependent variable model in the study, since the dependent variable must be limited.

3.1. Malmquist Total Factor Productivity Index

Although the concept of TFP explains the reasons for differences in growth and development in countries, it is also of great importance in terms of determining which factor of production is more effectively included in production as a driving force in the process of determining the sources of growth and development.

TFP and its components have many problems in terms of scalability. In general, productivity measurements are made at the economic, market and business level. Studies conducted at the level of overall economic productivity allow countries to monitor the developments they have put forward over time and conduct an inter-country situation assessment. Productivity can be measured by two approaches in the form of non-frontier approaches and frontier approaches, which are created by taking into account two parametric and non-parametric methods (Oyeranti, 2000). In the study, the Malmquist TFP Index, a nonparametric method included in the frontier approach, was calculated to determine the TFP values of 30 European countries.

The TFP Index reveals the TFP exchange of decision making between the two time ranges. The index describes the progress/decline in total factor productivity with multiple inputs/outputs and the change over time (Tone, 2004). This index was published by Caves et al. (1982) was developed by Sten Malmquist (1953) and is called the Malmquist Index after Sten Malmquist, who first came up with the idea of determining a real number that measures the change in the set formed by variables related to each other using distance functions.

The Malmquist TFP index, a DEA-based approach, measures the change in the total factor productivity of two observations as the ratio of distances to a common technology. Index is formulized according to the definition of Fare et al.'s (1994) geometric mean of the two Malmquist productivity indices (M_1 ve M_2), as in Equation 1:

$$M = (M_1 * M_2)^{1/2} \quad (1)$$

M_1 in the formula represents the Malmquist index obtained based on t period technology, while (M_2) represents the Malmquist index obtained based on t+1 period technology. M can take values equal to 1, greater than 1, or less than 1 depending on the productivity changes between two periods in the i production unit (Coelli, 1996).

The Malmquist index also provides information on the sources of change in TFP (Equation 2).

$$\underbrace{M_1^{t+1}(y^t, y^{t+1}, x^t, x^{t+1})}_{TFPC} = \underbrace{\frac{D_1^t(y^{t+1}, x^{t+1})}{D_1^t(y^t, x^t)}}_{EC} * \underbrace{\left[\frac{D_1^t(y^{t+1}, x^{t+1})}{D_1^{t+1}(y^{t+1}, x^{t+1})} * \frac{D_1^t(y^t, x^t)}{D_1^{t+1}(y^t, x^t)} \right]^{1/2}}_{TC} \quad (2)$$

Equation 2 means that the change in total factor productivity (TFPC) expressed by the TFP change consists of multiplying the productivity change (EC) and the technical change (TC). The productivity change shows how close the production unit is to the effective limit, while the technical change shows the effective limit change. When the values obtained are evaluated between t and t+1 period, the fact that the result is greater than 1 indicates that the effectiveness and technical change increases, the fact that it is less than 1 decreases, and the fact that it is equal to 1 does not change (Sturm and Williams, 2002).

Since the return characteristics of technology relative to scale have an important place in the TFP index, the assumption of the CCR Model, DEA model that takes constant return relative to scale, should be based on estimating distance functions in the measurement of the Malmquist Index. For this reason, the calculation was made by taking into account CCR values in the analysis. Employment and gross capital formation values of countries were used as input variables in the calculations of the Malmquist TFP index for CCR scores, while gross domestic product values were used as output variables.

3.2. Tobit Model

In econometric analysis, having to limit the value of the dependent variable from the bottom or top causes data loss. In such a case, information about the dependent variable is found only for some observations, such a censored regression model is known as the Tobit Model. The Tobit Model, an extension of the Probit model, was developed by James Tobin (Tobin, 1958).

Linear regression of an observable (latent) dependent variable (y^*) with independent variable(s) is defined as in Equations 3-5.

$$y_i^* = x_i' \beta + u_i \quad (i = 1, \dots, n) \tag{3}$$

$$y_i = \begin{cases} y_i^*, & y_i^* > 0 \\ 0, & y_i^* \leq 0 \end{cases} \tag{4}$$

$$u_i \sim IIN(0, \sigma^2) \tag{5}$$

Here; y_i^* indicates unobservable (latent) dependent variable, X_i explanatory variable (s) to the vector, β vector of coefficients, u_i identical and independent normal distribution (identically and independently Normal IIN) error term and y_i indicates the observed dependent variable.

At the first stage of the study, the productivity values obtained by the Malmquist TFP Index, a DEA-based measurement, were limited to 1 from the top (from the right). Limiting the TFP values that will be used as dependent variables has led to the most appropriate choice for the model to be created in the second phase of the study being the Tobit Model. The Random Effects Panel Tobit model, created to decipher the relationship between TFP values and digital participation values of 30 countries used in the analysis, is defined as in Equations 6-8.

$$y_{it}^* = x_{it}' \beta + u_i + \varepsilon_{it} \tag{6}$$

$$y_{it} = \begin{cases} y_{it}^*, & y_{it}^* < 1 \\ 1, & y_{it}^* \geq 1 \end{cases} \tag{7}$$

$$u_i \sim IIN(0, \sigma_u^2) \text{ and } \varepsilon_{it} \sim IIN(0, \sigma_\varepsilon^2) \tag{8}$$

In the model in which TFP scores are included as dependent variables, the model in which digital participation (dig) values of countries represent digitalization as independent variables are estimated.

The model created as a result of studying both theoretical and practical studies for the purpose of the study is as follows (Equation 9):

$$TFP_{it} = \beta_0 + \beta_1 DIGINC_{it} + u_i + \varepsilon_{it} \tag{9}$$

In the model, TFP_{it} is total factor productivity value of i country in t and $DIGINC_{it}$ is digital participation rate of i country in year t . In addition, u_i and ε_{it} are the error terms of the model, and u_i refers to the random effect and is the same in each period.

TFP_{it} variable used as a dependent variable was calculated by us as the Malmquist TFP Index, which refers to the change in TFP between the two periods, using the employment and gross capital formation values of countries as input variables, and the gross domestic product values as output deciduous variables. Digital inclusion is an EU-wide effort to ensure that everyone can contribute to and benefit from the digital world (European Commission, 2021).

4. FINDINGS

Using the DEAP 2.1 program, the TFP indices calculated as of 2012-2020 are reported in Table 1. When the results contained in the chart are evaluated between t and $t+1$ period, the result greater than 1.000 means an increase in TFP, less than 1.000 means deceleration, and equal to 1.000 means that no change has occurred.

Table 1. Malmquist total factor productivity values

<i>Country</i>	<i>Periods</i>							
	2012-2013	2013-2014	2014-2015	2015-2016	2016-2017	2017-2018	2018-2019	2019-2020
Austria	0,518	0,682	0,763	0,810	0,841	0,864	0,881	0,899
Belgium	0,520	0,681	0,762	0,810	0,842	0,865	0,882	0,899
Bulgaria	0,545	0,698	0,771	0,811	0,839	0,861	0,876	0,900
Croatia	0,539	0,690	0,762	0,802	0,834	0,858	0,876	0,898
Cyprus	0,583	0,727	0,791	0,828	0,857	0,877	0,895	0,923
Czechia	0,513	0,676	0,756	0,805	0,837	0,861	0,878	0,894
Denmark	0,517	0,680	0,760	0,808	0,840	0,863	0,880	0,896
Estonia	0,776	0,843	0,884	0,899	0,900	0,916	1,014	1,003
Finland	0,515	0,678	0,758	0,806	0,838	0,862	0,879	0,894
Germany	0,504	0,668	0,750	0,800	0,833	0,857	0,875	0,889
Greece	0,515	0,677	0,758	0,807	0,838	0,861	0,879	0,895
Hungary	0,508	0,672	0,754	0,804	0,836	0,859	0,877	0,892
Iceland	0,588	0,705	0,777	0,820	0,852	0,872	0,890	1,026
Ireland	0,513	0,675	0,752	0,807	0,837	0,860	0,879	0,893
Italy	0,508	0,676	0,759	0,807	0,839	0,863	0,880	0,898
Latvia	0,558	0,727	0,802	0,851	0,873	0,888	0,906	1,000
Lithuania	0,611	0,731	0,797	0,843	0,862	0,886	0,899	1,105
Luxembourg	0,541	0,688	0,757	0,801	0,835	0,858	0,876	0,890
Malta	0,633	0,756	0,809	0,858	0,868	0,892	1,002	1,021
Netherlands	0,517	0,679	0,761	0,809	0,840	0,863	0,880	0,896
Norway	0,519	0,681	0,762	0,811	0,842	0,865	0,882	0,896
Poland	0,519	0,681	0,760	0,809	0,839	0,861	0,878	0,894
Portugal	0,514	0,676	0,757	0,806	0,838	0,861	0,878	0,895
Romania	0,510	0,674	0,756	0,804	0,836	0,860	0,878	0,893
Slovakia	0,506	0,671	0,753	0,803	0,835	0,859	0,877	0,891
Slovenia	0,551	0,707	0,783	0,827	0,853	0,874	0,891	1,089
Spain	0,514	0,676	0,756	0,805	0,837	0,861	0,878	0,896
Sweden	0,519	0,681	0,760	0,809	0,840	0,863	0,881	0,896
Turkey	0,514	0,677	0,758	0,807	0,838	0,862	0,880	0,893
United Kingdom	0,506	0,672	0,755	0,804	0,837	0,860	0,878	0,894

Considering the values reported in Table 1 in the period 2018-2019 only Estonia and Malta exhibited increased productivity compared to the previous period, in the period 2019-2020, Estonia, Iceland, Lithuania, Malta and Slovenia had a change in total factor productivity in the direction of increase and no change was found for Latvia. In all other periods, no productivity growth has been determined in the countries subject to review. According to the results of the analysis, the highest TFP average for the period 2012-2020 belongs to Estonia and the lowest average belongs to Germany.

The results obtained from the estimation of the Tobit model, Bootstrap Tobit model and Marginal Effects given in equality (9) by the maximum probability method using the balanced panel data set for the period 2012-2020 are reported in Table 2.

Table 2. Random effect panel tobit model estimation results

<i>TFP</i>	<i>Coef.</i>	<i>Std. Err.</i>	<i>z</i>	<i>P> z </i>	<i>[95% Conf. Interval]</i>	
DIGINC	0,014379	0,0010376	13,86	0,013	0,0123454	0,0164127
_cons	-0,3493842	0,0875779	-3,99	0,000	-0,5210338	0,1777346
/sigma_u	0,1590569	0,024212	6,57	0,000	0,1116022	0,2065116
/sigma_e	0,0833264	0,004237	19,67	0,000	0,0750221	0,0916308
Rho	0,7846532	0,0557882			0,6606132	0,8773566
<i>LR test of sigma_u=0: chibar 2(01)</i>			<i>57.77</i>	<i>Prb> =chibar 2</i>	<i>0.000</i>	
<i>Bootstrap Tobit</i>						
<i>TFP</i>	<i>Coef.</i>	<i>Bootstrap Std. Err.</i>	<i>z</i>	<i>P> z </i>	<i>[95% Conf. Interval]</i>	
DIGINC	0,014379	0,0045792	3,14	0,002	0,005404	0,0233541
<i>Marginal Effects</i>						
<i>TFP</i>	<i>dy/dx</i>	<i>Delta Method Std. Err.</i>	<i>z</i>	<i>P> z </i>	<i>[95% Conf. Interval]</i>	
DIGINC	0,014379	0,0010376	13,86	0,000	0,0123454	0,0164127

Notes: Number of observations: 240, Uncensored: 232, Left censored: 0, Right-censored: 8, Number of group: 30, Observations per group: (min: 8, avg: 8.0, max: 8), Log Likelihood: 188.8943, Wald χ^2 (1): 192.05, Prob > χ^2 :0.0000

According to the estimated results obtained, 232 of the 240 observations are uncensored, i.e. the value of the dependent variable (TFP) is below 1, and 8 of them are censored from the top (right), i.e. the value of the dependent variable is above 1. According to the Wald statistical value, which is used to test the meaningfulness of the overall model, due to the fact that the probability (prob) value (0.0000) of the Wald value, which exhibits a distribution of χ^2 with 1 degree of freedom, is less than the determined α significance level (0.01), zero hypothesis (H_0) in the form of “model is generally insignificant” (parameters are insignificant together) is rejected and it is concluded that model is significant at the significance level of %1. In addition, the marginal effects of the model were calculated. According to the results, it was determined that 1 unit change in DIGINC caused an increase of 0.014379 units on the TFP value.

Table 2 contains, among other results, coefficient estimates, standard errors related to estimates, Z statistics, p values, and 95% confidence range. It was determined that the coefficient of this variable was statistically significant, and its sign was positive because the values of DIGINC variable P, which refers to the digital participation rate of the 30 countries subject to the analysis, were less than the determined α significance level.

5. CONCLUSION

Success of firms at the micro level and countries on the macro scale depends on producing more without increasing the use of labor, capital or other inputs. Digitalization is recognized as a new phenomenon affecting the success of companies and countries. This study provides some evidence in terms of the impact of digitalization on TFP. Does an inclusive digitalization, that is, a situation where everyone contributes and benefits the digital world, affect TFP? For this purpose, digital inclusion prepared by Eurostat was discussed and its relationship with TFP was examined in 30 countries for 2012-2020 years. The calculated Malmquist TFP index was analyzed using the Tobit model with the digitalization variable. The results showed that digital inclusion increased TFP. Given the impact of innovation on increasing competitiveness and economic growth, and the rapid spread of digitization on a global scale, the results do not seem surprising. Digitalization is an application for every field. But digitalization is known to have significant heterogeneity within countries or even regions. Not every actor has access to the digital world and the degree to which they are keeping up is to the same extent. Infrastructure investments, especially in underdeveloped and developing countries, need to be completed and various obstacles must be removed. Businesses that have advantages, especially in their field, should come into play and provide a breakthrough within the industry. It is very important that digitalization practices are shared, and investments are made correctly. Because it is inevitable that people will now coexist with technology. In doing business together and jointly, there is a need for policies that will decrease the costs of labor rather than the labor losses and make a quick profit. Trainings should be organized to adapt employees to digitized processes in a short period of time. Digitalization causes stronger ties in production and marketing at the level of international economic relations and the world to become more integrated. For example, the internet allows people to develop new ideas, entrepreneurs and markets, offering high-speed and intermediary-free and end-user-friendly systems to new products outside of specific businesses.

Digitalization should be considered as an interdisciplinary concept that should be studied in multidimensional terms. But the fact that digitalization has started to be investigated over the past few

decades, especially in terms of measurement methods, causes the data set to be limited to the past. This eliminates the possibility of working with a long data set. In addition, there is a problem that some data has not been available in recent years. For this reason, it is thought that studies on digitalization will accelerate in the coming years due to the development of the data set.

REFERENCES

- Akaeva, A.A. and Sadovnichii, V.A. (2021). "The Human Component as a Determining Factor of Labor Productivity in the Digital Economy", *Studies on Russian Economic Development*, 32(1), 29-36.
- Berlak, J., Hafner, S. and Kuppelwieser, V.G. (2021). "Digitalization's Impacts on Productivity: A Modelbased Approach and Evaluation in Germany's Building Construction Industry", *Production Planning & Control*, 32(4), 335-345.
- Bhatnagar, H. (2017). "Demonetization to Digitalization: A Step Toward Progress", *Management and Economics Research Journal*, 3, 11-15.
- Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2018). "Türkiye'nin Sanayi Devrimi Dijital Türkiye Yol Haritası", https://www.gmka.gov.tr/dokumanlar/yayinlar/2023_Dijital-Turkiye-Yol-Haritasi.pdf (Accessed Date: 20.07.2021).
- Burkett, D. (2017). "Digitisation and Digitalisation: What Means What?" <https://workingmouse.com.au/innovation/digitisation-digitalisation-digital-transformation>, (Accessed Date: 11.07.2021).
- Caves, D. W., Christensen, L. R. and Diewert, W. E. (1982). "Multilateral Comparisons of Output, Input and Productivity Using Superlative Index Numbers", *Economic Journal*, 92, 73-86.
- Cette, G., Nevoux, S. and Py, L. (2021). "The Impact of ICTs and Digitalization on Productivity and Labor Share: Evidence from French Firms", *Economics of Innovation and New Technology*, DOI: 10.1080/10438599.2020.1849967.
- Coelli, T. (1996). "A Guide to DEAP Version 2.1: A Data Envelopment Analysis (computer) Program. Centre for Efficiency and Productivity Analysis", *University of New England*, Australia, 96(08), 1-49.
- Coelli, T. J., Rao, D. S. P., O'donnell, C. J. and Battese, G. E. (2005). "An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis", Springer Science & Business Media, Australia.
- Corduneana, A. (2018). "Schumpeterian View on Economic Development through Information Technologies", *Proceedings of the 9th International Conference of Doctoral Students and Young Researchers*, Romania, 78-81.
- European Commission. (2021). <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/digital-inclusion>, (Accessed Date: 15.07.2021).
- Eurostat. (2021), <https://ec.europa.eu/eurostat>, (Accessed Date: 15.07.2021).
- Ezrachia, A. and Stucke, M. E. (2018). "Digitalisation and its Impact on Innovation", European Commission Working Paper.
- Färe, R., Grosskopf, S., Norris, M. and Zhang, Z. (1994). "Productivity Growth, Technical Progress and Efficiency Change in Industrialized Countries", *The American Economic Review*, 84(1), 66-83.
- Gal, P., Nicoletti, G., Renault, T., Sorbe, S. and Timiliotis, C. (2019). "Digitalisation and Productivity: In Search of the Holy Grail Firm-Level Empirical Evidence from European Countries", OECD, Economics Department Working Papers No. 1533.
- Habibi, F. and Zabardast, M. A. (2020). "Digitalization, Education and Economic Growth: A Comparative Analysis of Middle East and OECD Countries", *Technology in Society*, 63, 101370.
- Hagberg, J., Sundstrom, M. and Egels-Zandén, N. (2016). "The Digitalization of Retailing: An Exploratory Framework", *Int. J. Retail Distrib. Manag.*, 44(7), 694-712.
- Henriette, E., Feki, M. and Boughzala, I. (2016). "Digital Transformation Challenges", MCIS 2016 Proceedings 33, <http://aisel.aisnet.org/mcis2016/33>(Accessed Date: 20.07.2021).
- Horvat, D., Kroll, H. and Jäger, A. (2019). "Researching the Effects of Automation and Digitalization on Manufacturing Companies' Productivity in the Early Stage of Industry 4.0", *Procedia Manufacturing*, 39, 886-893.
- IEA. (2017). "Digitalization & Energy", <https://www.iea.org/reports/digitalisation-and-energy>, (Accessed Date: 11.07.2021).
- Jacobsen, C., Sørensen, A. and Junge, M. (2011). "Digitalization and Productivity", Centre for Economic and Business Research, Frederiksberg.
- Jeske, T., Wurfels, M. and Lennings, F. (2021). "Development of Digitalization in Production Industry – Impact on Productivity, Management and Human Work", *Procedia Computer Science*, 180, 371-380.
- Katz, R., Koutroumpis, P. and Callorda, R. M. (2013). "Using a Digitization Index to Measure the Economic and Social Impact of Digital Agendas", *info*, 16(1), 32-44.
- Kravchenko, O., Leshchenko, M., Marushchak, D., Vdovychenko, Y. and Boguslavskaya, S. (2019). "The Digitalization as a Global Trend and Growth Factor of the Modern Economy", *SHS Web of Conferences* 65, 07004, 1-5.

- Krutova, O., Koistinen, P., Turja, T., Melin, H. and Sarkikoski, T. (2021). "Two Sides, but Not of the Same Coin: Digitalization, Productivity and Unemployment", *International Journal of Productivity and Performance Management*, 70(2), 427-458.
- Leon D. and Meyer V. (2019). "Efficiency Evaluation of Digitalization", KTH Royal Institute of Technology Information and Communication Technology, Degree Project, Fourth Cycle, 15 Credits Stockholm, Sweden.
- Malmquist, S. (1953). "Index Numbers and Indifference Curves," *Trabajos de Estadística*, 4, 209-242.
- Mammadli, E. and Klivak, V. (2020). "Measuring the Effect of the Digitalization", The University of Tartu FEBA.
- Mankiw, N. G. (2003). "Macroeconomics", Worth Publishers, New York.
- McKinsey Global Institute (2018). "Solving The Productivity Puzzle: The Role of Demand and the Promise of Digitization", McKinsey & Company.
- Metlyakhi, A. I., Nikitina, N. A., Yarygina, L. V. and Orlova, E. O. (2020), "Analysis of the Impact of Economy Digitalization on Labor Productivity in Russia", *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*, 13(2), 7-17.
- Myovella, G., Karacuka, M. and Haucap, J. (2020). "Digitalization and Economic Growth: A Comparative Analysis of Sub-Saharan Africa and OECD Economies", *Telecommunications Policy*, 44, 101856.
- OECD. (2020). "A Roadmap toward a Common Framework for Measuring the Digital Economy, Report for the G20 Digital Economy Task Force", Saudi Arabia.
- Oyeranti, G. A. (2000). "Concept and Measurement of Productivity", <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.511.9388&rep=rep1&type=pdf>, (Accessed Date: 29.07.2021).
- Pakdemirli, B. (2019). "Dijital Dönüşüm ve Ekonomik Büyüme", *Adıyaman Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 12(32), 666-694.
- Pilat, D. and Criscuolo, C. (2018). "The Future of Productivity What Contribution can Digital Transformation Make?", *Policy Quarterly*, 14(3), 10-16.
- Prokopenko, J. (2005). "Verimlilik Yönetimi Uygulamalı El Kitabı", (Çev.: O. Baykal, N. Atalay, E. Fidan), MPM Yayınları, No: 476, Ankara.
- Savic, D. (2019). "From Digitization, through Digitalization, to Digital Transformation", *Online Searcher*, 43, 36-39.
- Şengül, Ü., Shiraz, S.E. and Eren, M. (2013). "Türkiye'de İstatistikî Bölge Birimleri Sınıflamasına Göre Düzey 2 Bölgelerinin Ekonomik Etkinliklerinin DEA Yöntemi ile Belirlenmesi ve Tobit Model Uygulaması", *Yönetim Bilimleri Dergisi*, 11(21), 75-99.
- Solow, R. M. (1956). "A Contribution to the Theory of Economic Growth", *The Quarterly Journal of Economics*, 70(1), 65-94.
- Sturm, J. and Williams, B. (2002). "Deregulation, Entry of Foreign Banks and Bank Efficiency in Australia", CESifo Working Paper, No: 816.
- Tobin, J. (1958). "Estimation of Relationships for Limited Dependent Variables", *Econometrica*, 26(1), 24-36.
- Tone, K. (2004). "Malmquist Productivity Index" Handbook on Data Envelopment Analysis", Springer, US.
- Trască, D. L., Stefan, G. M., Sahlian, D. N., Hoinaru, H. and Serban-Opreşcu, G. L. (2019). "Digitalization and Business Activity. The Struggle to Catch Up in CEE Countries", *Sustainability*, 11(2204), 2-17.
- TÜBİSAD (2020). "Türkiye'nin Dijital Dönüşüm Endeksi", Ofset Matbaacılık Sanayi ve Ticaret A.Ş. (Accessed Date:04.08.2021).
- World Bank, <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators>, (Accessed Date:11.07.2021).
- Yılmaz, Y. (2021). "Dijital Ekonomiye Geçiş Süreci, Ölçümü ve Dijitalleşme Verimlilik İlişkisi", *İstanbul İktisat Dergisi*, 71, 2021/1, 283-316.

PREDICTION OF HIGH CYCLE TIMES IN WHEEL RIM MOLDING WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS¹

İnanç KABASAKAL², Fatma DEMİRCAN KESKİN³

ABSTRACT

Purpose: This study proposes a two-stage approach to determine a cycle-time threshold and predict high cycle times by examining sample molding process data obtained from a wheel-rim manufacturer.

Methodology: Our study firstly determines thresholds for high cycle times with two alternate approaches. Subsequently, data were labeled regarding the cycle-time threshold. Alternate models based on Artificial Neural Networks (ANNs) were developed in R to predict high cycle times.

Findings: Our findings include a comparison of cycle-time threshold approaches through a distance-based metric. After labeling of high cycle times, our study presents the performance of alternate predictive models. The performance of models was compared in terms of accuracy, recall and precision.

Originality: Process mining in wheel rim molding has been found meager in prior research, despite the abundance of process mining applications and cycle-time prediction models. Another distinctive aspect of the study is cycle-time threshold determination with multiple methods to eliminate manual labeling of processes.

Keywords: Cycle Time Prediction, Process Mining, Machine Learning, Artificial Neural Networks.

JEL Codes: M11, C38, C45.

JANT DÖKÜMÜNDE YAPAY SİNİR AĞLARI İLE YÜKSEK ÇEVİRİM SÜRELERİNİN TAHMİN EDİLMESİ

ÖZET

Amaç: Bu çalışmada, bir jant üreticisinden alınan numune kalıplama proses verileri incelenerek, çevrim süresi eşik değerleri belirleyen ve bu değere dayalı yüksek çevrim sürelerini tahmin eden iki aşamalı bir yaklaşım önerilmektedir.

Yöntem: Çalışmada öncelikle iki alternatif yaklaşımla çevrim süresi için eşik değer belirlenmektedir. Ardından, eşik değer uyarınca proses verileri etiketlenmektedir. Yüksek çevrim sürelerini tahmin etmek için R'da Yapay Sinir Ağları (YSA) uygulanarak alternatif sınıflandırma modelleri geliştirilmiştir.

Bulgular: Çalışmada uzaklık bazlı bir ölçüt aracılığıyla çevrim süresi eşiği belirleme yaklaşımları karşılaştırılmaktadır. Yüksek çevrim sürelerinin etiketlenmesini takiben alternatif tahminleme modellerinin performansları sunulmaktadır. Tahminleyici modellerin performansı doğruluk, duyarlılık ve kesinlik ölçütleri ile karşılaştırılmaktadır.

Özgünlük: Literatürde proses madenciliği uygulamaları ve çevrim süresi tahmin modelleri sıklıkla çalışılmış olmasına karşın, jant dökümünde proses madenciliği ile ilgili çalışmalara sık rastlanmamaktadır. Çalışmada bir diğer özgün yön ise, gecikmelerin manuel biçimde etiketlenmesi yerine, çevrim süresi için eşik değer belirleyen çoklu yaklaşım izlenmesidir.

Anahtar Kelimeler: Çevrim Süresi Tahmini, Proses Madenciliği, Makine Öğrenmesi, Yapay Sinir Ağları.

JEL Kodları: M11, C38, C45.

¹ This study is a substantially revised and extended version of the paper entitled "Artificial Neural Network Based Cycle-Time Prediction Model for Wheel Rim Molding" presented in the 10th International Symposium on Intelligent Manufacturing and Service Systems held in Sakarya, Turkey on September 9 to 11, 2019.

² Res. Assist. Dr., Ege University, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Department of Business Administration, İzmir, Turkey, inanc.kabasakal@ege.edu.tr, ORCID: 0000-0003-0098-0144 (Corresponding Author).

³ Res. Assist. Dr., Ege University, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Department of Business Administration, İzmir, Turkey, fatma.demircan.keskin@ege.edu.tr, ORCID: 0000-0002-7000-4731.

1. INTRODUCTION

Digital technologies have been increasingly used in the manufacturing industry to improve efficiency and increase profitability. Rapid progress in digital technologies has also been reshaping businesses over the last decade. Such progress is often mentioned by scholars as the Industrial Internet or Industry 4.0.

Scholars have often emphasized the term Industry 4.0 as an extensive change in the manufacturing environment. Shrouf et al. (2014) noted that the key ability for smart systems is to adopt behaviors through perceiving the information and derive findings that lead to actions in real-time. Růßmann et al. (2015) also noticed that a significant improvement for manufacturing would be the sensing and self-learning capability in machinery. Besides, the integration of digital technologies in manufacturing systems improves the monitoring of processes by enabling real-time process data collection.

Process variations are inevitable in production systems. Process variability, which may occur due to many internal factors such as the equipment and materials used, methods applied, operational causes, or external factors, can create variability in the process cycle time (Mrugalska and Ahrum, 2017). The high increase in cycle time has significant adverse effects on production performance, traceable in metrics such as productivity and on-time delivery rate. Therefore, it is crucial to predict high cycle times and take action to prevent such problems. Prediction of high cycle times might be particularly useful in industries such as the automotive and automotive supply industry, where fluctuations in productivity might lead to severe consequences. With such considerations, this study aims to present a high cycle time prediction model for molding process in wheel rim manufacturing.

Despite the availability of prior research in cycle time prediction, to our knowledge, there has been no study in this domain where sensor data was used for high cycle time prediction in wheel rim molding. Our model for the problem incorporates a two-stage approach that involves high cycle time threshold determination, and high cycle time prediction. The first stage in our approach incorporates leveraging statistical methods to determine an appropriate threshold rather than manually choosing a specific value. Particularly, a median-based approach of Leys et al. (2013) and the k-means clustering algorithm have been employed one at a time to determine cycle time thresholds. The second stage involves training and using neural networks as binary classifiers towards high cycle time prediction. The model was tested against the process data obtained from a large-scale wheel rim manufacturer in Turkey.

A secondary objective in this study is to compare the effect of threshold determination method selection on the predictive power of our model. In our case, cycle times are labeled after comparing to a threshold, and changing a threshold is a significant decision that modifies the labels within the data before analysis. Therefore, another original aspect of our study is the persistence to obtain better predictive performance at the cost of relabeling data and retraining the predictive model.

This paper is organized as follows. The following section provides a literature review on process mining and prediction of process parameters, including cycle times. Moreover, prior research on high cycle time prediction in relevant processes is summarized in this section. The next section introduces the case study. In the methodology section, the two-stage approach is presented in two stages: threshold selection and high cycle time prediction. The subsequent section involves the results where a detailed comparison of trained models is demonstrated. Finally, the high cycle time prediction model being presented is briefly summarized and reviewed in the conclusion section.

2. LITERATURE REVIEW

2.1. Process Mining

In manufacturing systems, real-time monitoring of processes, recording real-time values of process parameters, and predicting important process performance measures by applying machine learning methods is a widely followed approach to cut down product failures (Deuse et al., 2019). Monitoring of systems, capturing real-time event logs, mining data to extract potentially valuable information are among essential activities in process mining (Van der Aalst, 2011). In this regard, predicting process-related parameters, including cycle time, can be described as process mining tasks. This concept also relates to the determination of high cycle times in processes.

2.2. Process Parameter Prediction

In recent studies, it is noticeable that machine learning methods are often employed to predict the target variables or classify patterns obtained within data. The literature hosts numerous studies that utilize supervised learning techniques for classification and prediction in manufacturing. Yu and Xi (2009) proposed an out-of-control signal detection model based on neural networks for a manufacturing process. Chen (2015) examined the cycle time prediction problem of jobs in wafer fabrication and proposed a

methodology comprising steps of the initial prediction of jobs' cycle time based on ANN, improvements of these predictions by constructing parameters' adjustments, and post-classification using the adjusted parameters.

Quality prediction is another significant prediction task in prior process mining studies. Wang et al. (2019)'s ANN-based and Bai et al. (2019)'s SVM-based models were both proposed to predict quality-related parameters. Moreover, Köksal et al. (2010) examined process data obtained from a business in the molding industry and extracted decision trees that predict batch quality and identify the underlying factors for quality-related problems.

In a relevant study, Quintana et al. (2011) employed ANNs for the surface roughness prediction problem for the milling process. Asiltürk and Çunkaş (2011) employed Multiple Regression and ANN using the measurements taken after the turning operations to predict the steel surface roughness. Moreover, Lieber et al. (2013) used sensor data to predict the quality of products by utilizing Decision Trees, Support Vector Machines, the Nearest Neighbor Method. Table 1 lists several studies that predict process parameters with machine learning methods:

Table 1. Machine learning models for prediction of process parameters

<i>Authors</i>	<i>Predicted Process Parameter</i>	<i>Method(s)</i>
Yu and Xi (2009)	Out-of-control signals	ANN
Chen (2015)	Cycle Time in wafer fabrication	ANN
Wang et al. (2019)	Quality-related process parameters	ANN
Quintana et al. (2011)	Surface roughness prediction	ANN
Asiltürk and Çunkaş (2011)	Steel surface roughness	Multiple Regression and ANN
Lieber et al. (2013)	Product quality	Decision Trees, Nearest Neighbor Method, Support Vector Machines
Bai et al. (2019)	Quality-related process parameters	Support Vector Machines

In the context of manufacturing, cycle time and throughput are essential measures that help decision-makers to assess performance (Chien et al., 2012). Cycle time is one of the most significant measures reflecting many production system performance indicators such as the production rate and quality, productivity, required inventory amounts to be held, and the on-time delivery ratio (Backus et al., 2006; Khan et al., 2014). In prior research, cycle time is often discussed along with Little's Law (Little, 1961) that relates cycle time with the WIP (work in process) and throughput. Accordingly, average throughput equals the ratio of total WIP over the average cycle time; however, the rule results in long-term results with relatively steady conditions (Rust, 2008).

A significant opportunity led by digital technologies in manufacturing is the increased availability of real-time data. In their discussion of the use of Industry 4.0 technologies in manufacturing, Kolberg and Zühlke (2015) noted that smart machines might negotiate cycle-times to contribute to a higher degree of lean automation. In this regard, the cycle-time prediction might be dealt with as a problem with a context-aware aspect. Besides, data-driven models that rely on contextual data have been proposed to predict cycle time more instantaneously.

2.3. High Cycle Time Prediction

Cycle time estimation or high cycle time prediction has been addressed in various domains. Due to the scarcity of prior models for this problem in wheel rim molding, this study attempts to present a classification model. On the other hand, there are processes that exhibit similar characteristics, such as the degree of variability in the process. For instance, the wafer fabrication process often hosts cycle time prediction problems. The prediction models in this domain involve techniques such as simulation, fuzzy modeling, neural networks, and hybrid techniques. Moreover, Chen et al. (2009) noticed that neural networks are often employed due to their effectiveness and accuracy for cycle time prediction in wafer fabrication.

Goodwin et al. (2004) covered the problem of cycle-time prediction for semiconductor manufacturing and underlined the necessity of statistical learning and data mining techniques due to the variety of stochastic variables in the process. Additionally, the authors presented predictions with several techniques, including ANNs.

For the prediction of cycle time and related measures, the wafer fabrication process has been occasionally revisited by scholars. Chen (2007) handled the output time prediction problem by firstly classifying the wafer lots with the k-means algorithm. Chen et al. (2008) predicted job completion times with a hybrid approach, including the use of neural networks and self-organization maps in this process.

Moreover, Chang et al. (2009) examined the flow time prediction problem about the same process and proposed a multi-step approach in which the data is clustered and flow times are individually predicted for each cluster. In prediction, the authors used a case-based reasoning approach where the feature weights are adjusted by the Genetic Algorithm. Additionally, Meidan et al. (2011) investigated the cycle time prediction problem for the wafer fabrication process by focusing on the waiting time, which is among the most significant components of cycle time. Such an approach relied on firstly determination of the key identifiers of waiting time by feature selection; then, prediction of the classes of waiting time with naive Bayesian classifier by using these identifiers. Furthermore, Wang and Zhang (2016) dealt with the cycle time prediction problem by focusing on the determination of the features that reflect the characteristics of the wafer fabrication system being analyzed. Accordingly, the authors employed a conditional mutual information-based approach in feature selection; then, a hybrid backpropagation network and fuzzy c-means approach in cycle time prediction.

Depending on the importance of cycle time, in the literature, the prediction of cycle time has attracted considerable interest. To date, many approaches, including statistical, simulation-based, analytical, artificial intelligence, hybrids of those, have been proposed and applied to predict cycle time in different types of industries (Chen, 2007; Wang and Zhang, 2016). Siller et al. (2006) proposed an instance of such models for predicting cycle time in a high-speed milling process. Chien et al. (2005) analyzed historical semiconductor production line data for cycle time prediction using Decision Trees. Furthermore, recent studies also incorporated a combination and comparison of multiple methods for cycle-time prediction. Backus et al. (2006) noted that most studies involve statistical analysis (such as regression technique), simulation models, and neural networks to obtain cycle time; and compared the predictive performance of Classification and Regression Trees (CART), ANN, and K-Nearest Neighbors methods using mean and median absolute error values. In a more recent study, Polato et al. (2014) developed a regression model to predict the remaining time for completion, rather than the cycle time; and noted that the use of such models provides an output at real-time for operational support that help to take proper actions.

The molding process is a process where process dynamics vary depending on time; the used raw materials change state, and therefore show non-linear properties and involve multi successive steps (Zhou, 2013). The high variability of the molding process makes it harder to determine whether an increase in cycle time depends on the variability caused by the nature of the process, or if it is due to process failures that can be eliminated. To distinguish these preventable increases in cycle time is a crucial step to improve business performance. Additionally, the benefits of predicting and preventing high cycle times might be noticed through performance indicators such as production rate, product quality, on-time delivery rate, and productivity.

A prerequisite for preventing high cycle times is essentially describing a rule that signifies whether a cycle time is normal or high. In this manner, several approaches from prior research might be adopted to classify processes over their cycle times or figure out processes with high-cycle time as outliers.

For the highly variable datasets that do not follow a normal distribution, approaches based on median and median absolute deviation measures are seen as more appropriate than the mean and standard deviation-based approaches in determining outliers (Da Costa et al., 2016; Leys et al., 2013). In the literature, there have been studies adopting the median-based approach by Leys et al. (2013), which is one of the most applied median-based outlier detection approaches for determining outliers in data pre-processing (Marti-Puig et al., 2018; Herrema et al., 2019), and as a fault detection strategy (Muhammed and Shaikh, 2017).

As another approach, clustering is an unsupervised learning task that groups similar data objects into clusters. The basic idea in clustering tasks is to group similar objects into clusters that are separate from each other (Han et al., 2012:490). K-means algorithm randomly generates k clusters at the first step, then places data objects into the nearest clusters using similarity criterion while recalculating the cluster means (Han et al., 2012:453). K-means clustering method is also useful in the identification of outliers (Sumathi and Sivanandam, 2006) since outliers do not easily classify in a particular cluster.

Additionally, several studies predict measures related to cycle time in various molding processes. Yarlagadda and Khong (2001) developed an ANNs based model to predict the injection time and pressure in the injection molding process. Ramkumar et al. (2015) followed a simulation-based approach for the cycle time prediction problem for the heating process in rotational molding. Kozjek et al. (2019) handled the fault detection problem in the plastic injection molding process with data mining approaches. The authors labeled the unscheduled machine stoppage observations in their dataset as faulty and the rest observations as normal, and aimed to identify these categories using several parameters, including cycle time.

Despite the variety of process mining models for high cycle prediction in various domains, it has been noted that such studies are meager in wheel rim molding. Arguably, this originates from the recent digitalization in wheel rim manufacturing plants, and our study benefits the collection of sensor data during the molding process. Besides, prior models on high cycle time prediction often used labeled data or a predefined threshold. Our approach differentiates from prior research with the threshold selection procedure, where the predictive performances of trained models were compared to determine the best method for threshold determination.

3. PROBLEM DESCRIPTION

Our case study addresses the prediction of high cycle times in the wheel rim molding process. Molding is one of the initial phases in wheel rim manufacturing. Various sub-processes take place during this phase, including the heating of the metal, melting, pouring, pressurizing, and cooling consecutively. The units are formed during this complex process which even obscures the identification of individual products at this step.

The molding process data analyzed was obtained from a large-scale wheel rim manufacturer located in Turkey. The original dataset was organized as a comma-separated text file, and this study examines a dataset of 1709 recordings for wheel rims molded into a standard cast on the same day. Each data point involves sensor-generated attributes, including relevant temperature, pressure, flow data measurements recorded during the sub-processes. Moreover, the specific durations of several key steps were also involved in the dataset. The independent variables and the range of values are demonstrated in Table 2.

Table 2. Variables and range of values in dataset

No	Variable	Range	No	Variable	Range
1	METAL_S_SET (°C)	[705, 710]	27	X7_COOL_DURATION (sec)	[120, 140]
2	METAL_SAKT (°C)	[685, 712]	28	X8_FLOW_AVG	[931,78; 1019,04]
3	MOD	[1, 8]	29	X9_FLOW_AVG	[899,43; 976,58]
4	METAL_INTAKE	[0, 5]	30	X9_W_DURATION (sec)	[90, 100]
5	PRESSURE_MAX	[5,73; 6,11]	31	X10_FLOW_AVG	[908,10; 984,48]
6	COOLING_TEMP (°C)	[507, 526]	32	X10_W_DURATION (sec)	[90, 100]
7	TC1_SET (°C)	[450, 500]	33	X11_FLOW_AVG	[0; 978,22]
8	TC1_AKT	[368, 3276]	34	X11_W_DURATION (sec)	[80, 100]
9	TC2_AKT	[269, 422]	35	X11_COOL_DURATION (sec)	[100, 120]
10	PHASE_1_DURATION (sec)	[5, 30]	36	XX11_FLOW_AVG	[0; 19,35]
11	PHASE_1_PRESSURE	[131,22; 514,87]	37	XX11_W_DURATION (sec)	[45, 65]
12	PHASE_2_DURATION (sec)	[7, 35]	38	XX11_COOL_DURATION (sec)	[30, 60]
13	PHASE_2_PRESSURE	[301,22; 1017,06]	39	XX12_FLOW_AVG	[0; 13,57]
14	PHASE_3_DURATION (sec)	[7, 133]	40	XX12_W_DURATION (sec)	[45, 65]
15	PHASE_4_DURATION (sec)	[40, 190]	41	XX12_COOL_DURATION (sec)	[30, 60]
16	PHASE_4_PRESSURE	[0, 1000]	42	XX13_FLOW_AVG	[0; 11,11]
17	PHASE_5_DURATION (sec)	[0, 50]	43	XX13_W_DURATION (sec)	[45, 65]
18	X1_FLOW_AVG	[0; 1233,23]	44	XX13_COOL_DURATION (sec)	[30, 60]
19	X2_FLOW_AVG	[1158,35; 1372,43]	45	XX14_FLOW_AVG	[0; 13,79]
20	X2_W_DURATION (sec)	[80, 100]	46	XX14_W_DURATION (sec)	[45, 65]
21	X2_COOL_DURATION (sec)	[120, 140]	47	XX14_COOL_DURATION (sec)	[30, 60]
22	X3_FLOW_AVG	[0; 1352,46]	48	XX2_FLOW_AVG	[16,4; 17,78]
23	X3_W_DURATION (sec)	[80, 100]	49	XX2_W_DURATION (sec)	[100, 120]
24	X3_COOL_DURATION (sec)	[120, 140]	50	XX2_COOL_DURATION (sec)	[80, 100]
25	X7_FLOW_AVG	[1133; 1234,72]	51	CYCLE_TIME (sec)	[236, 25438]
26	X7_W_DURATION (sec)	[80, 100]			

The input variables in the dataset have been adjusted into the range [0,1] with max-min normalization. Moreover, the distribution of cycle times was tested using Shapiro-Wilk’s method in R. The normality test

resulted in the p-value of $2.2e-16 < 0.05$. Accordingly, the distribution of the cycle time values is significantly different from the normal distribution. The density plot for cycle times is depicted below (Figure 1).

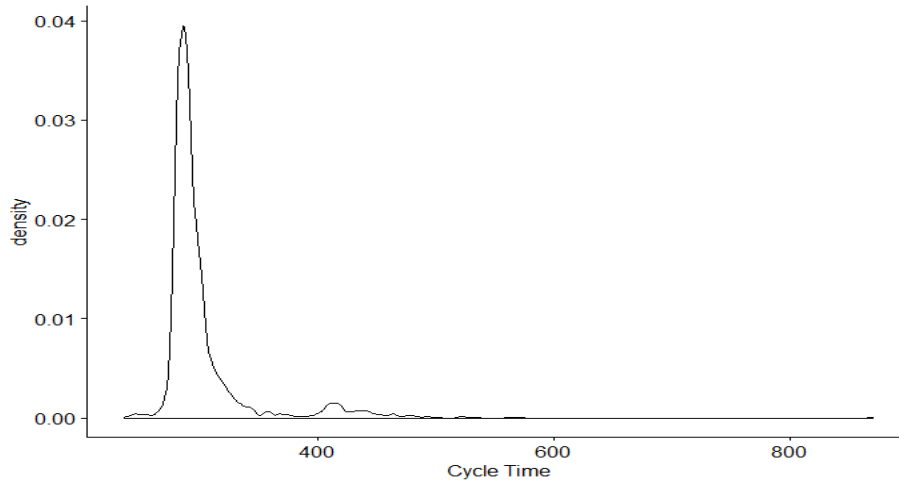


Figure 1. Distribution of cycle time values

4. METHODOLOGY

Our methodology consists of two stages for high cycle-time prediction, as summarized in Figure 2. Accordingly, our approach involves threshold determination and data labeling before training and testing prediction models.

A typical and straightforward approach would be training a prediction model in case class labels existed in the process data. However, our dataset includes cycle times, and a threshold should be determined to determine labels for data points. Choosing a high threshold would lead to a small group of data points labeled as “late”, and vice versa. For this reason, our methodology involves labeling the process data with multiple thresholds one at a time and choosing the better threshold that leads to better predictive performance.

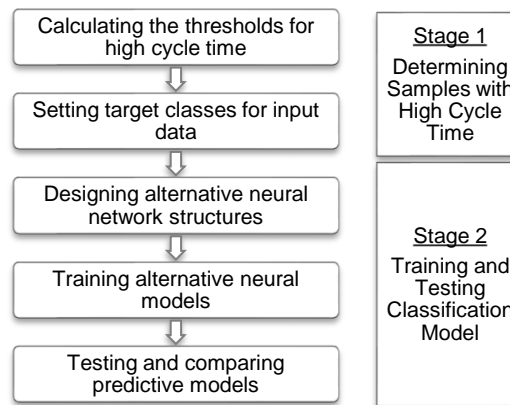


Figure 2. Threshold determination and prediction in our methodology

As demonstrated in Figure 2, first stage involves threshold determination to classify cycle times as high or normal, and labeling data accordingly. In the second stage, ANN models are trained and tested to predict the target values. The steps in both stages are introduced in more detail through the following subsections.

4.1. Determining Samples with High Cycle Time

Labeling a process based on its cycle time necessitates a threshold that differentiates normal and high cycle times. For this purpose, threshold determination was conducted as detailed in the following subsection. The next subsection briefly describes how data points are labeled right after threshold determination. Completing both steps at Stage 1 (Figure 2) prepares a labeled dataset that enables training a predictive machine learning model.

4.1.1. Calculating Thresholds for High Cycle Time

Our methodology employs two alternative approaches for high cycle-time threshold determination. The first approach calculates the median absolute deviation of cycle time recordings and determines the threshold based on this value. The second approach clusters process data regarding their cycle times. Thereby, the cluster with the higher cycle-time average involves potentially late processes. With this idea, determining a threshold separates clusters having normal and relatively high cycle time averages.

Our first approach for threshold determination is based on the method proposed by Leys et al. (2013) that relies on the use of the mean absolute deviation. The authors argued that the mean measure is sensitive to outliers, especially when the magnitude of outliers is remarkable. Due to the high variability in the cycle times and the existence of possible outliers, this approach was adopted to determine the data points with high cycle times.

Table 3 demonstrates our threshold computation procedure according to the method by Leys et al. (2013). The median and median absolute deviation measures for cycle-time were computed with *median()* and *mad()* functions in R. As detailed below, such computation resulted in a threshold of 325.58.

Table 3. Cycle time threshold by median-based approach

<i>Measure</i>	<i>Value (sec)</i>
Median	290,00
Median Absolute Deviation (MAD)	11,86
Threshold = Median + 3 x MAD	325,58

Our second approach to obtain a threshold was to apply the k-means algorithm to cluster data based on cycle times measured for individual parts. The technique was executed to obtain two clusters from the initial dataset, resulting in the clusters demonstrated in Table 4.

Table 4. Initial clustering results with k-means (k=2)

<i>Cluster</i>	<i>Members</i>	<i>Cluster Mean</i>
1	1	25438
2	1708	325,5

The clustering results in Table 4 apparently demonstrate an outlier for the record with an extremely high cycle time of 25,438. With such consideration, this record was removed as a part of the data preprocessing phase. The k-means clustering was repeated by taking k=2 and k=3 to obtain two and three clusters, respectively. The clusters obtained with both parameters are listed in Table 5:

Table 5. Clustering results with k-means for k=2 and k=3

<i>Parameter</i>	<i>Clusters</i>	<i>Mean</i>	<i>Range</i>	<i>Members</i>	<i>Cluster Similarity</i>
k=2	1	4515,78	[3121, 9761]	9	77,6%
	2	303,31	(0, 3121)	1699	
			Total	1708	
k=3	1	4515,78	[3121, 9761]	9	78,6%
	2	453,90	[374, 3121)	111	
	3	292,78	(0, 374)	1588	
			Total	1708	

Both sets of clusters identified a particular group of 9 processes with cycle times higher than 3121. Taking this threshold would result in 10 high cycle times, including the outlier. Moreover, clustering for k=3 discovered another group of 111 data points with relatively high cycle times. At this step, a comparison of both clustering results (k=2 and k=3) was conducted using the distance-based similarity metric, calculated as in Equation 1.

$$dist = \frac{\text{sum of squares within cluster}}{\text{sum of squares to other data points}} \tag{1}$$

The distance-based similarity for clusters obtained by k=3 was found slightly better than those obtained by k=2. (78,9% vs 77,6%). Moreover, the scarcity of members of Cluster 1 in both groups was noticed. In addition, Cluster 2 in the second clustering solution (k=3) also involved 111 members that still have relatively high cycle times. With those considerations, the second group of clusters obtained with k=3 was picked as the more appropriate option.

The minimum value of two clusters (clusters of 1 and 2, when k=3) was taken as the threshold to determine high cycle times in our k-means clustering approach.

4.1.2. Setting Target Classes for Input Data

The thresholds determined in the previous step were used to label the dataset in terms of cycle times. Accordingly, the target variable 'LATE' was set with binary values where 1 indicates high, and 0 indicates normal cycle times. Each record was labeled by simply comparing its cycle time with the threshold.

Since our study adopts two different approaches in threshold computation, this step was repeated for both thresholds.

4.2. Training and Testing Classification Model

Referring to our methodology in Figure 2, the main idea in Stage 2 is training and testing predictive models based on data labeled in Stage 1.

Jain et al. (1996) described ANNs as parallel computing systems that involve large numbers of interconnected processors, with the ability to adopt supervised and unsupervised learning abilities and perform tasks such as prediction, pattern classification, and function approximation. ANNs are often used within predictive models that analyze process data in manufacturing. One of the main advantages of ANNs is the ability to process information properties in complex non-linear and quite dynamic environments, even in datasets containing noisy information, thanks to their learning and generalization capabilities (Zhang et al., 1998; Noorzaei et al., 2007; Singh et al., 2016). Moreover, ANNs have higher fault tolerance than the supervised machine learning methods of Support Vector Machine and Random Forest. So, they are capable of handling data with missing values. ANNs are also scalable compared to Support Vector Machine and Random Forest (Abiodun et al., 2018). In this regard, our study employs ANN-based binary classifiers to predict high cycle times. Predictive model design, training, and testing steps are detailed in the following subsections.

4.2.1. Deriving Neural Network Structures

The selection of network structure is a crucial decision in training neural networks. However, Rafiq et al. (2001) noticed the lack of a universal method for selecting the number of hidden neurons when designing neural networks. Moreover, the authors underlined that the abundance or shortage of neurons might lead to problems such as under-fitting and over-fitting.

Due to the considerations listed, our methodology aims to minimize those risks by training multiple neural networks of different structures. Prediction models in our study are composed of ANNs with alternate structures:

- Three single-layer neural networks with hidden neuron counts of 8, 20, and 25, respectively.
- A multi-layer neural network with 19 neurons.

The variables listed in Table 2, except for the cycle-time, correspond to input nodes of ANNs. The output is a binary variable that signifies whether the cycle time is high or normal.

4.2.2. Training of Neural Network Models

A series of repetitions were executed with four individual settings that differ by the network structures. The *neuralnet* library (Günther and Fritsch, 2010) in R was utilized for training neural networks that predict high cycle times based on input variables.

The neural networks were trained using 80% of random samples from the original dataset. Consequently, the remaining 20% was used to test the models. The selection of training and test data was randomly held at each iteration, with preserving the balance of the percentage of high cycle times both in training and test data.

4.2.3. Testing and Comparing Predictive Models

The predictive power of machine learning models is often measured using specific measures such as accuracy, precision, recall (Géron, 2019:88-92). Accordingly, our results involved the comparison of prediction models in terms of those measures.

The predictive models are compared with respect to the following measures (Equations 2-4).

$$Accuracy = \frac{True\ Positives + True\ Negatives}{Positives + Negatives} \quad (2)$$

$$Recall = \frac{True\ Positives}{True\ Positives + False\ Negatives} \quad (3)$$

$$Precision = \frac{True\ Positives}{True\ Positives + False\ Positives} \quad (4)$$

Accuracy measures the percentage of objects correctly classified, while recall corresponds to the completeness of positive classification, and precision explains what percentage of tuples labeled as positive are actually positive (Han et al., 2012:365,368).

5. FINDINGS

The average prediction results over 100 repetitions are cumulated in the confusion table demonstrated in Table 6. The classes 0 and 1 correspond to normal and high cycle times, respectively, regarding the cycle-time threshold.

Table 6. Overall predictive performance of trained models (with median-based threshold=325.58)

Network Structure		Confusion Matrices	Performance Metrics (Average)		
Layers	Hidden Neurons		Recall	Precision	Accuracy
1	8	Actual	Predictions		29,25% 38,13% 86,87%
			0 (Normal)	1 (High)	
			285,99	18,03	
			26,87	11,11	
2	(15, 4)	Actual	Predictions		29,74% 38,35% 86,87%
			0 (Normal)	1 (High)	
			285,79	18,18	
			26,72	11,31	
1	20	Actual	Predictions		31,02% 32,04% 87,27%
			0 (Normal)	1 (High)	
			288,45	21,25	
			22,28	10,02	
1	25	Actual	Predictions		29,79% 36,22% 86,42%
			0 (Normal)	1 (High)	
			284,27	19,86	
			26,59	11,28	

According to Table 6, training ANNs with 20 hidden neurons led to the highest average performance. In our results, a high accuracy rate indicates the overall success of predictions; a high recall rate signifies the ability to predict high cycle times; and a high precision implies the exactness of positive predictions. The average accuracy of all trained models is 86.86%, where recall is found 29.95%, and precision is 36.19%. Low recall scores indicated that the models overlooked a significant number of occasions with high cycle times.

Table 7. Overall predictive performance of trained models (with clustering-based threshold=374.00)

Network Structure		Confusion Matrices	Performance Metrics (Average)		
Layers	Hidden Neurons		Recall	Precision	Accuracy
1	8	Actual	Predictions		39,63% 48,47% 92,81%
			0 (Normal)	1 (High)	
			307,89	10,11	
			14,49	9,51	
2	(15, 4)	Actual	Predictions		38,54% 50,11% 92,99%
			0 (Normal)	1 (High)	
			308,79	9,21	
			14,75	9,25	
1	20	Actual	Predictions		40,58% 48,22% 92,77%
			0 (Normal)	1 (High)	
			307,54	10,46	
			14,26	9,74	
1	25	Actual	Predictions		39,17% 46,33% 92,55%
			0 (Normal)	1 (High)	
			307,11	10,89	
			14,6	9,4	

As noted, the predictive models summarized in Table 6 relied on labels (high/normal) obtained by taking the median-based threshold. Alternatively, our methodology involved another approach for threshold

determination with the use of the k-means clustering technique. Accordingly, data was relabeled by comparing each cycle time with this clustering-based threshold of 374.00. Taking this dataset, we iterate the same number of tests with identical network structures. The performance metrics obtained through 100 repetitions are presented in Table 7.

The average accuracy in Table 7 is 92.78%, where average recall and precision scores are 39.48% and 48.22%, respectively. In addition to a noticeable increase in the accuracy, the average recall was found significantly higher when the threshold was set according to the k-means clusters. Moreover, the same conclusion still holds when comparing the ANN structures one at a time. Such difference signals the impact of threshold in model performance.

6. CONCLUSION

Cycle times in manufacturing are among essential indicators that might signal unforeseen stoppages and failures when high cycle times occur. In this regard, predicting high cycle times might be helpful in detection of such incidents, and productivity improvements in a manufacturing plant.

This study addresses a high cycle time prediction problem and proposes an ANN-based high cycle time prediction model with two stages. The first stage involves cycle time threshold determination through statistical and clustering-based methods. The second stage involves ANN-based binary classification for predicting high cycle times. To demonstrate our model, we analyzed molding process data obtained from a wheel rim manufacturer. The dataset involved process-specific attributes collected via sensors, and cycle times recorded.

Our study contributes to prior studies by involving and comparing multiple threshold determination approaches used when labeling high cycle times. Before the tests, we might speculate that a high threshold would label fewer observations with higher delays. Consequently, it should be easier to distinguish those observations since they are more deviated from other data points. Alternate neural network structures were repeatedly trained and tested to predict high cycle times by taking clustering-based and median-based thresholds, which are 374 and 325, respectively. The performance of model structures was evaluated in terms of accuracy, recall, and precision in our findings. We noticed that threshold determination has fundamentally affected the average performance of classifiers in all tested configurations. The results demonstrate that taking the higher threshold obtained through k-means clustering has consistently led to better predictions in terms of accuracy, recall, and precision. Nevertheless, we underline that prediction models with different thresholds might signify delays or problems at different scales. Accordingly, it might still be beneficial to use multiple prediction models to determine the severity of alerts to be raised in real-time monitoring systems.

A limitation for the study was using a dataset that involved process data captured from a single batch. In future studies, the proposed methodology might be further tested with a broader set of attributes for the molding process by virtue of forthcoming sensors. Moreover, the model might be even extended to provide cycle time estimates rather than merely signifying high cycle times. Furthermore, the high cycle time prediction model might be modified for handling real-time data and integrated into decision support models to reinforce online monitoring systems in wheel rim manufacturing.

REFERENCES

- Abiodun, O.I., Jantan, A., Omolara, A.E., Dada, K.V., Mohamed, N.A. and Arshad, H. (2018). "State-of-the-Art in Artificial Neural Network Applications: A Survey", *Heliyon*, 4(11), e00938.
- Asiltürk, I. and Çunkaş, M. (2011). "Modeling and Prediction of Surface Roughness in Turning Operations Using Artificial Neural Network and Multiple Regression Method", *Expert Systems with Applications*, 38(5), 5826-5832.
- Backus, P., Janakiram, M., Mowzoon, S., Runger, C. and Bhargava, A. (2006). "Factory Cycle-Time Prediction with a Data-Mining Approach", *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 19(2), 252-258.
- Bai, Y., Sun, Z., Zeng, B., Long, J., Li, L., De Oliveira, J.V. and Li, C. (2019). "A Comparison of Dimension Reduction Techniques for Support Vector Machine Modeling of Multi-Parameter Manufacturing Quality Prediction", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(5), 2245-2256.
- Chang, P.C., Fan, C.Y. and Wang, Y.W. (2009). "Evolving CBR and Data Segmentation by SOM for Flow Time Prediction in Semiconductor Manufacturing Factory", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 20(4), 421-429.
- Chen, T. (2007). "An Intelligent Hybrid System for Wafer Lot Output Time Prediction", *Advanced Engineering Informatics*, 21(1), 55-65.
- Chen, T. (2015). "Combining Statistical Analysis and Artificial Neural Network for Classifying Jobs and Estimating the Cycle Times in Wafer Fabrication", *Neural Computing and Applications*, 26(1), 223-236.
- Chen, T., Jeang, A. and Wang, Y.C. (2008). "A Hybrid Neural Network and Selective Allowance Approach for Internal Due Date Assignment in a Wafer Fabrication Plant", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36(5-6), 570-581.
- Chen, T., Wu, H.C. and Wang, Y.C. (2009). "Fuzzy-Neural Approaches with Example Post-Classification for Estimating Job Cycle Time in a Wafer Fab", *Applied Soft Computing*, 9(4), 1225-1231.
- Chien, C.F., Hsiao, C.W., Meng, C., Hong, K.T. and Wang, S.T. (2005). "Cycle Time Prediction and Control Based on Production Line Status and Manufacturing Data Mining", *IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing (ISSM 2005)*, San Jose, USA, 327-330.
- Chien, C.F., Hsu, C.Y. and Hsiao, C.W. (2012). "Manufacturing Intelligence to Forecast and Reduce Semiconductor Cycle Time", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(6), 2281-2294.
- Da Costa, D.A., Mcintosh, S., Shang, W., Kulesza, U., Coelho, R. and Hassan, A.E. (2016). "A Framework for Evaluating the Results of the SZZ Approach for Identifying Bug-Introducing Changes", *IEEE Transactions on Software Engineering*, 43(7), 641-657.
- Deuse, J., Wiegand, M. and Weisner, K. (2019). "Continuous Process Monitoring Through Ensemble-Based Anomaly Detection", *Applications in Statistical Computing*, Editors: Bauer N., Ickstadt, K., Lübke, K., Szepannek, G., Trautmann, H., Vichi, M., Springer, Cham.
- Géron, M. (2019). "Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras & Tensorflow", O'Reilly, Canada.
- Goodwin, R., Miller, R., Tuv, E., Borisov, A., Janakiram, M. and Louchheim, S. (2004), "Advancements and Applications of Statistical Learning/Data Mining in Semiconductor Manufacturing", *Intel Technology Journal*, 8(4), 325-336.
- Günther, F. and Fritsch, S. (2010). "Neuralnet: Training of Neural Networks", *The R journal*, 2(1), 30-38.
- Han, J., Kamber, M. and Pei, J. (2012). "Data Mining Concepts and Techniques", Morgan-Knaufmann, USA.
- Herrema, F., Curran, R., Hartjes, S., Ellejmi, M., Bancroft, S. and Schultz, M. (2019). "A Machine Learning Model to Predict Runway Exit at Vienna Airport", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 131, 329-342.
- Jain, A.K., Mao, J. and Mohiuddin, K.M. (1996). "Artificial Neural Networks: A Tutorial", *Computer*, 29(3), 31-44.
- Khan, M., Afaq, S.K., Khan, N.U. and Ahmad, S. (2014). "Cycle Time Reduction in Injection Molding Process by Selection of Robust Cooling Channel Design", *International Scholarly Research Notices*, 2014, 1-9.
- Köksal, G., Batmaz, İ., Testik, M.C. and Güntürkün, F. (2010). "İmalat Sektöründe Kalite İyileştirilmede Veri Madenciliği Tekniklerinin Kullanımı", *Verimlilik Dergisi*, (2), 47-65.
- Kolberg, D. and Zühlke, D. (2015). "Lean Automation Enabled by Industry 4.0 Technologies", *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 1870-1875.
- Kozjek, D., Kralj, D., Butala, P. and Lavrač, N. (2019). "Data Mining for Fault Diagnostics: A Case for Plastic Injection Molding", *Procedia CIRP*, 81, 809-814.
- Leys, C., Ley, C., Klein, O., Bernard, P. and Licata, L. (2013). "Detecting Outliers: Do Not Use Standard Deviation Around the Mean, Use Absolute Deviation Around the Median", *Journal of Experimental Social Psychology*, 49(4), 764-766.

- Lieber, D., Stolpe, M., Konrad, B., Deuse, J. and Morik, K. (2013). "Quality Prediction in Interlinked Manufacturing Processes Based on Supervised & Unsupervised Machine Learning", *Procedia CIRP*, 7, 193-198.
- Little, J.D.C. (1961). "A Proof of the Queueing Formula: $L=\lambda W$ ", *Operations Research*, 9, 383-387.
- Marti-Puig, P., Blanco-M, A., Cárdenas, J.J., Cusidó, J. and Solé-Casals, J. (2018). "Effects of the Pre-Processing Algorithms in Fault Diagnosis of Wind Turbines", *Environmental Modelling & Software*, 110, 119-128.
- Meidan, Y., Lerner, B., Rabinowitz, G. and Hassoun, M. (2011). "Cycle-Time Key Factor Identification and Prediction in Semiconductor Manufacturing Using Machine Learning and Data Mining", *IEEE transactions on semiconductor manufacturing*, 24(2), 237-248.
- Mrugalska, B. and Ahram, T. (2017). "Managing Variations in Process Control: An Overview of Sources and Degradation Methods", *Advances in Ergonomics Modeling, Usability & Special Populations*, 377-387.
- Muhammed, T. and Shaikh, R.A. (2017). "An Analysis of Fault Detection Strategies in Wireless Sensor Networks", *Journal of Network and Computer Applications*, 78, 267-287.
- Noorzaei, J., Hakim, S.J.S., Jaafar, M.S. and Thanoon, W.A.M. (2007). "Development of Artificial Neural Networks for Predicting Concrete Compressive Strength", *International Journal of Engineering and Technology*, 4(2), 141-153.
- Polato, M., Sperduti, A., Burattin, A. and De Leoni, M. (2014). "Data-Aware Remaining Time Prediction of Business Process Instances", *2014 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN 2014)*, Beijing, China, 816-823.
- Quintana, G., Garcia-Romeu, M.L. and Ciurana, J. (2011). "Surface Roughness Monitoring Application Based on Artificial Neural Networks for Ball-End Milling Operations", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 22(4), 607-617.
- Rafiq, M.Y., Bugmann, G. and Easterbrook, D.J. (2001). "Neural Network Design for Engineering Applications", *Computers & Structures*, 79(17), 1541-1552.
- Ramkumar, P.L., Ramesh, A., Alvenkar, P.P. and Patel, N. (2015). "Prediction of Heating Cycle Time in Rotational Moulding", *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 3212-3219.
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P. and Harnisch, M. (2015). "Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries", *Boston Consulting Group*, 9(1), 54-89.
- Rust, K. (2008). "Using Little's Law to Estimate Cycle Time and Cost", *IEEE Winter Simulation Conference (IEEE WSC 2008)*, Florida, USA, December 7–10: 2223-2228.
- Shrouf, F., Ordieres, J. and Miragliotta, G. (2014). "Smart Factories in Industry 4.0: A Review of the Concept and of Energy Management Approached in Production Based on the Internet of Things Paradigm", *21st IEEE International Conference on Industrial Engineering & Engineering Management (IEEM 2014)*, China, 697-701.
- Siller, H., Rodriguez, C.A. and Ahuett, H. (2006). "Cycle Time Prediction in High-Speed Milling Operations for Sculptured Surface Finishing", *Journal of Materials Processing Technology*, 174(1-3), 355–362.
- Singh, A., Thakur, N. and Sharma, A. (2016). "A Review of Supervised Machine Learning Algorithms", *3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development*, March 16-18, 1310-1315.
- Sumathi, S. and Sivanandam, S.N. (2006). "Introduction to Data Mining and Its Applications", Springer, Berlin.
- Van Der Aalst, W. (2011). "Process Mining: Discovery, Conformance and Enhancement of Business Processes", Springer, Heidelberg.
- Wang, G., Ledwoch, A., Hasani, R. M., Grosu, R. and Brintrup, A. (2019). "A Generative Neural Network Model for the Quality Prediction of Work in Progress Products", *Applied Soft Computing*, 85, 105683.
- Wang, J. and Zhang, J. (2016). "Big Data Analytics for Forecasting Cycle Time in Semiconductor Wafer Fabrication System", *International Journal of Production Research*, 54(23), 7231-7244.
- Yarlagadda, P.K. and Khong, C.A.T. (2001). "Development of a Hybrid Neural Network System for Prediction of Process Parameters in Injection Moulding", *Journal of Materials Processing Technology*, 118(1-3), 109-115.
- Yu, J.B. and Xi, L.F. (2009). "A Neural Network Ensemble-Based Model for On-Line Monitoring and Diagnosis of Out-of-Control Signals in Multivariate Manufacturing Processes", *Expert systems with Applications*, 36(1), 909-921.
- Zhang, G., Patuwo, B.E. and Hu, M.Y. (1998). "Forecasting with Artificial Neural Networks: The State of the Art", *International Journal of Forecasting*, 14(1), 35-62.
- Zhou, H. (2013). "Computer Modeling for Injection Molding: Simulation, Optimization, and Control", John Wiley & Sons, Singapore.

RADYO FREKANSI TANIMLAMA (RFID) TEKNOLOJİSİNİN TEDARİK ZİNCİRİ PERFORMANSINA ETKİLERİ: LOJİSTİK ENDÜSTRİSİNDE BİR VAKA ÇALIŞMASI

Gözde YANGINLAR¹, Cihat KÖKSAL²

ÖZET

Amaç: Küresel rekabet ve dinamik pazar koşulları lojistik işletmelerinin operasyonel faaliyetlerinde hızla değişimlerin meydana gelmesine imkân sağlamıştır. Maliyetleri düşürmeyi, ürün ve hizmet süreçlerini yenilemeyi amaç edinen lojistik işletmeleri, tedarik zinciri performansını değerlendirmek için Radyo Frekans Tanımlama (RFID) teknolojisini kapsamlı bir biçimde ele almaya başlamışlardır. Bu çalışmanın amacı, RFID teknolojisinin alt boyutlarının tedarik zinciri performansının üzerindeki etkisini incelemektir.

Yöntem: Araştırmanın evrenini, Uluslararası Nakliyatlar Derneğine (UND) üye olan 85 lojistik işletmesi oluşturmaktadır. Kolayda Örneklem Yöntemi ile 364 lojistik çalışanından anket aracılığıyla veriler toplanmıştır.

Bulgular: Araştırmanın sonucunda RFID'nin teknolojik boyutunun finansal performansı, lojistik performansı ve müşteri hizmetleri performansını pozitif yönde etkilediği tespit edilmiştir. Ayrıca RFID'nin organizasyonel boyutu lojistik performansının ve müşteri hizmetleri performansının artmasına kaynaklık etmektedir. Buna karşın, RFID'nin çevresel boyutu finansal performansı ve müşteri hizmetleri performansı üzerinde negatif bir etkisinin olduğu kanıtlanmıştır.

Özgünlük: RFID teknolojisinin tedarik zincir performansı üzerindeki etkisini inceleyen farklı çalışmalar olmasına karşın, Türk lojistik sektöründe benzer doğrultuda yapılan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışma, bu önemli konudaki boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: RFID, Tedarik Zinciri Performansı, Lojistik.

JEL Kodları: L91, L25, M10.

THE EFFECTS OF RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION (RFID) TECHNOLOGY ON SUPPLY CHAIN PERFORMANCE: A CASE STUDY IN LOGISTICS INDUSTRY

ABSTRACT

Purpose: Global competition and dynamic market conditions have enabled rapid changes in the operational activities of logistics companies. Logistics businesses aiming to reduce costs and renew their product and service processes have begun to comprehensively consider Radio Frequency Identification (RFID) technology to evaluate supply chain performance. The purpose of this study is to examine the effect of RFID technology's sub-dimensions on supply chain performance.

Methodology: The universe of the research consists of 85 logistics companies that are members of the International Transport Association (UND). Data are collected from 364 logistics employees through survey using the Convenience Sampling Method.

Findings: As a result of the research, it was determined that the technological dimension of RFID positively affects financial, logistics and customer service performance. In addition, the organizational dimension of RFID leads to an increase in logistics and customer service performance. In contrast, the environmental dimension of RFID has proven to have a negative impact on financial and customer service performance.

Originality: No study is found that examines the effect of RFID technology on supply chain performance in the Turkish logistics industry. This study aims to fill the gap in this important issue.

Keywords: RFID, Supply Chain Performance, Logistics.

JEL Codes: L91, L25, M10.

¹ Doç. Dr., İstanbul Ticaret Üniversitesi, İşletme Fakültesi, Lojistik Yönetimi Bölümü, gyanginlar@ticaret.edu.tr, ORCID: 0000-0002-3814-2982, (Sorumlu Yazar-Corresponding Author).

² Dr. Öğretim Üyesi, İstanbul Ticaret Üniversitesi, İşletme Fakültesi, Uluslararası Ticaret Bölümü, ckoksal@ticaret.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4621-7697.

1. GİRİŞ

Küresel ekonomik krizin her alanda etkisini göstermeye başladığı günümüzde, işletmelerin bilişim teknolojilerine yönelmeleri önem arz etmektedir. Bu bilişim teknolojilerinden biri olan RFID, tedarik zinciri yönetimi çerçevesinde yer alan birçok işletme tarafından tercih edilmektedir. Ürün yaşam döngüsünün kısalması ve bilgi teknolojisindeki gelişmeler işletmelerin rekabet stratejilerini yeniden gözden geçirmelerine sebebiyet vermiştir. Tedarik zinciri yönetiminde aktif rol oynayan işletmeler (üreticiler, perakendeciler, distribütörler, toptancılar, lojistik hizmet sağlayıcısı gibi) arasında bilgi paylaşımı ve iş birliği bu teknoloji sayesinde ivme kazanmaktadır.

Lojistik sektörü yapı itibarıyla hem teknoloji hem de emek yoğunluğunun fazla olduğu bir sektör olma özelliğiyle dikkat çekmektedir. Lojistik sektörünün etkinliği teknolojik gelişmeleri yakından takip edilmesinin yanı sıra lojistik süreçlerde en uygun yazılımlara ve sistemlere uyum sağlanmasına bağlıdır. Türk lojistik sektörü gelişme potansiyeli yüksek bir sektör olması sebebiyle diğer sektörlerden farklılaşmaktadır. Lojistik sektöründeki gelişmeler RFID teknolojisi açısından fırsat niteliğindedir. Buna karşın, ülkemizde RFID teknolojisinin tedarik zinciri süreçlerinde kullanılması yeterli düzeyde değildir. Ayrıca, lojistik sektöründe yer alan işletmeler, RFID teknolojisine geçiş aşamasında ve tedarik zinciri performanslarını artırmaya yönelik süreçlerde birçok sorunlar ile karşı karşıya kalmaktadır. Bu çerçevede, çalışmada RFID teknolojisinin hangi boyutunun lojistik işletmelerinde daha fazla önem arz ettiği incelenmiştir. RFID teknolojisinin alt boyutları finansal performans, lojistik performans, müşteri hizmetleri performansı ve entegrasyon performansı üzerindeki etkisi analiz edilmiştir.

Günümüzde tedarik zinciri performans ölçümü çerçevesinde RFID teknolojisi ABD, Avrupa ve Asya'daki birçok araştırmacı ve sektör temsilcilerinin ilgisini çeken bir uygulamadır (Soon ve Gutierrez, 2008). RFID uygulamaları tedarik zinciri performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Dağıtım sistemlerinin performansını %33,8 ve stok kullanılabilirliğini %45,6 oranında iyileştirdiği kanıtlanmıştır (Vlachos, 2014). RFID teknolojisi, optimum stok seviyelerini azaltarak (Senauer ve Seltzer, 2010) ve stok hatalarını ortadan kaldırarak envanter yönetiminde verimliliğin artmasında kaldıraç görevi üstlenmektedir (Sari, 2010). Ayrıca bu teknoloji, işletme gelirlerinin artmasına ve genel giderlerin azalmasına imkân sağlamaktadır (Veeramani ve diğerleri, 2008). Gaukler (2010) tedarik zincirinde RFID teknolojisini kâr maksimizasyonu yaratan bir unsur olarak tanımlamaktadır. Venkatesh ve diğerleri (2018) RFID'nin tedarik zinciri performansını geliştirmede büyük bir potansiyele sahip olmasına karşın; teknolojinin halen kitlesel düzeye ulaşmaktan uzak olduğunu vurgulanmaktadır. Chuang ve Shaw (2007), tedarik zincirlerinde RFID entegrasyonuna odaklanmışlardır. RFID uygulamaları "işlevsel RFID entegrasyonu, şirketler arası RFID entegrasyonu ve operasyonel RFID entegrasyonu" olarak üç farklı aşamada irdelenmişlerdir.

Çalışma beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde çalışmanın amacı belirtilmiş ve çalışmanın ele alınmasında etkili olan problemler tanımlanmıştır. İkinci bölümde RFID teknolojisi ve tedarik zinciri yönetimde RFID teknolojisinin önemi ile ilgili kavramsal çerçeve çizilmiştir. 3. bölümde araştırmanın amacı, önemi, yöntemi ve modeli yer alırken, 4. bölümde analiz sonuçları incelenmiştir. 5. bölümde çalışmaya dair sonuç ve değerlendirmeler açıklanmıştır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. RFID Teknolojisi

RFID teknolojisi, II. Dünya Savaşı (1939-1945) sırasında dost ya da düşman uçakları birbirinden ayırt etmek amacıyla ortaya çıkmıştır (Kumari ve diğerleri, 2015). Belirli bir radyo frekansı aralığındaki nesnelere insan müdahalesi veya veri girişi olmaksızın radyo dalgaları aracılığıyla tanımlayan otomatik bir nesne tanımlama teknolojisidir (Muller-Seitz ve diğerleri, 2009). RFID etiketleri genel olarak aktif, yarı pasif ve pasif olarak sınıflandırılmaktadır. Aktif etiketler dâhili güç kaynakları ile karakterize edilirken, pasif etiketlerin kendi dâhili gücü bulunmamakta ve RFID okuyucu(lar) tarafından iletilen sinyallerden güç toplayarak çalışmaktadırlar. Yarı pasif etiketler ise, sıcaklık, nem gibi ortam koşullarında sensör verilerinin kaydedilmesi gibi kritik amaçlar için yeterli dâhili güce sahiptirler (Sundaram ve diğerleri, 2010). RFID etiketlerinde görsel temas olmadan da işlemler yapılabilir. Bu sağladığı avantaj ile RFID etiketi kutulara, kaplara yerleştirilebilir, hayvanlara enjekte edilebilir ve pasaport gibi herhangi bir nesneye gömülebilir (Finkenzeller, 2010).

RFID teknolojisi barkod ile karşılaştırıldığında birçok avantaja sahiptir. Görüş mesafesinde olma zorunluluğu olmadan yüzlerce ürünün tanımlanması çok kısa bir süre zarfında gerçekleşmektedir. Bu özelliği, tedarik zincirinde yer alan ürünlerin takibini ve izlenmesini kolaylaştırmaktadır (Tu ve diğerleri, 2018). RFID'de özel şifreleme ve tanımlama kodunun bulunması güvenliği de büyük oranda artırmaktadır. Bu teknoloji, israfı bertaraf ederek ve iş gücü maliyetlerini azaltarak verimliliğin artmasına imkân sağlamaktadır. RFID'nin iş gücü tasarrufu sağlamada ve hata oranının azaltılmasında doğrudan faydaları

bulunmaktadır. Ayrıca stok dışı ürünlerin azalmasına (Szmerekovsky ve Zhang, 2008), teslim süresinin kısalmasına, operasyonel maliyetlerin düşmesine (Lee ve diğerleri, 2011) ve işletmelerin tedarik zinciri performanslarının artmasına yardımcı olmaktadır. RFID teknolojisinde yaygın olarak kullanılmasının önündeki en büyük engel yüksek sabit maliyetlerin olması ve yatırımın geri dönüşünün uzun sürede gerçekleşmesidir (Ruiz-Garcia ve Lunadei, 2011). Bunun yanı sıra kusurlu ürünlerin fiziksel akışı ve bilgi akışı arasındaki uyumsuzluklardan kaynaklanan envanter hataları ile karşı karşıya kalılabilmektedir (Sana, 2011). Buna rağmen, RFID teknolojisi birçok sektörde giderek daha fazla popülerlik kazanmaktadır (Realini ve Marcos, 2014).

RFID teknolojisi, üç boyut altında "Teknolojik boyut, organizasyonel boyut ve çevresel boyut" incelenerek ele alınmaktadır: Bu boyutlar, yeni teknolojinin uygulanmasında içsel ve dışsal değişkenleri incelemek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır (Aboelmaged, 2014; De Mattos ve Laurindo, 2017). Teknoloji boyutu, yeni teknolojinin benimsenmesini etkileyebilecek teknolojik uygulamaları ve yapıyı temsil etmektedir. Organizasyonel boyut, örgütsel direnç, kapasite, yapı, iletişim ve karar verme gibi yeni teknolojilerin benimsenmesini etkileyebilecek örgütsel konuları ortaya koymaktadır. Çevresel boyut ise rekabet, belirsizlik ve dış paydaşların rolü gibi çevresel güçlerin potansiyel etkisini göstermektedir (Aboelmaged, 2014). RFID'nin teknolojik boyutu, tedarik zinciri boyunca çok yüksek düzeyde bilgi doğruluğu ve gerçek zamanlı görünürlük sağlamanın yanı sıra, kağıt tabanlı sistemlerin neden olduğu hatayı ortadan kaldırarak güvenilirliği artırmaktadır. RFID, bir kez kurulduktan sonra önemli maliyet tasarrufları sağlayabilmektedir. Yine de RFID'nin zayıf yönleri de bulunmaktadır. Bazen RFID'den veri üretimi mükemmel değildir ve "kirli veri" olarak adlandırılan probleme neden olmaktadır. Bu sorunlar, gereksiz veri öğelerini filtrelemek için ara katman yazılımının uygulanmasıyla çözülebilmektedir. RFID etiketlerinin bilgisayar korsanlarından veya rakiplerden gelen saldırılara karşı bağışıklıkları yeterince güçlü değildir (Cao ve diğerleri, 2014).

RFID'nin organizasyonel özellikleri özellikle yeni teknolojilerin adaptasyon sürecinde etkili olmaktadır (Tornatzky ve Klein, 1982). Grover ve Goslar'a (1993) göre organizasyonel boyut büyüdükçe işletmeler, daha fazla sermayeye ve kurumsal bir yapıya bunun yanı sıra riski üstlenebilecek daha fazla kapasiteye sahip olacaktır. Bunlar da yeni teknolojinin benimsenmesini teşvik edecektir. Organizasyonel kapasite, bir örgütün kaynakları, yetenekleri ve nitelikleri ile ilgili çok boyutlu bir kavramdır (Riley ve diğerleri, 2003). Yeni teknolojilerin uygulanmasında örgütün değişikliklere uyum sağlama özelliği, bilgi ve deneyimden yararlanma düzeyi adaptasyon sürecini büyük oranda kolaylaştırmaktadır (Mete ve Belgin, 2021). Uygun organizasyonel kapasiteye sahip olmayan işletmelerin Ar-Ge'ye yatırım yapmaya istekli olmadıkları belirlenmiştir. Ayrıca yüksek vasıflı çalışanları işe almaya veya elde tutmaya çalışmadıkları gözlenmektedir (Mete ve Dağdeviren, 2017).

Çevresel boyut, işletmenin endüstrisini, rakiplerini, başkaları tarafından sağlanan kaynaklara erişimini ve düzenleyici faktörlerini ifade etmektedir (Tornatzky ve Fleischer, 1990). Devlet desteği, devletin mali yardımlarını, çalışanların eğitim planını ve politik istikrarı içermektedir. İşletmeler RFID teknolojisine geçmeden önce teşvikler ve sübvansiyonlar gibi çeşitli destekler almayı beklemektedir. Devlet tarafından desteklenen RFID kullanımı, uygulama planının devamını sağlayarak şirketlerin üzerindeki mali baskının azalmasına kaynaklık etmektedir (Hossain ve Quaddus, 2010). İşletmeler RFID konusunda uzmanlaşmış çalışanlardan yoksun olabilir ancak RFID konusunda danışmanlardan ya da uzman kuruluşlardan destek alabilir. Tedarikçiler ise donanım ve yazılım desteği, teknik destek, eğitim ve atölye çalışmaları gibi destekler sunabilir (Thong ve diğerleri, 1996). Ayrıca yasal düzenlemeler bu yeni inovatif teknolojilerin kaderini belirleyebilecek önemli bir çevresel boyutu yansıtmaktadır.

2.2. RFID Teknolojisinin Tedarik Zincirinde Kullanımı

Tedarik zinciri yönetimi, ham maddenin tedarik aşamasından başlayarak, üretim tesislerine getirilmesi, üretimin yapılması, tüketiciye ulaştırılması hatta geri dönüşüm, iade, bakım-onarım işlemlerini de kapsayan bir süreçtir (Nebol, 2013). Tedarik zinciri yönetiminde ürünlere değer katmak ve en kısa zamanda, uygun nitelikte ve istenilen miktarda rekabetçi bir maliyet anlayışıyla lojistik operasyon süreçlerinin işlev kazandırılması amaçlanmaktadır (Güleş ve diğerleri, 2010).

RFID teknolojisi, otomatik eş zamanlı tedarik zinciri görünürlüğü sağlayarak tedarik zinciri yönetiminde devrim yaratmıştır. Tedarik zinciri geliştikçe rekabetin boyutu değişmiştir. İşletme ile rakip işletmeler arasında değil işletmenin yer aldığı tedarik zinciri ile rakip işletmelerin tedarik zincirleri arasında rekabet mücadelesinin olduğu görüşü yaygınlaşmıştır. Rekabet avantajı elde etmek isteyen işletmeler yalnızca satın alma ve lojistik faaliyetlerini yeniden gözden geçirmekle yetinmemekte aynı zamanda RFID gibi bilişim teknolojilerine yatırım yapmayı da temel ilke edinmişlerdir (Yangınlar, 2020). Wal-Mart, Metro Group ve diğer büyük perakendeciler, tedarik zinciri performansını artırmak amacıyla tedarikçilerin RFID teknolojisini benimsemelerini zorunlu kılmıştır (Leung ve diğerleri, 2014). Toyota Güney Afrika'daki, Nissan ve Chevrolet

Tablo 1. Tedarik zincirinde RFID teknolojisi ile ilgili çalışmalar

<i>Çalışma</i>	<i>Türü</i>	<i>Sonuç</i>	<i>RFID Boyutu</i>
Doerr ve diğerleri (2006)	Ampirik	RFID teknolojisinin işletmelere sağlayacağı avantajları tespit etmek amacıyla Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi ile Monte-Carlo simülasyonunu birleştirmişlerdir. Bu teknolojinin sahaya sürülmesinin maliyet ve fayda analizini yapmışlardır.	Teknoloji
Lefebvre ve diğerleri (2006)	Ampirik	Belirli bir tedarik zincirinin deposunda RFID dağıtımını analiz etmek için bir pilot çalışma geliştirmişlerdir. RFID teknolojisinin mevcut süreçleri iyileştirebildiği, yeni bir iş modeli sağlayabileceği ve tedarik zinciri aktörleri arasındaki iletişimi artırabileceği öne sürmektedirler.	Organizasyonel
Chao ve diğerleri (2007)	Teorik	1991-2005 yılları arasında yayınlanan RFID teknolojisini ele alan çalışmalar incelenmiştir. Tedarik zincirinde RFID teknolojisine yönelen işletmelerin uluslararası pazara ulaşabilirliği artırdığını ileri sürmektedir.	Teknoloji
Uckun ve diğerleri (2007)	Ampirik	Bir tedarikçi ve bir perakendeci içeren iki seviyeli bir tedarik zincirinde RFID teknolojilerinin dağıtımını incelemek için bir analitik model geliştirmişlerdir.	Organizasyonel
Dolgui ve Proth (2008)	Teorik	Envanter yönetimi çerçevesinde RFID teknolojilerinin avantajlarına odaklanmışlardır. Ayrıca, RFID teknolojilerinin gizlilik ve kimlik doğrulama özellikleri ile ilgili bazı sorunları tespit etmişler ve geleceğe yönelik perspektifleri ele almışlardır.	Teknoloji
Ustundag ve Tanyaş (2009)	Ampirik	Tedarik zincirinin her bir üyesinin RFID entegrasyonundan eşit olarak yararlanmadığını ve perakendecinin en yüksek maliyet tasarrufuna sahip olduğunu beyan etmişlerdir. Artan tedarik süresinin perakendecinin toplam tedarik zinciri maliyet tasarrufunu azalttığını kanıtlamışlardır.	Organizasyonel
Wang ve diğerleri (2010)	Ampirik	Tayvan'da 113 üreticiyle yapılan çalışmaya göre RFID boyutlarından çevresel boyut altında yer alan müşteri baskıları ve organizasyonel boyut altında yer alan bilgi yoğunluğu faktörleri etkili bulunmuştur.	Çevresel & Organizasyonel
Sarac ve diğerleri (2010)	Teorik	1959 ile 2009 tarihleri arasında yayınlanan RFID teknolojisini inceleyen 142 makale ele alınarak, literatür taraması gerçekleştirilmiştir. RFID teknolojisinin tedarik zincirinde yarattığı envanter yanlışlığı, kamçı etkisi ve yetersiz yenileme sorunlarına dikkat çekilmiştir.	Organizasyonel
Ko ve diğerleri (2011)	Ampirik	Tedarik zinciri yönetiminde verimliliği artırmak amacıyla bir ürün arama algoritması geliştirmişlerdir.	Teknoloji
Leung ve diğerleri (2014)	Teorik	Tedarik zinciri içerisinde yer alan işletmelerin RFID teknolojisine adaptasyon süreçlerini detaylı bir şekilde irdelemişlerdir.	Organizasyonel
Shin ve Ekşioğlu (2015)	Ampirik	Tedarik zincirinde RFID'yi benimseyen perakendecilerin iş gücü verimliliğinin rakiplerine göre daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır.	Çevre
Chong ve diğerleri (2015)	Ampirik	Nesnelerin interneti teknolojisi (IoT) olan RFID'nin sağlık tedarik zinciri yönetimi performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir.	Teknoloji
Cui ve diğerleri (2017)	Ampirik	Tedarik zincirinde envanter hatalarını azaltmada RFID teknolojisinin önemine vurgu yapmışlardır. RFID yatırım etkinliğini dikkate alınarak, tedarik zinciri senaryoları analitik modeller ile analiz edilmiştir.	Teknoloji
Tsao ve diğerleri (2017)	Ampirik	Dağıtım merkezlerinin sayısını, her dağıtım merkezi için ikmal döngü süresini ve tedarik zincirindeki RFID yatırım seviyesini belirlemek amacıyla bir optimizasyon yöntemi geliştirmişlerdir. RFID teknolojisinin tam zamanlı üretim yapan işletmelerde verimliliği artırdığını kanıtlamışlardır.	Organizasyonel
Tu ve diğerleri (2018)	Ampirik	RFID etiket hasarını tespit etmek ve RFID etiketinin tedarik zincirindeki ilişkili nesnesinden ayrılmasına yardımcı olan bir araç geliştirmişlerdir.	Teknoloji
Yoon ve diğerleri (2020)	Ampirik	Kore'de akıllı tarım uygulamalarında RFID kullanımının teknolojik, çevresel ve organizasyonel boyutlarının tamamında verimliliği olumlu etkilediği sonucuna varmışlardır.	Teknoloji & Organizasyonel & Çevre
Mabad ve diğerleri (2021)	Ampirik	Avustralya'da inşaat sektörü üzerinde yapılan çalışmaya göre RFID, karar verme sürecinde üç boyutuyla da verimliliğe pozitif etkide bulunmuştur.	Teknoloji & Organizasyonel & Çevre

Amerika'daki, Volkswagen Almanya'daki merkezlerinde bitmiş araçların takibini RFID teknolojisiyle gerçekleştirmektedir.

Boeing uçak parçalarının bakım geçmişini RFID teknolojisi üzerinden kontrol etmektedir. Ford Motor üretim tesislerinde RFID teknolojisiyle iş gücü verimliliği artarken, Gap İngiltere'deki merkezinde bu teknoloji ile tekstil ürünlerinin envanter maliyetlerini minimize etme şansını yakalamıştır (Castro ve Wamba, 2007). Gıda sektöründe ise, RFID yalnızca güvenli gıda ürünlerine yönelik ihtiyaç ve talebi karşılamakla kalmayıp, aynı zamanda gıda israfını da azaltmaktadır (Bibi ve diğerleri, 2017). Wilding ve Delgado (2004) çalışmalarında, Marks and Spencer, Scottish Courage ve Wal-Mart'taki depolarda veya dağıtım merkezlerinde RFID uygulamalarının tedarik zinciri performansı üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Banks ve diğerleri (2007) çalışmalarında, sağlık sektöründe RFID teknolojisi ile bilgi akışlarının doğruluğunun arttığını (hasta geçmişi, tedavi kayıtları vb.) ve daha iyi envanter yönetimine (ilaç çarşafı, yataklar vb.) ulaşıldığını ileri sürmektedir.

Yapılan literatür taramasında, tedarik zinciri yönetiminde RFID uygulamalarına ilişkin çalışmaların son yıllarda artış gösterdiği Tablo 1'de görülmektedir. Ayrıca önceki çalışmalarda RFID boyutlarından birine yönelik çalışmalar mevcutken, son yıllarda RFID'nin tüm boyutlarıyla ele alındığı çalışmalara daha fazla rastlanmaktadır.

Tedarik zincirlerinde RFID ile ilgili mevcut çalışmalar envanter yönetimi, lojistik ve nakliye, montaj ve imalat, nesnelerin takibi ve konumu, çevre sensörleri vb. konularına odaklanmaktadır (Gaukler ve Seifert, 2007). Gunesekekan ve Ngai (2005) RFID teknolojisinin verimliliği ve siparişlerin doğruluğunu artıran en önemli lojistik bilişim sistemlerinden biri olduğunu belirtmektedir. Lin ve Lin (2007), tedarik zincirinde yer alan işletmelerin RFID sistemlerini benimsemeye uygun olup olmadıklarına karar vermelerine yardımcı olmak için analitik hiyerarşi süreç yöntemini uygulamışlardır. Bibi ve diğerleri (2017), RFID'nin yalnızca güvenli gıda ürünlerine yönelik ihtiyaç ve talebimizi karşılamakla kalmayıp, aynı zamanda gıda israfını da azaltabileceğini belirtmişlerdir. Sundaram ve diğerleri (2010), RFID uygulamalarında kullanılan bilgi tabanlı bir Web hizmeti sisteminin, tedarik zinciri yönetiminde yer alan geleneksel entegre sistemlerden daha tutarlı ve üretken olduğunu analitik bir yaklaşım ile değerlendirmişlerdir.

2.3. Tedarik Zinciri Performansı

Küreselleşmenin etkisiyle artan rekabet ortamında, tedarik zinciri performansı birçok sektörde en önemli konulardan biri haline gelmiştir. RFID teknolojileri aracılığıyla ürünlerin izlenebilirliğini ve tüm tedarik zinciri boyunca görünürlüğün artması tedarik zinciri performansının iyileşmesine imkân sağlamaktadır (Whitaker ve diğerleri, 2007). Bu teknoloji sayesinde uluslararası pazarlarda faaliyet gösteren işletmelerin lojistik operasyonel süreçleri hızlanmakta ve etkili bir envanter yönetimi işlev kazanmaktadır (Chow ve diğerleri, 2006).

Verimliliğin artmasında ve müşteri memnuniyetinin sağlanmasında, tedarik zincirinin performans ölçütleri önem arz etmektedir (Feng ve diğerleri, 2018). Literatürde, tedarik zinciri performansı birçok araştırmacı tarafından farklı yöntemlerle ve başlıklar altında ölçülmeye çalışılmıştır. Chan (2003) tedarik zinciri performans ölçütlerini kantitatif ve kalitatif değişkenler olarak iki başlıkta kategorize etmiştir. Kantitatif değişkenler olarak üretim, dağıtım, depolama, stok maliyetleri ve kaynak kullanımı ele alınırken; kalitatif değişkenlerde ise kalite, esneklik, görünürlük, güven ve yenilikçilik incelenmiştir. Bilgi paylaşımının eş zamanlı olarak tedarik zinciri içerisinde yapılmasının görünürlüğü artırdığına işaret etmektedir. Tao (2009) tedarik zinciri performans ölçüğünü müşteri memnuniyet performansı, bilgi paylaşım performansı, lojistik performans ve finansal performans başlıklarında incelemişlerdir. Müşteri memnuniyet performansı siparişlerin tamamlanma oranları açısından; bilgi paylaşım performansında ise bilgi aktarımının doğruluğu, bilgi maliyeti, bilginin kullanım oranı olarak değerlendirilmiştir. Lojistik performans başlığı altında taşıma esnasında yaşanan kayıp oranları, depoların kullanım oranları, stok devir hızı sınıflandırılırken; finansal performans başlığı altında kâr artış oranı, net değer getiri oranı olarak ele alınmıştır.

Gandi ve diğerleri (2017) tedarik zinciri performans kriterlerini nicel ve nitel olmak üzere kategorize etmiştir. Maliyet ve kâr nicel kriterler, müşteri memnuniyeti, tedarikçi performansı, malzeme ve bilgi akışı ise nitel kriterler olarak adlandırılmıştır. Tedarik zinciri performans ölçütlerini Bulsara ve diğerleri (2014) "bilgi teknolojisi, yenilik, esneklik, kaynak kullanımı, çıktı"; Neely (2007) ise tedarik zinciri performanslarını "hız, kalite, maliyetler, esneklik ve güvenilirlik" başlıkları altında ele almışlardır. Maestrini ve diğerleri (2017) tedarik zinciri performans ölçüm sistemlerine ilişkin literatür taramasını akademik disiplin ve dergi bazında sınıflandırmışlardır. Chand ve diğerleri (2020) ise, tedarik zinciri performansını "müşteri ihtiyaçlarını karşılamadaki esneklik, müşteri tarafından algılanan değer, tedarik zincirinin işletme maliyetleri, çalışan verimliliği, ürün ve hizmet çeşitliliği" başlıklarında değerlendirmişlerdir. Govindan ve diğerleri (2017), gıda endüstrisinde tedarik zinciri performansını değerlendirmek için hibrit bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Murphy

ve Poist (2000), lojistik hizmet kapasitesinin tedarik zinciri performansının artmasında etkili bir unsur olduğunun altını çizmektedir.

Tedarik zinciri performansı genel olarak dört alt başlıkta incelenmektedir: Finansal performans, lojistik performans, müşteri hizmetleri performansı ve entegrasyon performansıdır. Tedarik zinciri yönetiminin bir organizasyonun finansal performansını etkileyebileceği üç temel alan bulunmaktadır. Bunlar kârlılık, likidite, üretkenlik veya varlık kullanımınıdır (Christopher, 1998). Yatırımın geri dönüş hızı, bir işletmenin finansal performansında en etkili gösterge olarak önerilmektedir (Frischia ve diğerleri, 2004). Stank ve diğerleri (2002) ve Lin (2006), nihai müşterilerin ihtiyaçlarına daha iyi hizmet verebilmek için tüm tedarik zinciri ortaklarının lojistik süreçlerinin birbirine entegre etmenin önemini vurgulamaktadır. Tedarik zinciri performansı içerisinde yer alan lojistik performans, taşıma kayıp oranı, taşıma tam yük oranı, stok devir hızı, stok kapasitesi, stok doğruluğu ve depoların kullanım oranı gibi indikatörler kullanılarak ölçülmektedir (Tao, 2009; Askariyazad ve Wanous, 2009; Yazgan ve Yıldız, 2017).

Tedarik zincirinde yer alan süreçler birbirlerine bağımlıdır; bir faaliyet başarısız olursa, zincir bozulur, düşük performans yaratır ve diğer alanlardaki iş yükünü dengeleştirir, böylece tedarik zincirinin etkinliğini tehlikeye atar. Daha yüksek hizmet seviyesi sağlamak için gereksiz bir maliyet yüküne maruz kalmadan tedarik zinciri boyunca tüm faaliyetlerin dengede olması temel esastır. Maliyet ve hizmet arasında gerekli dengeyi sağlamak, tedarik zinciri iletişim becerisi ile doğrudan ilişkilidir. Müşteri hizmetleri performansının yüksek olması tedarik zinciri boyunca etkili bir iletişim ağına sahip olmakla mümkündür (Stevens, 1989).

Entegrasyon performansı ise tedarik zincirindeki işletmelerin verdikleri sözlere bağlı kalmalarını, birbirleriyle sıkı ilişkiler içinde bulunmalarını temsil etmektedir. Tedarik zincirinde yer alan aktörlerin birbirleriyle bilgi paylaşımına istekli bulunmaları ve paylaşımlarının yüksek seviyede olması önem arz etmektedir. Tedarik zincirinde entegrasyon performansının yüksek olması, işletmelerin stratejik iş birliğine dayalı doğru tedarik zinciri ilişkileri kurmalarına kaynaklık etmesinin yanı sıra doğru ve kaliteli bilgi akışı sağlamaktadır (Li ve Lin, 2006). Tedarik zincirinde entegrasyon sağlanması, güvene dayalı ilişkiler üreterek bilgi paylaşımını geliştirir. Taraflar arasında derinleşen güvene dayalı ilişkiler, tedarik zinciri ortakları arasındaki sözleşme süresini uzatır ve potansiyel çatışmaların çözümünü teşvik eder. Tedarik zincirinde yer alan işletmelerin daha esnek bir yapıya sahip olmasına imkân sağlar ve aidiyet duygusunu geliştirerek bilgi akışını hızlandırır (Koçoğlu ve diğerleri, 2011).

3. HİPOTEZ GELİŞTİRME ve ARAŞTIRMA MODELİ

RFID teknolojisinin alt boyutları olan teknolojik, organizasyonel ve çevresel boyutların tedarik zincirinin alt boyutları olan finansal performans, lojistik performans, müşteri hizmetleri performansı ve entegrasyon performansı çerçevesinde nasıl bir ilişki içinde oldukları literatürde çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur. Bu bölümde, RFID teknolojisinin alt boyutlarıyla tedarik zinciri alt boyutlarının arasındaki ilişkilerin incelendiği çalışmalar ve sonrasında geliştirilecek olan hipotezlere yer verilmiştir. Sonrasında oluşturulan hipotezler ışığında araştırma modeli ortaya konacak ve araştırma yöntemi açıklanacaktır.

3.1. RFID Teknolojisi ile Finansal Performans Arasındaki İlişki

Şirketlerin en önemli amaçlarından birisi finansal göstergelerinin istenilen doğrultuda iyileştirilmesi ve bunun sürdürülebilir olarak sağlanmasıdır. Green ve diğerleri (2009) 129 firma verilerini kullanarak yaptıkları çalışmada RFID kullanımının tedarik zinciri verimliliğini ve organizasyonel performansını artırdığını ve dolaylı olarak da finansal performansını artırdığını ortaya koymuşlardır. Chang (2011) 62 üretim firmasının 2003-2005 yılları arasındaki verilerini kullanarak yaptığı çalışmada RFID kullanımının özellikle talep dalgalanmalarının fazla olduğu sektörlerde kârlılığa daha fazla katkı yaptığını öne sürmektedirler. Shin ve Eksioğlu (2014) ABD perakende sektörü üzerinde yaptıkları çalışmada, ABD perakende sektöründe RFID'nin kullanılmasının ürünlerin stokta kalma gün sayısını azalttığını kanıtlamışlardır. Ancak kârlılığa ve çalışan başına verimliliğe katkıda bulunup bulunmadığını tespit edebilmek için daha fazla zamana ihtiyaç olduğunu belirtmektedir. Tüm bu çalışmalar ışığında H_1 hipotezi geliştirilmiştir.

H_1 : RFID teknolojisinin alt boyutlarının finansal performans üzerinde etkisi vardır.

3.2. RFID Teknolojisi ile Lojistik Performansı Arasındaki İlişki

Lojistik performansı tedarik zinciri yönetimi içerisinde en önemli boyutlardan birisini oluşturmaktadır. RFID teknolojisi kullanımının lojistik performansı nasıl etkilediğiyle ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Lin ve Hon (2009) Çin'de bulunan 574 lojistik firmasıyla yaptıkları çalışmada lojistik şirketlerinin RFID teknolojisini depo verimliliğini artırdığını ve stokların eş zamanlı olarak takibine imkân sağladığını belirtmektedir. Ayrıca lojistik hizmet sağlayıcıları için RFID teknolojisini benimseme isteği ile tedarik zinciri performansı arasında pozitif bir ilişkinin varlığını tespit etmişlerdir. Nikoličić ve diğerleri (2015) Sırbistan'ın ilk on ticaret işletmesinde RFID uygulamalarının lojistik performansı üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Çalışmaya göre RFID teknolojisiyle mal giriş ve çıkışların, personel takibinin yapılmasının maliyetlerin düşmesine ve

iş verimliliğinin artması kaynaklık etmiştir. Ayrıca, paketler üzerinde RFID etiketlerinin kullanılması, işlem maliyetlerini %26 ve toplam aktif süreyi %9 oranında azaltmıştır. Tüm bu çalışmalar ışığında H₂ hipotezi geliştirilmiştir.

H₂: RFID teknolojisinin alt boyutlarının lojistik performans üzerinde etkisi vardır.

3.3. RFID Teknolojisi ile Müşteri Hizmetleri Performansı Arasındaki İlişki

RFID teknolojisi hizmet kalitesi, müşteri tarafından algılanan değer, müşteri sadakati ve müşteri memnuniyeti gibi birçok unsuru doğrudan etkileyen bir özelliğe sahiptir. Jaska ve diğerleri (2010) çalışmalarında hizmet sektöründe yer alan işletmelerin RFID teknolojisine geçtikten sonra müşteri hizmetleri performansında nasıl bir değişimin meydana geldiğini analiz etmişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre hizmet sektöründe RFID kullanımı doğruluk, verimlilik ve esneklik sağlamaktadır. Hizmet organizasyonlarında iş süreçleri karmaşık formdan basit forma dönüşmektedir. Bir bütün olarak RFID, iş süreçlerini hızlandırarak iş performansını iyileştirmiş ve müşteri hizmetleri performansını bütünsel olarak olumlu etkilemiştir. Sari (2010) RFID teknolojisi ile üretim kapasitesi artarken aynı zamanda daha yüksek müşteri hizmeti seviyesine ulaşıldığını vurgulamaktadır. Buna karşın üretim kapasitesinde bir azalma olduğunda müşteri hizmeti seviyesinin önemli ölçüde değişmediğini tespit etmiştir. Bu çalışmalar çerçevesinde H₃ hipotezi geliştirilmiştir.

H₃: RFID teknolojisinin alt boyutlarının müşteri hizmetleri performansı üzerinde etkisi vardır.

3.4. RFID Teknolojisi ile Entegrasyon Performansı Arasındaki İlişki

Entegrasyon performansı, işletmenin iş ortaklarıyla kurdukları ilişkinin iletişim, teknik uyum, altyapı ve güven gibi farklı alanlarda yüksek kalitede gerçekleşmesini ifade etmektedir. Bu açıdan ERP (Kurumsal Kaynak Planlaması) sistemi gibi bilgi paylaşım sistemlerinin odak noktası kurum içi verimsizlikleri azaltmaktan, organizasyonlar arası iş süreçlerinin entegrasyonunu ve koordinasyonunu desteklemeye doğru evrilmiştir (Gattiker ve Goodhue, 2005). Sari (2010) çalışmasında, RFID entegrasyonu ile tedarik zincirlerinde yer alan aktörler arasındaki iş birliğinin yoğun olmasının verimlilik artışına kaynaklık ettiği belirtilmiştir. Wamba (2012) çalışmasında, RFID'nin tedarik zincirinde bilgiye eş zamanlı olarak ulaşılmasına imkân sağlamanın yanı sıra doğruluk oranlarının arttığına vurgu yapmaktadır.

Bu çalışmalar çerçevesinde H₄ hipotezi geliştirilmiştir.

H₄: RFID teknolojisinin alt boyutlarının entegrasyon performansı üzerinde etkisi vardır.

3.5. Çalışmanın Modeli

Bu araştırmanın amacı, RFID teknolojisinin ile tedarik zinciri performansı üzerindeki etkisini ortaya koymaktır. Araştırma kapsamında Türk lojistik sektöründe RFID'nin teknolojik, çevresel, organizasyonel boyutlarının tedarik zinciri performansı üzerindeki etkisinin analiz edilmesi hedeflenmiştir. İstanbul ilinde faaliyet gösteren UND'ye (Uluslararası Nakliyatlar Derneği) üye olan 296 lojistik işletmesi yer almaktadır. Bu çalışmada UND'ye üye olan İstanbul ilinde faaliyet gösteren 85 lojistik işletmesine 3 Mart - 3 Haziran 2021 tarihleri arasında online olarak anketler uygulanmıştır. Tedarik zinciri süreçlerinde RFID teknolojisi kullanımı hakkında bilgi sahibi olan lojistik işletmeler örneklemde yer almaktadır. Özellikle gıda lojistiği, otomotiv lojistiği, fuar lojistiği, canlı hayvan taşımacılığı, tekstil lojistiği ve sağlık lojistiği gibi sektörel bazda tedarik zinciri çözümleri sunan işletmeler tercih edilmiştir.

Evren tahmini için sapma miktarı $d=0,05$ güven düzeyi $(1-\alpha)=0,95$ olarak belirlenmiştir. Örneklem büyüklüğü için en büyük varyans verecek şekilde p değeri 0.5 olarak ele alınmış ve $q=(1-p)=0,5$ hesaplanmıştır. Güven değerine karşılık gelen t değeri 1.96'dır. Evren büyüklüğü 5000 lojistik çalışanı olarak ele alınmıştır. Bu evren büyüklüğünde %95 güven düzeyi ve %5 tolerans düzeyinde 356 katılımcı ile anket çalışması yapılması yeterli olmaktadır. Çalışmada 364 lojistik çalışanına anket yapılmıştır. Anket formlarının uygulandığı lojistik işletmelerin küçük, orta ve büyük ölçekli olması örneklem evreninin temsil yeteneğini güçlendirmektedir. Bu lojistik işletmeler ağırlıklı olarak orta ve büyük ölçeklidir. Çünkü küçük lojistik işletmelerde sermaye yetersizliği sebebiyle RFID teknolojisinin kullanılabilirlik düzeyi düşüktür. Örneklemde yer alan lojistik işletmelerin %40'ı RFID teknolojisini etkin bir şekilde tedarik zinciri süreçlerinde kullanmaktadır. İlk önce araştırmada uygulanan anketin geçerli ve araştırmanın amacına uygun olduğunu test etmek amacıyla, 30 lojistik personeline pilot anket çalışması yapılmıştır. Ön çalışmadan elde edilen bilgiler ışığında anket formuna son şekli verilmiştir.

Araştırmada veri toplama aracı olarak demografik sorulardan ve beş'li likert tipi ölçeklendirme (1=Kesinlikle Katılmıyorum, 5= Kesinlikle Katılıyorum) yöntemiyle hazırlanan RFID ve tedarik zinciri performansı ölçeklerinden oluşan anket formu kullanılmıştır. Anket formunun birinci bölümünde demografik özelliklere ilişkin beş ifade, ikinci bölümünde RFID ile ilgili on bir ifade, tedarik zinciri performansı ile ilgili on dört ifade olmak üzere toplamda otuz soru yer almaktadır. Toplanan veriler SPSS (Statistical Package for

Social Sciences) programına aktarılmıştır. Anket verilerinin en iyi şekilde analiz edilmesinde SPSS programı kullanılmaktadır (Alchemer, 2021). Bu sebeple bu araştırmada SPSS programı anket verilerinin analizi için tercih edilmiştir.

Tablo 2. Değişkenler ve ölçekleri

<i>Değişkenler</i>	<i>Sorular</i>	<i>Ölçeklerin Kriterleri</i>
Teknolojik Boyutu	3 soru	Uygunluk ve karmaşıklık düzeyi Ulaşılabilirlik
Organizasyonel Boyutu	4 soru	Kurumsal destek Kalite İnsan kaynakları
Çevresel Boyutu	4 soru	Devlet desteği Müşteri baskıları Yasal baskılar
<i>Tedarik Zinciri Performansı Ölçeği</i>		
Finansal Performans	4 soru	Kâr artış oranı Net değer getiri oranı Sermayenin sürdürülebilirliği ve artış oranı
Lojistik Performans	3 soru	Taşıma kayıp oranı Taşıma tam yük oranı Stok devir hızı Stok kapasitesi Stok doğruluğu Depoların kullanım oranı
Müşteri Hizmetleri Performansı	3 soru	Zamanında teslim oranı Sipariş birikme oranı Siparişlerin tamamlanma oranı Müşteri memnuniyeti
Entegrasyon Performansı	4 soru	Tedarik zincirinde işbirliği Bilginin zamanında iletilmesi Tedarik zincirinde güven Aktarılan bilgi doğruluğu Tedarikçilerle entegrasyon seviyesi

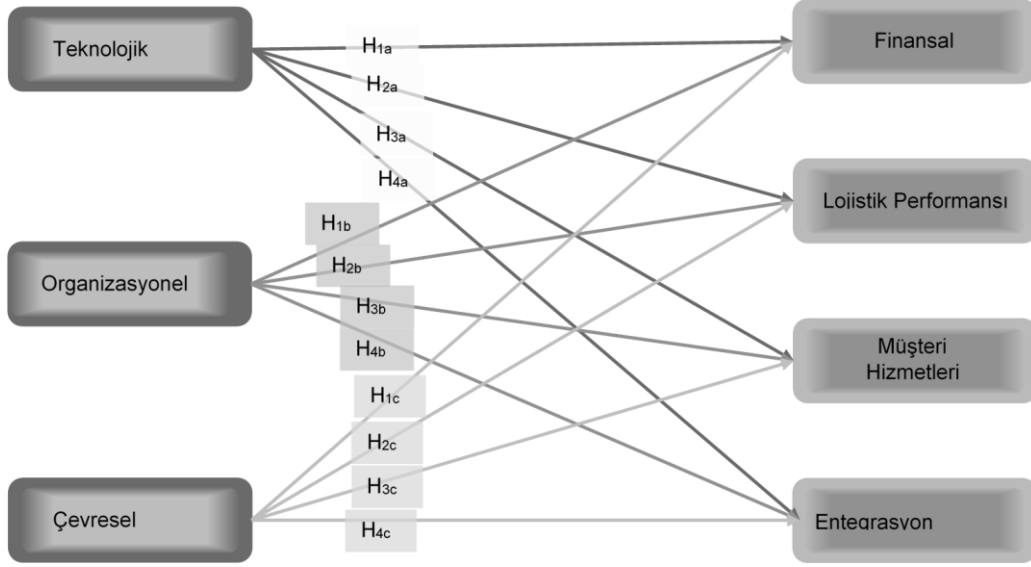
Araştırmanın amacı çerçevesinde araştırmanın modeli (Şekil 1) ve hipotezleri aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

H₁: RFID teknolojisinin alt boyutlarının finansal performans üzerinde etkisi vardır.

H₂: RFID teknolojisinin alt boyutlarının lojistik performans üzerinde etkisi vardır.

H₃: RFID teknolojisinin alt boyutlarının müşteri hizmetleri performansı üzerinde etkisi vardır.

H₄: RFID teknolojisinin alt boyutlarının entegrasyon performansı üzerinde etkisi vardır.



Şekil 1. Araştırmanın modeli

4. BULGULAR

4.1. Demografik Özellikleri Göre Bulgular

Çalışmaya katılan lojistik personelin cinsiyet, yaş, eğitim düzeyi, unvanı ve işletmedeki çalışma süresine ait frekans dağılımları ve % değerleri Tablo 3'te sunulmaktadır.

Tablo 3. Lojistik sektör çalışanlarının demografik özelliklerinin frekans dağılımı

	Frekans	Yüzde
<i>Cinsiyet</i>		
Kadın	177	48,6
Erkek	187	51,4
Toplam	364	100,0
<i>Yaş</i>		
18-25	101	27,7
26-35	102	28,0
36-45	81	22,3
46-55	51	14,0
56 ve üzeri	29	8,0
Toplam	364	100,0
<i>İşletmedeki statünüz</i>		
Alt düzey yönetici	168	46,2
Orta düzey yönetici	123	33,8
Üst düzey yönetici	73	20,1
Toplam	364	100,0
<i>Öğrenim Durumu</i>		
İlköğretim	24	6,6
Lise	102	28
Lisans	135	37,1
Yüksek lisans	103	28,3
Toplam	364	100,0
<i>Çalışma Süreleri</i>		
1 yıldan az	53	14,6
1-2 yıl	81	22,3
3-5 yıl	106	29,1
6-10 yıl	71	19,5
11-15 yıl	40	11,0
15 yıldan fazla	13	3,6
Toplam	364	100,0

Örnekleme yer alan lojistik sektör çalışanlarının demografik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Cinsiyet değişkenine göre katılımcıların %48,6’sının kadın ve %51,4’ünün erkek olduğu görülmektedir. Yaş değişkenine göre, katılımcıların çoğunlukla 18-25 ve 26-35 yaşları arasındaki iş görenlerden oluştuğu belirlenmiştir. Araştırmada yer alan çalışanların büyük bir çoğunluğunun üniversite mezunu ve alt düzey yönetici olduğu tespit edilmiştir. İş görenlerin işletmedeki görev sürelerinin ağırlıklı olarak 3-5 yıl olduğu ve 15 yıldan fazla görev alan tecrübeli işgören oranının düşük seviyeler olduğu (%3,6) görülmektedir.

4.2. Değişkenlere Ait Tanımlayıcı İstatistikler ve Faktör Analizi

Saha araştırmasında kullanılan anket literatürde yer alan ölçeklerden faydalanılarak oluşturulmuştur. Kullanılan ölçeklerin güvenilirliğini incelemek amacıyla Cronbach’s Alpha analizi uygulanmıştır. Gerçekleştirilmiş olan tüm anket soruları ile yapılan güvenilirlik analizi sonucuna göre güvenilirlik katsayısı $\alpha = 0,793$ olarak belirlenmiş ve ölçeğin güvenilir olduğu tespit edilmiştir. RFID ölçeğinin güvenilirlik katsayısı; $\alpha = 0,618$, tedarik zinciri performansı ölçeğinin güvenilirlik katsayısı 0,862 olarak bulunmuştur.

Tablo 4. RFID değişkenine ait faktör analizi

	Faktör Yüğü	(%) Varyans Hesaplanması	Kaiser-Meyer-Olkin Testi	CR	AVE
<i>RFID 1: Teknoloji Boyutu</i>					
RFID teknolojisini anlamak kolaydır.	0,844				
RFID teknolojisini öğrenmek için çok fazla deneyim gerekmemektedir.	0,832	63,009	0,636	0,835	0,630
RFID teknoloji ile ilgili kitaplara ve diğer kaynaklara ulaşmak kolaydır.	0,698				
<i>RFID 2: Organizasyonel Boyutu</i>					
Lojistik işletmemiz çalışanlarına RFID teknolojisini öğrenmek için destek vermektedir.	0,838				
Lojistik işletmemizde çalışanlar problem çözmek için bilgisayar kullanabilme yeteneğine sahiptir.	0,769				
Lojistik işletmemizin yöneticileri çalışanlarına yeni bir problem ile karşılaştıklarında yardım etmektedir.	0,705				
Lojistik işletmemizde çalışanlar RFID teknolojisini kolaylıkla öğrenebilmektedir.	0,665	55,807	0,701	0,833	0,558
<i>RFID 3: Çevresel Boyutu</i>					
Devlet lojistik becerileri ile ilgili insan gücü eğitimlerine yardım etmektedir.	0,856				
Devlet lojistik teknolojileri ile ilgili proje önerileri için işletmeleri teşvik etmektedir.	0,806				
Devlet lojistik endüstrisi için gerekli düzenlemelere çözüm üretmektedir.	0,785				
Devlet lojistik teknolojilerinin gelişimi için finansal destek sağlamaktadır.	0,736	63,458	0,705	0,874	0,635

Tablo 5. Tedarik zinciri performansı değişkenine ait faktör analizi

	Faktör Yüğü	(%) Varyans Hesaplanması	Kaiser-Meyer-Olkin Testi	CR	AVE
Finansal Performans					
Bilgi maliyetimiz tedarik zinciri yönetimi ile azaltmaktadır.	0,818	56,469	0,680	0,837	0,565
Dağıtım maliyetlerimizi tedarik zinciri yönetimi ile azaltmaktadır.	0,807				
Stok maliyetlerimizi tedarik zinciri yönetimi ile azaltmaktadır.	0,736				
Taşıma kayıplarımızı tedarik zinciri yönetimi ile azaltmaktadır.	0,631				
Lojistik Performans					
Lojistik işletmemizde stok devir hızlarımız yüksektir.	0,862	65,883	0,654	0,852	0,658
Lojistik işletmemizde stoklarımızdaki tüm ham madde, malzeme ve ürünlerimizi tam olarak bilinmektedir.	0,823				
Lojistik işletmemizin depo kullanım oranları yüksektir.	0,745				
Müşteri Hizmetleri Performansı					
Lojistik işletmemiz siparişlerimiz geciktirmeden teslim etmektedir.	0,932	81,405	0,718	0,929	0,814
Lojistik işletmemiz siparişleri tam olarak karşılayabilmektedir.	0,903				
Lojistik işletmemizde siparişlerimiz birikmemektedir.	0,871				
Entegrasyon Performansı					
Tedarik zincirimizdeki işletmeler bir makinanın çarkları gibi çalışır.	0,871	68,611	0,786	0,896	0,685
Tedarik zincirimizdeki işletmeler bilgi paylaşımına isteklidir.	0,858				
Tedarik zincirimizdeki firmalar arasında bilgi paylaşımı yüksek seviyededir.	0,841				
Tedarik zincirimizdeki firmalar arasında aktarılan bilgiler doğrudur.	0,735				

Çalışmada birleşme geçerliliği analizi kullanılarak anket sorularında yer alan bir maddenin benzer yapıları ne kadar iyi ölçtüğü belirlenmiştir (Hair ve diğerleri 2016). Birleşme geçerlilik analizi çerçevesinde, faktör yükleri ve açıklanan ortalama varyans (AVE) değerlendirilmektedir. Anket formunda yer alan RFID ve tedarik zinciri performans ölçeklerinin nasıl bir faktör yapısına sahip oldukları incelenmiştir. Araştırmada kullanılan ölçeklerin geçerliliğini ve temel faktörlerin neler olduğunu belirlemek amacıyla çok sık tercih edilen Varimax tekniği ile faktör analizi uygulanmıştır. Verilerin faktör analizi için uygunluğu Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) katsayısı ve Bartlett Sphericity testi ile değerlendirilmiştir. KMO'nun 1'e yaklaştıkça mükemmel 0,50'nin altında ise kabul edilemez (0,90'larda mükemmel, 0,80'lerde çok iyi, 0,70'lerde iyi, 0,60'larda vasat, 0,50'lerde kötü) olduğu belirtilmektedir (Tavşancıl, 2006). AVE değerinin de 0,50'den büyük olması gerekmektedir (Hair ve diğerleri 2016).

Faktör analizi sonuçlarına göre, RFID ölçeği 11 maddeli üç boyutlu, tedarik zinciri performansı 14 maddeli dört boyutlu bir yapı teşkil etmektedir. RFID ve tedarik zinciri performansı faktör yüklerinin 0,80 ve yukarı olduğu önermelerin çok iyi seviyede, faktör yüklerinin 0,70 ile 0,80 arasında yer aldığı önermelerin ise iyi seviyede olduğu tespit edilmiştir. Bartlett Testi sonucunda dağılımın normal dağılıma yakın olduğu ve verilerin faktör analizi için uygun olduğu görülmektedir. RFID ve tedarik zinciri performans ölçeğinin faktör yüklerinin ağırlıklı olarak çok iyi düzeyde olduğu tespit edilmiştir. Bartlett testi sonucunda ortaya çıkan değer 0,005'den küçük olduğu için örneklemelerin anlamlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 6. Tanımlayıcı istatistikler

RFID Boyutları	N	Ortalama	Ortalamanın Std.	
			Hatası	Sapma
Teknolojik	364	3,4991	0,03065	0,58472
Organizasyonel	364	4,3661	0,02706	0,51635
Çevresel	364	2,9547	0,04978	0,94967

Tablo 6'deki lojistik işletmelerinin RFID teknolojisi algılarıyla ilgili tanımlayıcı istatistikler yer almaktadır. Lojistik işletmelerin RFID algılarında, organizasyonel ortalamalarının 4'ün üzerinde olduğu görülmektedir. Çevre ortalamasının düşük seviyelerde olduğu ve standart sapmasının 1'e yakın olduğu tespit edilmiştir.

4.3. Araştırmanın Hipotez Testleri ve Bulguları

RFID'nin alt boyutlarının, tedarik zinciri performans alt boyutları üzerindeki etkisini belirlemeye yönelik regresyon analizi yapılmıştır.

Tablo 7. RFID alt boyutlarının finansal performans üzerindeki etkisine ilişkin bulgular

Model	Standardize Edilmemiş Katsayı		Standardize Edilmiş Katsayı		t	Anlamlılık
	B	Standart Hata	Beta			
(Sabit)	4,246	0,334			12,706	0,000
Teknolojik	-0,133	0,056	-0,124		-2,363	0,019
Organizasyonel	0,050	0,066	0,041		0,766	0,444
Çevresel	0,050	0,036	0,075		1,396	0,164

Bağımlı Değişken: Finansal Performans, F=2,902; R=0,154; R²=0,024

Tablo 7'ye göre regresyon analizi sonucunda RFID'nin alt boyutlarının finansal performans üzerindeki etkisi görülmektedir. Standardize edilmiş Beta katsayısına göre, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerinde etkisindeki önem sırası teknolojik, çevresel, organizasyonel şeklinde sıralanmaktadır. RFID'nin teknolojik alt boyutu ile finansal performans arasında negatif yönlü ve anlamlı ilişki belirlenmiştir. RFID'nin teknolojik, organizasyonel, çevresel boyutlarının finansal performans üzerindeki etkisini gösteren regresyon oranı 0,154'dür. Bu üç bağımsız değişken, bağımlı değişkendeki değişimlerin %2,4'ünü açıklamaktadır. H_{1a}, H_{1b}, H_{1c} reddedilmiştir.

Tablo 8'deki bağımsız değişkenler ile bağımlı değişken lojistik performansın oluşturduğu modelin bir bütün olarak anlamlı olduğu (F=17,884, p<0,000) tespit edilmiştir. RFID alt faktörleri lojistik performans etkisinin %13'ünü tanımlayabilmektedir. Çoklu doğrusal regresyon analizi sonuçları incelendiğinde, RFID'nin organizasyonel boyutu ($\beta=-0,170$) ile lojistik performans arasında negatif yönlü ve anlamlı ilişki göstermektedir. RFID'nin teknolojik ve çevresel alt boyutları ise pozitif ve anlamlı bir ilişkiyi açıklayabilme düzeyine sahiptir. Bu bilgiler ışığında; H_{2a} ve H_{2c} hipotezlerinin desteklendiği sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 8. RFID alt boyutlarının lojistik performans üzerindeki etkisine ilişkin bulgular

Model	Standardize Edilmemiş Katsayı		Standardize Edilmiş Katsayı		t	Anlamlılık
	B	Standart Hata	Beta			
(Sabit)	3,202	0,374			8,551	0,000
Teknolojik	0,419	0,063	0,327		6,635	0,000
Organizasyonel	-0,246	0,073	-0,170		-3,357	0,001
Çevresel	0,086	0,040	0,109		2,160	0,031

Bağımlı Değişken: Lojistik Performans, F=17,884; R=0,360; R²= 0,130

Tablo 9. RFID alt boyutlarının müşteri hizmetleri performansı üzerindeki etkisine ilişkin bulgular

Model	Standardize Edilmemiş Katsayı		Standardize Edilmiş Katsayı	t	Anlamlılık
	B	Standart Hata	Beta		
(Sabit)	4,168	0,386		10,796	0,000
Teknolojik	0,155	0,065	0,124	2,385	0,018
Organizasyonel	-0,198	0,076	-0,140	-2,618	0,009
Çevresel	0,049	0,041	0,064	1,197	0,232

Bağımlı Değişken: Müşteri Hizmetleri Performansı, F=3,973; R=0,179; R²=0,032

Tablo 9'daki veriler ışığında, RFID'nin teknolojik alt boyutu ($\beta=0,124$) ile müşteri hizmetleri performansı arasında pozitif ve anlamlı bir ilişki, organizasyonel alt boyutu ($\beta=-0,140$) ile negatif ve anlamlı bir ilişki tespit edilmiştir. Teknolojik ($p=0,018$) ve organizasyonel ($p=0,009$) boyutların müşteri hizmetleri performansını etkilediği sonucuna ulaşılmıştır. Bu etki teknolojik boyutta pozitif, organizasyonel boyutta ise negatif olarak gerçekleşmiştir. RFID alt faktörlerindeki değişimin %3,2'si müşteri hizmetleri performansı ile açıklanmaktadır. RFID alt faktörlerindeki her 1 birimlik değişim müşteri hizmetleri performansında %17'lik bir değişim meydana getirmektedir. Çoklu regresyon analizi sonucuna göre; H_{3a} hipotezi desteklenirken, H_{3b} ve H_{3c} hipotezleri desteklenmemektedir.

Tablo 10. RFID alt boyutlarının entegrasyon performansı üzerindeki etkisine ilişkin bulgular

Model	Standardize Edilmemiş Katsayı		Standardize Edilmiş Katsayı	t	Anlamlılık
	B	Standart Hata	Beta		
(Sabit)	3,644	0,391		9,312	0,000
Teknolojik	0,013	0,066	0,010	0,200	0,841
Organizasyonel	-0,112	0,077	-0,076	-1,460	0,145
Çevresel	0,232	0,042	0,290	5,580	0,000

Bağımlı Değişken: Entegrasyon Performansı, F=10,390; R=0,282; R²=0,080

Tablo 10'a göre standardize edilmiş Beta katsayısına göre, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerinde etkisindeki önem sırası çevresel ($\beta=0,290$), organizasyonel ($\beta=-0,076$), teknolojik ($\beta=0,010$) şeklinde sıralanmaktadır. Bağımlı değişkenler ile bağımsız değişken entegrasyon performansı oluşturduğu modelin bir bütün olarak anlamlı olduğu (F=10,390, $p<0,000$) tespit edilmiştir. RFID alt faktörleri entegrasyon performansının etkisinin %8'ini tanımlayabilmektedir. RFID'nin sadece çevresel boyutu entegrasyon performansını pozitif yönde etkilediği tespit edilmiştir. Bu bilgiler ışığında; H_{4c} hipotezi desteklenirken, H_{4a} ve H_{4b} hipotezlerinin reddedildiği sonucuna ulaşılmıştır.

5. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

21. yüzyıl koşullarında, lojistik işletmelerinin uluslararası pazarlarda rekabet avantajı elde etmeleri ve verimliliklerini maksimize edebilmeleri ancak tedarik zincirinin bir parçası olarak tüm paydaşlarla etkin bilgi akışı sağlamalarıyla mümkün olacaktır. Tedarik zinciri yönetimi çerçevesinde tek bir işletme gibi davranarak kaynakları (insan, teknoloji, süreç) etkin bir şekilde kullanarak sinerji yaratılması temel esastır. Son yıllarda RFID teknolojisi ile geleneksel tedarik zinciri stratejilerinin yerini iş birlikçi tedarik zinciri stratejisinin aldığı görülmektedir.

Bu çalışmanın amacı, lojistik sektörlerinde RFID uygulamalarının tedarik zinciri performansı üzerindeki etkisini analiz etmektir. Araştırmanın sonucunda lojistik sektöründe, RFID uygulamalarının organizasyonel boyutunun teknolojik ve çevresel boyutuna göre daha fazla önemsendiği tespit edilmiştir. Örnekleme yer alan lojistik işletmelerinde RFID teknolojisinin çalışanlar tarafından öğrenilmesi için destek verildiği ve yöneticilerin çalışanlarına yeni bir problem ile karşılaştıklarında yardım ettikleri saptanmıştır. Buna karşın, özellikle devletin RFID teknolojisinin gelişimi için yeterli finansal destek sağlamadığını ve lojistik işletmelerini yeterli düzeyde teşvik etmedikleri ileri sürülmektedir. RFID teknolojisinin teknolojik boyutu lojistik ve müşteri hizmetleri performansını artırdığı saptanmıştır. Çevresel boyutu ise lojistik ve entegrasyonel performanslarını pozitif yönde etkilediği belirlenmiştir.

Büyüme potansiyeli yüksek olan ve bilişim altyapı sistemlerine son yıllara daha fazla ağırlık veren lojistik sektörü yerli ve yabancı yatırımcıların ilgi odağı haline gelmiştir. Son yıllarda RFID teknolojisinin kullanımı önemli ölçüde artış göstermiştir, özellikle lojistik sektöründe ürünlerin tanımlanması, takibi ve sevkiyatı süreçlerinde daha etkinleştiği görülmektedir. Araştırmanın gerek sektör temsilcilerine gerekse akademik çalışmalara katkı sağlamasının yanı sıra lojistik sektöründe RFID teknolojisinin yaygınlaşmasında ve tedarik zinciri performansının etkili bir şekilde ölçülmesinde rehber niteliği taşıması

hedeflenmektedir. Lojistik sektöründe de kullanılan RFID, lojistik operasyonel süreçlerin geliştirilmesinde ve yönetsel sorunların çözülmesinde anahtar bir rol üstlenmektedir. RFID, müşterilere optimum maliyetle doğru miktarlarda, doğru lokasyonlara ve doğru zamanda ürün ve hizmetleri ulaştırmak için en uygun stratejileri sunmaktadır. Lojistik operasyon sürecinde RFID teknolojisinin tercih edilmesi ile konteyner hareketlerinin eş zamanlı olarak takip edilmesi ve gelen konteynerler için boş alanların otomatik olarak tahsis edilmesi mümkün hale gelmiştir. Lojistik çalışanlarının müşterilerin talep ettiği konteynerleri bulmak için navigasyon yerine kablosuz el cihazlarını kullanmaları, müşterilerin isteklerini yerine getirmek için gereken süreyi önemli ölçüde azaltmıştır. Bu sayede, RFID uygulamaları lojistik maliyetlerin azalmasına, siparişlerin karşılanma oranının artmasına, zamanında teslimatın yapılmasına imkân sağlamaktadır. Ayrıca, verimsiz işlemleri ortadan kaldırmakta ve çalışanlar arasındaki koordinasyonu iyileştirmektedir.

Literatürde çalışmamızı destekleyen birçok makale yer almaktadır. Chang (2011), RFID teknolojisinin benimsenmesinin işletmenin finansal performansını pozitif yönde etkilediğini ortaya koymuştur. Bu teknoloji, satış verimliliğinin artmasına ve envanter maliyetlerinin azalmasına kaynaklık etmektedir. Bottani ve Rizzi (2008), tedarik zincirinde yer alan işletmelerin RFID teknolojisini benimsemelerinin lojistik performansına nasıl bir etki sağladığını analiz etmişlerdir. Delen ve diğerleri (2007), RFID teknolojilerinin tedarik zinciri yönetimi üzerindeki etkilerini analiz etmek için bir vaka çalışması yürütmüşler ve perakende sektöründe RFID teknolojilerinin tüm tedarik zincirinin performansını iyileştirebileceğini belirtmişlerdir. Condea ve diğerleri (2012), RFID tabanlı politikaların maliyet verimliliğini ve hizmet seviyelerini iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu savunmuşlardır.

Çalışmanın kısıtı, İstanbul ilinde faaliyet gösteren lojistik işletmeleri ile sınırlı kalmasıdır. Bu nedenle Türkiye'deki tüm lojistik sektörü için bir genelleme yapılması mümkün değildir; fakat tesadüfi olarak seçilen daha geniş bir örnek hacmiyle daha genel sonuçlar elde edilebilmesi muhtemeldir. Gelecek çalışmalarda tedarik zinciri içerisinde yer alan işletmelerde (tedarikçiler, üreticiler, perakendeciler, distribütörler, toptancılar vb.) RFID teknolojisinin benimsenmesinin önündeki engellerin belirlenmesine yönelik Yapısal Eşitlik Modeli ile analizlerin yapılması planlanmaktadır.

KAYNAKÇA

- AboelImaged, M.G. (2014). "Predicting E-readiness at Firm-Level: An Analysis of Technological, Organizational and Environmental (TOE) Effects on E-Maintenance Readiness in Manufacturing Firms", *International Journal of Information Management*, 34(5), 639-651.
- Alchemer, (2021). "What is SPSS and How Does it Benefit Survey Data Analysis", <https://www.alchemer.com/resources/blog/what-is-spss/>, (Erişim tarihi: 11.12.2021).
- Askariyazad, M. ve Wanous, M. (2009). "A Proposed Value Model for Prioritising Supply Chain Performance Measures", *International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling*, 1(2-3), 115-128.
- Banks, J., Hanny, D., Pachano, M.A. ve Thompson, L.G. (2007). "RFID Applied", John Wiley & Sons, Inc.
- Bibi, F., Guillaume, C., Gontard, N. ve Sorli, B. (2017). "A Review: RFID Technology Having Sensing Aptitudes for Food Industry and Their Contribution to Tracking and Monitoring of Food Products", *Trends in Food Science & Technology*, 62, 91-103.
- Bottani, E. ve Rizzi, A. (2008). "Economical Assessment of the Impact of RFID Technology and EPC System on the Fast-Moving Consumer Goods Supply Chain", *International Journal of Production Economics*, 112, 548-569.
- Bulsara, H.P., Qureshi, M.N. ve Patel, H. (2014). "Supply Chain Performance Measurement an Exploratory Study", *International Journal of Logistics System Management*, 18(2), 231.
- Cao, Q., Jones, D.R. ve Sheng, H. (2014). "Contained Nomadic Information Environments: Technology, Organization, and Environment Influences on Adoption of Hospital RFID Patient Tracking", *Information & Management*, 51(2), 225-239.
- Castro, L. ve Wamba, S.F. (2007). "An Inside Look at RFID Technology", *Journal of Technology Management & Innovation*, 2(1), 128-141.
- Chan, F.T.S. (2003). "Performance Measurement in a Supply Chain", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 21(7), 534-548.
- Chand, P., Thakkar, J.J. ve Ghosh, K.K. (2020). "Analysis of Supply Chain Performance Metrics for Indian Mining Earthmoving Equipment Manufacturing Companies Using Hybrid MCDM Model", *Resources Policy*, 68, 1-20.
- Chang, Y.B. (2011). "Does RFID Improve Firms' Financial Performance? An Empirical Analysis", *Information Technology Management*, 12, 273-285.
- Chao, C.C., Yang, J.M. ve Jen, W.Y. (2007). "Determining Technology Trends and Forecasts of RFID by a Historical Review and Bibliometric Analysis from 1991 to 2005", *Technovation*, 27, 268-279.
- Chong, A.Y., Liu, M. J., Luo, J. ve Keng-Boon, O. (2015). "Predicting RFID Adoption in Healthcare Supply Chain from the Perspectives of Users", *International Journal of Production Economics*, 159, 66-75.
- Chow, H.K.H., Choy, K.L., Lee, W.B. ve Lau, K.C. (2006). "Design of a RFID Case-Based Resource Management System for Warehouse Operations", *Expert Systems with Applications*, 30, 561-576.
- Christopher, M. (1998). "Logistics and Supply Chain Management: Strategies for Reducing Cost and Improving Service", 2nd ed., Financial Times/Prentice Hall, Harlow, Essex.
- Chuang, M.L. ve Shaw, W.H. (2007). "RFID: Integration Stages in Supply Chain Management", *IEEE Engineering Management Review*, 35(2), 80-87.
- Condea, C., Thiesse, F. ve Fleisch, E. (2012). "RFID-Enabled Shelf Replenishment with Backroom Monitoring in Retail Stores", *Decision Support Systems*, 52(4), 839-849.
- Cui, L., Deng, J., Liu, F., Zhang, Y. ve Xu, M. (2017). "Investigation of RFID Investment in a Single Retailer Two-Supplier Supply Chain with Random Demand to Decrease Inventory Inaccuracy", *Journal of Cleaner Production*, 142, 2028-2044.
- De Mattos, C.A. ve Laurindo, F.J.B. (2017). "Information Technology Adoption and Assimilation: Focus on the Suppliers Portal", *Computers In Industry*, 85, 48-57.
- Delen, D., Hardgrave, B.C. ve Sharda, R. (2007). "RFID for Better Supply-Chain Management Through Enhanced Information Visibility", *Production and Operations Management*, 16(5), 613-624.
- Doerr, K.H., Gates, W.R. ve Mutty, J.E. (2006). "A Hybrid Approach to the Valuation of RFID/MEMS Technology Applied to Ordnance Inventory", *International Journal of Production Economics*, 103, (2), 726-741.
- Dolgui, A. ve Proth, J.M. (2008). "RFID Technology in Supply Chain Management: State of the Art and Perspectives", Proceedings of the 17th World Congress the International Federation of Automatic Control Seoul, Korea, 4465-4475.
- Feng, M., Yu, W., Wang, X., Wong, C.Y., Xu, M. ve Xiao, Z. (2018). "Green Supply Chain Management and Financial Performance: The Mediating Roles of Operational and Environmental Performance", *Business Strategy and the Environment*, 27(7), 811-824.

- Finkenzeller, K. (2010). "RFID Handbook Fundamentals and Applications", John Wiley & Sons Ltd. Publication, Third Editions.
- Frischia, T., O'marah, K. ve Souza, J. (2004). "The AMR Research Supply Chain Top 25 and the New Trillion-Dollar Opportunity", AMR Research Inc., Boston, MA.
- Gandhi, A.V., Shaikh, A. ve Sheorey, P.A. (2017). "Impact of Supply Chain Management Practices on Firm Performance", *International Journal of Retail Distribution Management*, 45(4), 366-384.
- Gattiker, T.F. ve Goodhue, D.L. (2005). "What Happens After ERP Implementation: Understanding the Impact of Interdependence and Differentiation on Plant-Level Outcomes", *MIS Quarterly*, 29(3) 559-85.
- Gaukler, G.M. (2010). "Preventing Avoidable Stockouts: The Impact of Item-Level RFID in Retail", *Journal of Business and Industrial Marketing*, 25(8), 572-581.
- Gaukler, G.M. ve Seifert, R.W. (2007). "Applications of RFID in Supply Chain", Springer Series in Advanced Manufacturing.
- Govindan, K., Mangla, S.K. ve Luthra, S. (2017). "The Management of Operations Prioritising Indicators in Improving Supply Chain Performance Using Fuzzy AHP: Insights from the Case Example of Four Indian Manufacturing Companies", *Production Planning Control*, 7287, 1-22.
- Green J., K.W., Whitten, D. ve Inman, R.A. (2009). "The Impact of RFID Technology Utilisation on Supply Chain Productivity and Organisational Performance", *International Journal of Innovation and Learning*, 6(2), 147-163.
- Grover, V. ve Goslar, M.D. (1993). "The Initiation, Adoption, and Implementation of Telecommunications Technologies in US Organizations", *Journal of Management Information Systems*, 10(1), 141-164.
- Güleş, H.K., Paksoy, T., Bülbül, H. ve Özceylan, E. (2010). "Tedarik Zinciri Yönetimi", Gazi Kitapevi, Ankara.
- Gunasekaran, A. ve Ngai, E.W.T. (2005). "Build-to-Order Supply Chain Management: A Literature Review and Framework for Development", *Journal of Operation Management*, 23, 423-451.
- Hair, J.F., Sarstedt, M., Matthews, L.M. ve Ringle, C.M. (2016). "Identifying and Treating Unobserved Heterogeneity with FIMIX-PLS: Part I-Method", *European Business Review*, 28(1),63-76.
- Hossain, M.A. ve Quaddus, M. (2010). "Impact of External Environmental Factors on RFID", Adoption in Australian Livestock Industry: An Exploratory Study", *PACIS*, 171.
- Ibrahim, I. ve Jaafa, H.S. (2016). "Adopting Environment Management Practices for Environment Sustainability: A Proposed Model for Logistics Companies", *Asian Business Research*, 1(1), 70-74.
- Jaska, P., Johnson, D.B.A., Nalia, J., Reddy, N.V.K. ve Tadisina, R. (2010). "Improved Customer Service Using RFID Technology", *Review of Business Information Systems (RBIS)*, 14(3).
- Jeong, B.K. ve Lu, Y. (2008). "The Impact of Radio Frequency Identification (RFID) Investment Announcements on the Market Value of the Firm", *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research*, 3, 41-54.
- Ko, J.M., Kwak, C., Cho, Y. ve Kim, C.O. (2011). "Adaptive Product Tracking in RFID-Enabled Large-Scale Supply Chain", *Expert Systems with Applications*, 38, 1583-1590.
- Koçoğlu, İ., İmamoglu, S.Z., İnce, H. ve Keskin, H. (2011). "The Effect of Supply Chain Integration on Information Sharing: Enhancing the Supply Chain Performance", *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 24, 1630-1649.
- Kumari, L., Narsaiah, K., Grewal, M.K. ve Anurag, R.K. (2015). "Application of RFID in Agri-Food Sector-A Review", *Trends in Food Science & Technology*, 43(2), 144-161.
- Lee, J., Palekar, U.S. ve Qualls, W. (2011). "Supply Chain Efficiency and Security: Coordinationfor Collaborative Investment in Technology", *European Journal of Operation Research*, 210(3), 568-578.
- Lefebvre, L.A., Lefebvre, E., Bendavid, Y., Wamba, S.F. ve Boeck, H. (2006). "RFID as an Enabler of B-to-B E-Commerce and its Impact on Business Processes: A Pilot Study of a Supply Chain in the Retail Industry", In: Proceedings of the 39th Hawaii International Conference on System Sciences.
- Leung, J., Cheung, W. ve Chu, S. (2014). "Aligning RFID Applications with Supply Chain Strategies", *Information & Management*, 51, 260-269.
- Li, S. ve Lin, B. (2006) "Accessing Information Sharing and Information Quality in Supply Chain Management", *Decision Support Systems*, 42, 1641-1656.
- Lin, C.Y. ve Hon, Y.H. (2009). "RFID Technology Adoption and Supply Chain Performance: A Empirical Study in China's Logistics Industry", *Supply Chain Management: An International Journal*, 14(5), 369-378.
- Lin, K. ve Lin, C. (2007). "Evaluating the Decision to Adopt RFID Systems Using Analytic Hierarchy Process", *The Journal of the American Academy of Business*, Cambridge 11(1), 72-78.
- Lin, C. (2006). "Influencing Factors on the Innovation in Logistics Technologies for Logistics Service Providers in Taiwan", *The Journal of American Academy of Business*, 9(2), 257-63.

- Mabad, T., Ali, O., Ally, M., Wamba, S.F. ve Chan, K.C. (2021). "Making Investment Decisions on RFID Technology: An Evaluation of Key Adoption Factors in Construction Firms", *IEEE Access*, 9, 36937-36954.
- Maestrini, V., Luzzini, D., Maccarrone, P.F. ve Caniato, F. (2017). "Supply Chain Performance Measurement Systems: A Systematic Review and Research Agenda", *International Journal of Production Economics*, 183, 299-315.
- Mete, M.H. ve Belgin, O. (2021). "Impact of Knowledge Management Performance on the Efficiency of R&D Active Firms: Evidence from Turkey", *Journal of the Knowledge Economy*, 1-19.
- Mete, M.H. ve Dağdeviren, M. (2017). "Ar-Ge Merkezleri İçin Bilgi Yönetimi Modellemesi ve Bilgi Yönetiminin Ar-Ge Performansı ile İlişkisi", *Verimlilik Dergisi*, (2), 75-108.
- Muller-Seitz, G., Dautzenberg, K., Creusen, U. ve Stromereder, C. (2009). "Customer Acceptance of RFID Technology: Evidence from the German Electronic Retail Sector", *Journal of Retailing and Consumer Services*, 16(1), 31-39.
- Murphy, P.R. ve Poist, R.F. (2000). "Third-Party Logistics: Some User Versus Provider Perspective", *Journal of Business Logistics*, 21(1), 121-31.
- Nebol, E., Uslu, T. ve Uzel, E. (2013). "Tedarik Zinciri Yönetimi ve Lojistik Yönetimi", Beta Yayıncılık, İstanbul.
- Neely, A. (2007). "Business Performance Measurement. Unifying Theory and Integrating Practice", Cambridge University Press, Cambridge.
- Nikolicic, S., Kilibarda, M., Atanaskovic, P., Dudak, L. ve Ivanisevic, A. (2015). "Impact of RFID Technology on Logistic Process Efficiency in Retail Supply Chains", *Promet-Traffic&Transportation*, 27(2), 137-146.
- Qrunfleh, S. ve Tarafdar, M. (2014). "Supply Chain Information Systems Strategy: Impacts on Supply Chain Performance and Firm Performance", *International Journal of Production Economics*, 147(B), 340-350.
- Realini, C.E. ve Marcos, B. (2014). "Active and Intelligent Packaging Systems for a Modern Society", *Meat Science*, 98(3), 404-419.
- Riley, B.L., Taylor, S.M. ve Elliot, S.J. (2003). "Organizational Capacity and Implementation Change: a Comparative Case Study of Heart Health Promotion in Ontario Public Health Agencies", *Health Education Research*, 18(6), 754-769.
- Ruiz-Garcia, L. ve Lunadei, L. (2011). "The Role of RFID in Agriculture: Applications, Limitations and Challenges", *Computers and Electronics in Agriculture*, 79(1), 42-50.
- Sana, S.S. (2011). "A Production-Inventory Model of Imperfect Quality Products in Athree-Layer Supply Chain", *Decision Support Systems*, 50(2), 539-547.
- Sarac, A., Absi, N. ve Dauzere-Peres, S. (2010). "A Literature Review on the Impact of RFID Technologies on Supply Chain Management", *International Journal of Production Economics*, 128, 77-95.
- Sari, K. (2010). "Exploring the Impacts of Radio Frequency Identification (RFID) Technology on Supply Chain Performance", *European Journal of Operational Research*, 207(1), 174-183.
- Senauer, B. ve Seltzer, J. (2010). "The Changing Face of Food Retailing", *Choices Magazine and the Agricultural and Applied Economics Association*, 25(4), 1-5.
- Shin, S. ve Eksioğlu, B. (2015). "An Empirical Study of RFID Productivity in the U.S. Retail Supply Chain", *International Journal of Production Economics*, 163, 89-96.
- Soon, C.B. ve Gutierrez, J.A. (2008). "Effects of the RFID Mandate on Supply Chain Management", *The Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research* 3(1), 81-91.
- Stank, T.P., Keller, S.B. ve Closs, D.J. (2002). "Performance Benefits of Supply Chain Logistical Integration", *Transportation Journal*, 41(2/3), 32-46.
- Stevens, G.C. (1989). "Integrating the Supply Chain", *International Journal of Physical Distribution & Materials Management*, 19(8), 3-8.
- Sundaram, D., Zhou, W., Piramuthu, S. ve Pienaar, S. (2010). "Knowledge-Based RFID Enabled Web Service Architecture for Supply Chain Management", *Expert Systems with Applications*, 37, 7937-7946.
- Szmerekovsky, J. ve Zhang, J. (2008). "Coordination and Adoption of Item-Level RFID with Vendor Managed Inventory", *International Journal of Production Economics*, 114(1), 388-398.
- Tao, X. (2009). "Performance Evaluation of Supply Chain Based on Fuzzy Matter- Element Theory", *International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*, 26-27 Aralık 2009, Xian, China, 549-552.
- Tavşancıl, E. (2006). "Tutumların Ölçülmesi ve SPSS ile Veri Analizi", Ankara, Nobel Yayın Dağıtım.
- Thong, J.Y., Yap, C.S. ve Raman, K.S. (1996). "Top Management Support, External Expertise and Information Systems Implementation in Small Businesses", *Information Systems Research*, 7(2), 248-267.

- Tornatzky, L.G. ve Fleischer, M. (1990). "The Process of Technological Innovation", Lexington, MA: Lexington Books.
- Tornatzky, L.G. ve Klein, K.J. (1982). "Innovation Characteristics and Innovation Adoption-Implementation: A Meta-Analysis of Findings", *IEEE Transactions on Engineering Management*, (1), 28-45.
- Tsao, Y., Linh, V. ve Lu, J. (2017). "Closed-Loop Supply Chain Network Designs Considering RFID Adoption", *Computers & Industrial Engineering*, 113, 716-726.
- Tu, Y., Zhou, W. ve Piramuthud, S. (2018). "A Novel Means to Address RFID Tag/Item Separation in Supply Chains", *Decision Support Systems*, 115, 13-23.
- Uckun, C., Karaesmen, F. ve Savas, S. (2007). "Optimal Investment Levels to Eliminate Inventory Inaccuracy in a Two-Level Supply Chain", *RFID Eurasia*, 1st Annual, 1-6.
- Ustundag, A. ve Tanyas, M. (2009). The Impacts of Radio Frequency Identification (RFID) Technology on Supply Chain Costs", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(1), 29-38.
- Veeramani, D., Tang, J. ve Alfonso Gutierrez, A. (2008). "A Framework for Assessing the Value of RFID Implementation by Tier-One Suppliers to Major Retailers", *The Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research* 3(1), 55-70.
- Venkatesh, V.G., Zhang, A., Deakins, E., Luthra, S. ve Mangla, S. (2018). "A Fuzzy AHP-TOPSIS Approach to Supply Partner Selection in Continuous Aid Humanitarian Supply Chains", *Annals of Operations Research* 283(1), 1517-1550.
- Vlachos, I.P. (2014). "A Hierarchical Model of the Impact of RFID Practices on Retail Supply Chain Performance", *Expert Systems with Applications*, 41, 5-19.
- Wamba, S.F. (2012). "Achieving Supply Chain Integration Using RFID Technology: The Case of Emerging Intelligent B-to-B E-Commerce Processes in a Living Laboratory", *Business Process Management Journal*, 18(1) 58-81.
- Wang, Y.M., Wang, Y.S. ve Yang, Y.F. (2010). "Understanding the Determinants of RFID Adoption in the Manufacturing Industry", *Technological Forecasting and Social Change*, 77(5), 803-815.
- Whitaker, J., Mithas, S. ve Krishnan, M.S. (2007). "A Field Study of RFID Deployment and Return Expectations", *Production and Operations Management*, 16(5), 599-612.
- Wilding, R. ve Delgado, T. (2004). "RFID Demystified: Part 3, Company Case Studies", *Logistics and Transport Focus*, 6(5), 32-42.
- Yangınlar, G. (2020). "Depo İş Süreçlerinde RFID Teknolojisinin Önemi, Üretim Yönetimi", Ankara, Akademisyen Yayınevi.
- Yazgan, H.İ. ve Yıldız, M.S. (2017). "Bilgi Sistemleri Stratejilerinin Tedarik Zinciri Performansına Etkisi: İhracat Yapan İşletmeler Üzerine Bir Araştırma", *The Journal of International Social Research*, 10(52), 1260-1277.
- Yoon, C., Lim, D. ve Park, C. (2020). "Factors Affecting Adoption of Smart Farms: The Case of Korea", *Computers in Human Behavior*, 108(106309), 1-10.

EK

Tablo A1. Ölçek soruları

Sorular	Kaynak
<i>RFID 1: Teknoloji Boyutu</i> RFID teknolojisini anlamak kolaydır. RFID teknolojisini öğrenmek için çok fazla deneyim gerekmemektedir. RFID teknoloji ile ilgili kitaplara ve diğer kaynaklara ulaşmak kolaydır.	Ibrahim ve Jaafa (2016), Tornatzky ve Fleischer (1990)
<i>RFID 2: Organizasyonel Boyut</i> Lojistik işletmemiz çalışanlarına RFID teknolojisini öğrenmek için destek vermektedir. Lojistik işletmemizde çalışanlar problem çözmek için bilgisayar kullanabilme yeteneğine sahiptir. Lojistik işletmemizin yöneticileri çalışanlarına yeni bir problem ile karşılaştıklarında yardım etmektedir. Lojistik işletmemizde çalışanlar RFID teknolojisini kolaylıkla öğrenebilmektedir.	Ibrahim ve Jaafa (2016), Tornatzky ve Fleischer (1990)
<i>RFID 3: Çevresel Boyut</i> Devlet lojistik becerileri ile ilgili insan gücü eğitimlerine yardım etmektedir. Devlet lojistik teknolojileri ile ilgili proje önerileri için işletmeleri teşvik etmektedir. Devlet lojistik endüstrisi için gerekli düzenlemelere çözüm üretmektedir. Devlet lojistik teknolojilerinin gelişimi için finansal destek sağlamaktadır.	Ibrahim ve Jaafa (2016), Tornatzky ve Fleischer (1990)
<i>Tedarik Zinciri Performans Ölçeği</i> <i>Finansal Performans</i> Bilgi maliyetimiz tedarik zinciri yönetimi ile azaltmaktadır. Dağıtım maliyetlerimizi tedarik zinciri yönetimi ile azaltmaktadır. Stok maliyetlerimizi tedarik zinciri yönetimi ile azaltmaktadır. Taşıma kayıplarımızı tedarik zinciri yönetimi ile azaltmaktadır.	Tao (2009), Yazgan ve Yıldız (2017), Qrunfleh ve Tarafdar (2014), Yazgan ve Yıldız (2017)
<i>Lojistik Performans</i> Lojistik işletmemizde stok devir hızlarımız yüksektir. Lojistik işletmemizde stoklarımızdaki tüm hammadde, malzeme ve ürünlerimizi tam olarak bilinmektedir. Lojistik işletmemizin depo kullanım oranları yüksektir.	Tao (2009), Askariazad ve Wanous (2009), Yazgan ve Yıldız (2017)
<i>Müşteri Hizmetleri Performansı</i> Lojistik işletmemiz siparişlerimiz geciktirmeden teslim etmektedir. Lojistik işletmemiz siparişleri tam olarak karşılayabilmektedir. Lojistik işletmemizde siparişlerimiz birikmemektedir.	Tao (2009), Chan (2003), Yazgan ve Yıldız (2017)
<i>Entegrasyon Performansı</i> Tedarik zincirimizdeki işletmeler bir makinanın çarkları gibi çalışır. Tedarik zincirimizdeki işletmeler bilgi paylaşımına isteklidir. Tedarik zincirimizdeki firmalar arasında bilgi paylaşımı yüksek seviyededir. Tedarik zincirimizdeki firmalar arasında aktarılan bilgiler doğrudur.	Tao (2009), Chan (2003), Yazgan ve Yıldız (2017)

ÜRETİM SİSTEMLERİNDEKİ DİJİTAL DÖNÜŞÜMÜN İŞ ETÜDÜ TEKNİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Aylin ADEM¹, Burcu YILMAZ KAYA², Erman ÇAKIT³, Metin DAĞDEVİREN⁴

ÖZET

Amaç: Endüstri 4.0 ile hızlı bir dijitalleşme süreci emek yoğun işletmeler le birlikte tüm işletmeler için kaçınılmaz olmuştur. Öte yandan geleneksel iş etüdü teknikleri verimlilik ölçüm ve izlemede oldukça kritik bir role sahiptir. Bu çalışmada iş etüdü tekniklerinin dijitalleşme sürecindeki rolü ve değişimine yönelik bir araştırma ve değerlendirme yapılması amaçlanmıştır.

Yöntem: İlgili değerlendirmeyi yapmak için ele alınan tekniklere ilişkin kapsamlı literatür araştırması ve gerçek dünya örneklerinin incelenmesi şeklinde bir yol izlenmiştir.

Bulgular: Dijitalleşen iş süreçleri karşısında iş etüdü tekniklerinin gösterdiği tepki incelendiğinde, geleneksel tekniklerinin bu dönüşüm sürecine büyük oranda adapte olduğu söylenebilir. Endüstri devriminde işletmelerin dijitalleşmesinde kritik rol oynayan yapay zekâ tekniklerinin iş ölçümü tekniklerindeki dijitalleşmeyi de tetiklediği görülmektedir. Dahası, geleneksel iş etüdü tekniklerinin, işletmelerin Endüstri 4.0'a geçiş süreçlerinde ortaya çıkan ihtiyaçlarına yapay zekâ ve Endüstri 4.0 ile birlikte gelen diğer dijital teknikler ile bütünleşerek uyum sağladığı görülmektedir.

Özgünlük: Üretim ortamlarındaki dijital dönüşüm süreçlerinin geleneksel iş etüdü teknikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi, değişimin analiz edilmesi, bununla birlikte ilgili tekniklere yönelik bir gelecek projeksiyonunun sunulması bu çalışmayı özgün kılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: İş Etüdü, Endüstri 4.0, Dijital Dönüşüm, Yapay Zekâ, Süreç Yönetimi.

JEL Kodları: M1, O32, D24, J24.

THE IMPACT OF DIGITAL TRANSFORMATION IN MANUFACTURING SYSTEMS ON WORK-STUDY TECHNIQUES

ABSTRACT

Purpose: With Industry 4.0, a rapid digitalization process has become inevitable for all businesses, including labor-intensive ones. On the other hand, traditional work-study techniques have a critical role in productivity measurement and monitoring. In this study, it is aimed that a research and evaluation study is conducted on the new role of work-study techniques in this digitalization process.

Methodology: In order to make this evaluation, a way of comprehensive literature survey and examination of real-world examples of handled techniques were followed.

Findings: When the response of work study techniques to digitalized business processes is examined, it is possible to say that traditional techniques have largely adapted to this process. It is seen that artificial intelligence techniques, play a critical role in the digitalization of businesses in the industrial revolution, also trigger the digitalization of work measurement techniques. In addition, it is seen that traditional work study techniques adapt to the changing needs of enterprises that arise during the transition to Industry 4.0 by integrating with artificial intelligence and other digital opportunities that come with Industry 4.0.

Originality: Examining the effect of digital transformation processes in production environments on traditional work-study techniques, analyzing the change, and besides this presenting a future projection for the related techniques make this study original.

Keywords: Work Study, Industry 4.0, Digital Transformation, Artificial Intelligence, Process Management.

JEL Codes: M1, O32, D24, J24.

¹ Öğr.Gör.Dr., Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye, aylinadem@gazi.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4820-6684 (Sorumlu Yazar-Corresponding Author).

² Dr.Öğretim Üyesi, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye, burcuyilmaz@gazi.edu.tr, ORCID: 0000-0002-5088-5842.

³ Doç. Dr, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye, ecakit@gazi.edu.tr, ORCID: 0000-0003-0974-5941.

⁴ Prof. Dr., Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye, metindag@gazi.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2121-5978.

1. GİRİŞ

Rekabetin her geçen gün daha da artması işletmeler özelinde her türlü kaynağın en verimli şekilde kullanılmasını bir zorunluluk haline getirmiştir. Bu zorunluluk; verimlilik ölçümlerinin, alınması gereken önlemlerin ve atılması gereken adımların işletmelerde daha da ciddiye alınmasına neden olmuştur. Öte yandan sürekli bir gelişim gösteren teknolojinin de etkisiyle üretim ortamlarında gerek üretim teknolojileri ve kalite kontrol faaliyetleri, gerekse de işletme içindeki organizasyonel ve operasyonel faaliyetlerde önemli değişimler yaşanmıştır. Bu değişimlerin yaşandığı her alanda değişimi yakalamak isteyen işletmeler için verimliliğin ölçülmesi ve izlenmesi de zorunlu hale gelmiştir.

Üretime ait herhangi bir olgunun etkin bir biçimde yönetilebilmesi için, ilgili olgunun ölçülmesi ve sayısal değerlerle ifade edilmesi gerekir. Tipik bir üretim ortamında -emek yoğun bir üretim ortamında- üretim faktörlerine ilişkin verimlilik kalemlerinin (iş gücü verimliliği, makina verimliliği vb.) ölçümü için izlenebilecek birden çok teknik bulunmaktadır (Prokopenko, 2001;47). Ancak ölçülen bu verimlilik değerlerinin anlamlı olması ve dönemsel bazda karşılaştırılabilir olması için üretim ortamında standart bir iş akışının elde edilmiş olması gerekir. Bu noktada Frederic Taylor tarafından ilk kez bilimsel metotların uygulandığı iş etüdü çalışmaları devreye girer. İş etüdü en genel olarak; üretim faktörleri (insan, makine, malzeme, sermaye ve yönetim) arasındaki tüm etkileşimleri verimliliğe dönüştürmeyi hedefleyen, işi yapmanın yeni ve ekonomik yollarını bularak kaliteyi artıran sistematik iş ölçüm teknikleri olarak tanımlanabilir (Kurt ve Dağdeviren, 2020;3). İş etüdü çalışmalarıyla bir işi yapmanın en ekonomik yolunu bulmak, üretime, sürece ya da ürüne doğrudan katkı sağlamayan tüm gereksiz faaliyetleri elimine etmek, üretimde kullanılan her türlü kaynağın kullanım etkinliğinin artırılması ve eğitilmiş bir çalışanın bir işi yapmasının standart zamanını tespit etmek gibi birçoğu doğrudan verimlilikle ilgili olan sonuçların hedeflendiği bilinmektedir (Kurt ve Dağdeviren, 2020; 6).

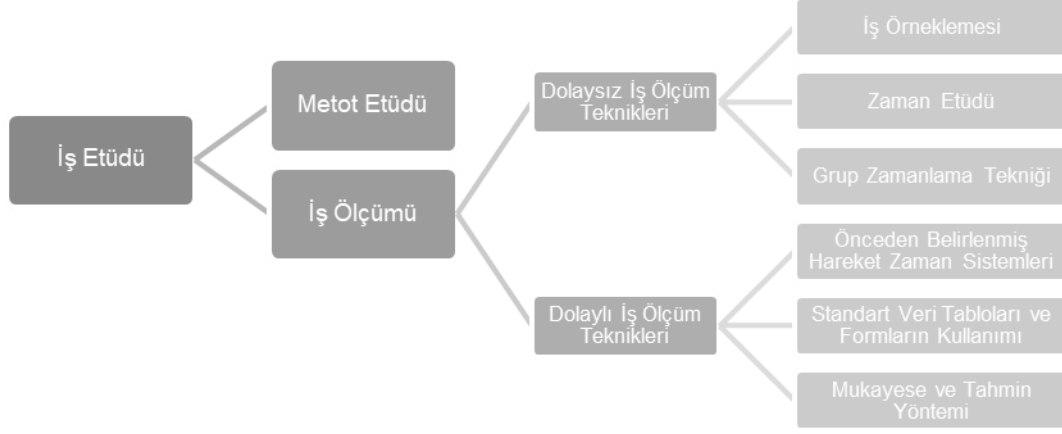
Bu çalışma kapsamında verimlilik kavramı ile iç içe olan iş etüdü çalışmalarının üretim ortamlarında teknolojik gelişmeler ve endüstriyel devrimlerin de etkisiyle yeni konununun ne olduğu/olacağı, iş etüdü çalışmalarının teknolojik gelişmelerden nasıl etkilendiği, gösterdiği değişimin üretim ortamlarının ihtiyacını karşılayıp karşılamadığı gibi sorulara yanıt aranmıştır. Literatürde konu ile ilgili yer alan az sayıdaki çalışmalarda, dijitalleşen iş etüdü tekniklerinin uygulamalarına işletme ve sektör özelinde yer verildiği görülmektedir (Westbrook ve Ampt, 2009; Ghafoorpoor Yazdi ve diğerleri, 2018; Ghafoorpoor Yazdi ve diğerleri, 2019; Wierschem ve diğerleri, 2020). Bu çalışma kapsamında ele alınan konu özelinde literatürde daha önce yapılmış bir çalışma yoktur ve bu durum makalenin özgün yönünü oluşturmaktadır.

Çalışma kapsamında aranan yanıtları bulmak için izlenen yol şu şekilde ifade edilebilir; çalışmanın ikinci bölümünde, iş etüdü çalışmalarında kullanılan tekniklere ilişkin detaylar ve bu tekniklerin dijital dönüşüm sürecindeki değişimine yönelik bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde, buharlı makinelerin icadı ile başlayan Sanayi Devrimi'nin Endüstri 4.0'a doğru evrimleşmesi sırasındaki kademeli geçişi ve bu kademeli gelişim içinde dijitalleşen iş etüdü tekniklerinin yeri hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümünde, Endüstri 4.0'ın ortaya çıkardığı bir olgu olarak da ifade edebileceğimiz yapay zekâ tekniklerinin iş etüdü çalışmalarının dijitalleşmesi üzerindeki rolü incelenmiş ve bu amaçla yapılan çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir. Beşinci bölümünde ise çalışma boyunca verilen bilgiler ışığında dijital dönüşüm ve iş etüdü çalışmalarının bu dönüşümdeki yeterliliği hakkında genel bir değerlendirme yapılmıştır.

2. İŞ ETÜDÜ TEKNİKLERİ

İş etüdü çalışmaları metot etüdü ve iş ölçümü olmak üzere iki ana başlıkta incelenebilir (Kurt ve Dağdeviren, 2020,17). Metot etüdü ile bir işin yapılması sırasındaki gereksiz iş elemanları ortadan kaldırılarak gerekli iş elemanlarını yapmanın en kolay ve en hızlı yolu bulunmaya çalışılır (Kurt ve Dağdeviren,2020,18). Metot etüdü ile tüm çalışanlar tarafından izlenecek standart iş adımlarının oluşturulması hedeflenir. Aslında standartlaştırılmış bir sürecin elde edilmesi metot etüdü'nün çıktılarında biri olarak da ifade edilebilir. Wierschem ve diğerleri, (2020) yaptıkları çalışmada tekrarlı hareketlerin yapıldığı işletmelerde hareket etüdü çalışmaları için hareket yakalama tabanlı bir yöntem önermişlerdir. Önerdikleri insan hareketi analiz sistemi, imalat işçileri ve malzeme taşıma işçileri tarafından gerçekleştirilen tekrarlayan fiziksel hareketlerden veri toplamak, dönüştürmek, depolamak ve analiz etmek için hareket yakalama teknolojisini kullanmaktadır. Sistem, istatistiksel süreç kontrolü ve veri analitiği tekniklerini kullanmakta ve tekrarlayan hareket kalıplarını ve bu kalıplardan istatistiksel olarak anlamlı sapmaları belirleme yeteneğine sahiptir. Bu çalışma, iş etüdü çalışmalarında standart zaman hesaplama aşamasının bir önceki kritik aşaması olan hareket-metot etüdü için dijitalleşme ve bilgisayar destekli programların kullanımına bir örnek olarak verilebilir. Endüstri 4.0'a işletmelerin hazır olup olmadıklarının belirlenmesi ve bu konuda ön hazırlıkların yapılması aşamalarında sıkça iş etüdü çalışmalarına başvurulduğu da bilinmektedir (Ghafoorpoor Yazdi ve diğerleri, 2018; Ghafoorpoor Yazdi ve diğerleri, 2019).

Standartlaştırılmış iş üzerinde bir takım süre ölçümleri ile istatistiksel analizler yapılması ve özellikle üretimdeki verimliliğin ölçülebilir ve izlenebilirliğinin sağlanabilmesine olanak sağlayan çalışmalar iş ölçüm çalışmaları olarak adlandırılır. İş ölçüm çalışmaları için temel bir sınıflandırma şu şekilde yapılabilir: a) Dolaylı iş ölçüm teknikleri (Önceden belirlenmiş hareket zaman sistemleri), b) Dolaysız iş ölçüm teknikleri (Zaman etüdü, İş örnekleme) (Şekil-1).



Şekil 1. İş etüdü tekniklerinin sınıflandırılması

Bu tekniklerden zaman etüdü belirli koşullar altında belirli bir işin öğelerinin zamanını ve derecesini kaydederek, toplanan verileri çözümleyerek, bu işin tanımlanan bir performans düzeyinde yapılabilmesi için gereken zamanı saptamakta kullanılan bir iş ölçme tekniğidir.

Klasik bir zaman uygulamasında bir iş etütçüsünün bir zaman ölçer ile çalışanın işi yapması sırasında doğrudan onu izlemesi ve ölçümleri kaydetmesi gerekir. Belli parçalara ayrılan işin her ögesi için belirli bir istatistiki doğruluğu sağlayacak sayıda ölçüm alınması gerekir. Ölçümler kaydedildikten sonra işin normal zamanı ve normal zaman üzerine dağılım ve dinlenme zaman paylarının eklenmesiyle standart zaman hesaplanır. Westbrook ve Ampt'in (2009) yaptıkları çalışma, iş ölçümünde özellikle veri toplama aşamasında insan emeği yerine kişisel cep bilgisayarlarından faydalanılması nedeni ile dijitalleşen iş ölçümü uygulamalarına iyi bir örnek olarak verilebilir. Bu çalışmada iş ölçümünde, çok karmaşık işlemler için bile veri toplamayı verimli, doğru ve güvenilir bir zeminde gerçekleştirmek için elektronik veri toplama aracının kullanımını içeren gözlemsel bir yöntemin tasarlanması amaçlanmış ve klinisyenlerin iş görevlerinin birçok boyutunu (Hangi görev kiminle, nasıl yapılıyor? Paralel görev yapılıyor mu? İşi yaparken kesintiler nasıl oluyor? Toplam görev süresi nedir?, vb.) yakalayan kişisel dijital asistanlar için gözlemsel bir yöntem ve yazılım geliştirmişlerdir. Windows Mobile 2003 çalıştıran bir HP iPAQ rx3000 cep bilgisayarı kullanılarak bir iş ölçümü veri toplama aracı tasarlanmış ve 15-20 hafta süresince hemşireler üzerinde ölçümler alınarak, elde edilen verilerin istatistiki geçerliliği test edilmiştir.

Yine dolaysız ölçüm tekniklerinden birisi olan iş örnekleme daha önceden belirlenmiş akış türlerinin sıklıklarının rassal olarak gözlemlenmesine dayanır (Kurt ve Dağdeviren 2020,105). İş örnekleme tekniğinin temeli istatistiğe dayanır. İstatistiksel olarak güvenilir ve anlamlı sonuçlar elde edebilmek için yapılacak iş örnekleme çalışmalarının uzun bir periyodu kapsayacak şekilde planlanması gerekir. Tıpkı zaman etüdü çalışmalarındaki gibi istenilen güven derecesine göre yapılacak gözlem sayısı, iş örnekleme tekniğinde de değişkenlik gösterir. Önceden belirlenen akış türlerine örnek olarak tezgâh çalışıyor ya da çalışmıyor, personel çalışıyor ya da çalışmıyor gibi örnekler verilebilir. İş örnekleme ile elde edilen bilgiye dayanarak da standart zaman hesaplaması yapmak mümkündür. Ancak iş örnekleme performans dereceleri hakkında bilgi vermez.

Dolaylı iş ölçüm teknikleri grubuna dâhil olan tekniklerden biri olan önceden belirlenmiş hareket zaman sistemleri sentetik zaman sistemleri olarak da bilinir (Kurt ve Dağdeviren, 2020,117). Bu sistemlerde belirli bir işlemi inceleyerek tıpkı zaman etüdünde olduğu gibi işlemi oluşturan iş öğeleri ve temel hareketler belirlenerek, bu hareketlere ilişkin süreleri standart tablolardan okumak ve işlemin tümü için standart zamanı hesaplamak mümkündür. İşlemlere ilişkin temel hareketlere örnek olarak Method Time Measurement-Metot Zaman Ölçümü sisteminde yer alan uzanma, kavrama ve yerleştirme gibi örnekler verilebilir. Bu teknik için işlemler otomatik kamera sistemleri ile kaydedilerek elde edilen görüntüler yapay zekâ teknikleri ve görüntü işleme tekniklerinin bütünleşik kullanımı ile yeni bir bilgisayar destekli sentetik zaman sistemi oluşturulabilir.

Literatürde yer alan akademik çalışmaların yanı sıra, ticari yazılımlar ile iş ölçümü çalışmalarını dijitalleştiren teknoloji şirketleri de bulunmaktadır. Özellikle, üretim ortamındaki süre ölçüm verilerinin depolanması, veri kayıtlarının iş gücünden bağımsız tutulması ve bilgisayar programları yardımı ile işlere ilişkin standart zamanların hesaplanmasına imkân sağlayan yazılımlar mevcuttur.

3. ENDÜSTRİNİN GELİŞİMİ ve DİJİTALLEŞEN İŞ ETÜDÜ TEKNİKLERİNİN BU GELİŞİMDEKİ YERİ

Endüstri 4.0 yeni bir kavram olarak tüm iş zinciri için yeni organizasyon ve yönetim operasyonları oluşturmuş, sürekli değişkenlik gösteren üretim parametreleri ve çeşitli itici güçler doğrultusunda dalgalanan talep yapısına çevik ve etkin şekilde uyum sağlayabilecek sanayileşme uygulamaları, yeni üretim yöntemleri, analiz ve ölçüm teknikleri ile işletmeler için her anlamda bir değişim dalgası haline gelmiştir (Yılmaz Kaya ve Dağdeviren, 2019a).

Sanayinin 18. yüzyıl sonlarında başlayarak günümüze dek sürdürdüğü sürekli gelişim, bilim ve teknolojinin etkisi ile birbirini takip eden evreler çerçevesinde incelenebilmektedir. Sanayi devrimleri bilim ve teknolojideki gelişmelerin yalnızca sanayileşme düzeyindeki etkilerini değil bu gelişmelerin ekonomik ve sosyal sistemler, iş gerekleri ve operasyonlar, iş piyasası ve iş gücü kalifikasyonu seviyeleri üzerindeki etkilerini de temsil etmektedir.

Sanayi Devrimi'nin ilk evresinde küçük işletmelerin büyük fabrikalara dönüştürülmesiyle makinelerle donatılmış büyük fabrikalar oluşturulmuş (Dombrowski ve Wagner, 2014), ikinci sanayi devrimi evresinde ise elektriğin kullanılması ile kimya, petrol, plastik ve çelik sanayileri güçlenmiş, üretimde montaj hattı üretim bandı gibi üretim modellerine geçiş yapılmasıyla sanayileşme seviyeleri ve iş yapıları temelden değişmiştir (Tunzelmann, 2003). Üçüncü sanayi devrimi evresi ise iki dünya savaşı sonrasındaki ihtiyaç ve teknolojik gelişmeler üzerine temellerini atarak bilgi ve iletişim teknolojileri, biyoinformatik ve nanoteknoloji gibi alanlarında gelişmeleri tetiklemiştir (Dombrowski ve Wagner, 2014; Tunzelmann, 2003). İlk üç sanayi devrimi evresinin bazı belirleyici özellikleri karşılaştırmalı olarak Tablo 1'de özetlenmektedir.

Tablo 1. İlk üç sanayi devrimi evresinin karşılaştırmalı analizi (Tunzelmann, 2003).

Parametreler	Endüstri 1.0	Endüstri 2.0	Endüstri 3.0
Yer	<i>Birleşik Krallık</i>	Amerika Birleşik Devletleri	Japonya
Teknoloji	Makinele	Petrokimya	Bilgi ve iletişim teknolojileri
Enerji	Su, Buhar	Elektrik, Petrol	Nükleer, Yenilenebilir
Malzeme	Demir	Çelik, Plastik	Silikon, Akıllı malzemeler
Süreç	Emek yoğun	Sermaye yoğun	Bilgi yoğun
Ölçekler	Küçük	Büyük	Küçük, Büyük
Avantajlar	Uzmanlaşma	İç bütünleşme	Dış bütünleşme
Sanayi yapısı	Rekabetçi	Oligopolistik	Karma

Endüstri 4.0 evresi ise, nesnelerin interneti (Internet of Things-IoT), siber-fiziksel sistemler, bulut teknolojileri, üç boyutlu (3 Dimensional-3D) tasarım ve akıllı fabrikalar gibi ileri teknolojilerin keşfi ve sanayide yaygın olarak uygulanmaya başlamasıyla geçilen evredir (Yılmaz Kaya ve Dağdeviren, 2019b). Her bir sanayileşme evresi kendi itici güçleri ve iş yapıları ile verimlilik optimizasyonu için farklı iş etüdü tekniklerinin geliştirilmesini gerektirmiştir.

3.1. Endüstri 1.0

1765'te James Watt'ın atmosferik buhar makinasını ticari olarak kullanılacak düzeyde geliştirmesi ile İngiltere'de başlayan Endüstri 1.0 evresi, kısa süre içerisinde Avrupa ve ABD'de görülen yeni Sanayi Devrimi uygulamaları ile sanayileşme, üretim organizasyonu ve süreç analizlerinin tanımlandığı dönemdir. Sanayi Devrimi öncesinde üretim, basit aletlerle ve insan ya da hayvan gücü yani kas gücü ile gerçekleştirilmekteydi (Günay, 2002). Endüstri 1.0 evresi ile el zanaatları ve atölye tarzı üretim, insan ve hayvan gücüne/enerjisine dayalı üretimin yerini su ve buhar gücüyle çalışan mekanik tezgâhların almasıyla, makineleşmiş endüstri haline gelmiş ve bu sayede kitle üretimi doğmuştur (Aksoy, 2017; Pamuk ve Soysal, 2018). Buhar makinasının geliştirilmesi ve tekstil sanayiinde uygulanmasına giden süreç İngiltere'de bir işçi olan John Kay'ın, 1733'te icat ettiği 'uçan mekik' adı verilen düzenek dokuma makinelerinin bulunmasıyla dokuma hızının ve iplik ihtiyacının artması ile başlamıştır. 1766'da çoklu iplik eğirme makinasının, 1769'da su gücüyle çalışan eğirme tezgâhının, 1779'da 'eğirme katırı' denen bir eğirme makinasının icadı ile ham madde olan dokuma ipliği üretim hızı artırılmış ve 1785'de Edmund Cartwright'ın su gücüyle çalışan mekanik dokuma tezgâhını tanıtması ile dokuma sanayi hızla gelişmeye başlamıştır (Günay, 2002). 1802 yılında Trevithick yüksek basınçlı buhar makinasını geliştirerek su ve buhar gücünün sanayide kullanımında fosil yakıtlardan faydalanmıştır. Bu teknoloji sanayi üretiminin yanı sıra gemi ve trenlerde de kullanılmış, bu sayede fosil yakıtlardan kimyasal enerji dönüştürülerek elde edilen mekanik enerji, hem üretim hem

ulaşımda kas gücünün yerine geçmiş, özellikle tekstil ve demir sanayiinde büyük atılımlar yaşanmış, çok miktarda ve kaliteli ham maddeye ulaşma imkânları doğmuş, tedarik süreleri kısalmıştır. Bu durum doğal kaynakların yanı sıra parasal sermaye, ham madde, donanım ve emek kaynaklarını başlıca üretim faktörleri haline getirmiştir (TÜSİAD, 1994: 29-31). Makine ve teçhizatın sermayenin asli ürünü haline gelmesi ve kitle üretim ile atölyelerden çıkarak fabrikalarda çalışmaya başlayan işçiler verimlilik olgusunu doğurmuş, kâr maksimizasyonu için var olan donanımların var olan iş gücü tarafından verimli kullanılmasını sağlamak sanayinin ana hedefi haline gelmiştir. İşçilerin atölyelerden çıkarak fabrikalarda toplanmaları ile iş bölümü ve uzmanlaşma uygulamalarının temelleri atılmaya başlanmış, sanayide verimlilik ve iyileştirme çalışmalarının araştırılması için gereken zemin oluşmuştur. Fabrika üretim sisteminin ortaya çıktığı 19. ve 20. yüzyıllarda sermayenin üretimi ve insanları yönetmesi için birçok zorluk oluşmuş ve daha önce karşılaşılmamış olan bu süreçle birlikte çeşitli Klasik Yönetim Teorilerinin temelleri atılmaya başlanmıştır.

3.2. Endüstri 2.0

İkinci Sanayi Devrimi'nde endüstriyel faaliyetlerde kullanılan enerji kaynağı geleneksel buhar gücünden petrol ve elektriğe dayalı enerji kaynaklarına doğru değişim göstermiştir (Kılıç ve Alkan, 2018). En büyük kömür kullanıcısı endüstrilerden biri olan demir ve çelik sanayisinde ham çelik üretimi için 1856'da İngiltere'de, 1867'de ise Almanya'da yeni prosesler önerilmiştir. Önerilen her iki proseste de ortaya çıkan demir filizindeki yüksek kükürt oranı probleminin 1879'da çözülmesi ile çelik üretimi uygulamalarında büyük bir gelişme sağlanmıştır (Günay, 2002). Enerji kaynağı olarak elektrik ve petrolün kullanılması üretimde daha yüksek bir hıza ulaşılmasını sağlamıştır. Bu durum kitle üretimini etkilemiş, Henry Ford yeni enerji türü elektriği üretimde kullanarak hareketli akış bantlarını fabrikalarında kullanmaya başlamış ve seri üretime geçişte önemli bir rol oynamıştır (Alizon ve diğerleri, 2009).

Sanayide kullanılan enerji kaynaklarının değişmesi ve teknoloji seviyesindeki ilerleme iş gücü optimizasyonu ve verimlilik çalışmalarını da etkilemiştir. İş bölümü ve uzmanlaşmanın yaygın olarak uygulanması Klasik Yönetim Teorileri olarak adlandırılan çeşitli yönetim öngörülerini oluşturmuştur.

Klasik Yönetim Teorilerinde, işçilerin davranışları makine gibi tahmin edilmiş, bir işçi öngörülmüş olan standarda göre çalışıyorsa performansı kabul edilebilir olarak görülmüştür (Mahmood ve Basharad, 2012). Frederick W. Taylor, Harton Emerson, Henry L. Gantt, Frank ve Lillian Gilbreth işçi performansını, çalışan verimliliğini ve etkinliğini artırabilen yöntemlere yoğunlaşan bir bilimsel yönetim olarak kodlamışlar, somut teşviklerin yanı sıra iş bölümü, çalışanların eğitimi ve uzmanlık konularına yoğunlaşmışlardır (Kitana, 2016; Ekinci, 2019).

Taylor 1911 yılında geliştirdiği Bilimsel Yönetim Teorisi temelinde üretim hattı zaman çalışmalarına dayanarak her işi ve bileşenlerini, bir işin kalite kaybı olmadan mümkün olan en iyi sürede gerçekleştirilebilmesi için bölümlere ayırmış, mevcut makine ve teçhizat ile atanmış görevi yapmak için gerekli işveren sayısını hesaplamış, zaman etüdü çalışmalarının ilk uygulayıcısı olmuştur. Taylor gerçekleştirdiği kronometraj zaman etüdü deneyi ile kürek büyüklüğü, süre, mola sayısı ve çalışma süresi parametrelerini değiştirerek kömür işçilerinin verimliliğinde ciddi bir artış elde etmiştir (Meyers ve Stewart, 2002: 26-28). Bu çalışmalar bilinen zaman etüdü çalışmalarının ilk uygulamaları olma özelliği taşımaktadır. 1907'de Frank ve Lillian Gilbreth, Taylor sistemini izleyerek "zaman" yerine "harekete" odaklanmışlar, hareket ve mikro-hareket çalışmalarına yön vermişlerdir. Metod etüdü ve hareket çalışmalarında siklograf, kronosiklograf, hareket kameraları, akış diyagramlarını kullanmışlar, yorgunluk, monotonluk, iş basitleştirme ve beceri geliştirme konularını incelemişlerdir (Meyers ve Stewart, 2002: 29-31). İnşaat işçileri üzerinde gerçekleştirdikleri deneyde işçilerin verimliliklerini tuğla döşeme işini basitleştirerek artırmışlar, verimsiz hareketleri ortadan kaldırmışlar, işi daha az hareket ile yapmanın yollarını bulmuşlardır (Ekinci, 2019). Zaman ve hareket etüdü ile işletmelerin genel verimliliğine doğrudan katkı sağlamanın temelleri ikinci sanayi devriminden beri hayatımızda yer edinmiştir.

H. L. Gantt'ın çalışmaları da Taylor'un yanı sıra, zaman ve hareket etüdü çalışmalarında öncü olmuştur. Gantt, görev ve ödül sistemlerini oluşturmuş, yüksek performans için ödül sunan iyileştirilebilir ücret sistemini savunmuş, işe uygun işçi seçimi, çalışan eğitimi ve motivasyon seviyeleri üzerinde durmuştur. Birinci Dünya Savaşı esnasında iş çizelgeleme çalışmaları için bir teknik geliştirmiş, önerisi denizaltı gemi filosunun yeniden düzenlenmesinde kullanılmıştır (Meyers ve Stewart, 2002: 31).

Fayol (1916) tarafından geliştirilen Yönetim İlkeleri Teorisi ile çaba ve dikkatin çalışmanın belirli kısımlarına odaklanmasını sağlamak için çalışmanın bireyler ve gruplar arasında bölünmesi; Mayo (1924-1932) tarafından gerçekleştirilmesine liderlik edilen dört aşamalı Hawthorne deneyleri (aydınlatma, röle montaj odası, görüşme programı ve tel bağlama gözlem odası deneyleri) ile insan ilişkilerinin ve sosyal insan modelinin yönetim alanında ele alınması Endüstri 2.0 evresinde teknolojik gelişmeler çerçevesinde iş etüdü ve iş analizi uygulamalarında yaşanmış diğer gelişmelerdir (Meyers ve Stewart, 2002: 31-33).

3.3. Endüstri 3.0

Endüstri 3.0 Sanayi Devrimi evresinin başlamasında en büyük itici güç İkinci Dünya Savaşı ve sonrasında ortaya çıkan ihtiyaçlar doğrultusunda hızla gelişen elektronik ve bilgi teknolojileri olmuştur. Teknolojik altyapıda yaşanan bu büyük ve hızlı gelişim ile programlanabilir makineler üretimde ilk kez kullanılarak sanayide otomasyon dönemine geçilmiştir.

Endüstri 3.0 evresinde telekomünikasyon teknolojileri daha da güçlü hale gelmiş, mekanik ve elektronik teknolojiye dayalı makinelerin yerini dijital teknolojiye dayalı makineler almış, sanayide kullanılmakta olan enerji tipi kullanılan kaynakların tükenme tehlikesine karşın elektrik ve petrolden büyük ölçüde nükleer ve yenilenebilir enerjilere dönmüştür. Endüstri 3.0 evresinde özellikle güneş, rüzgâr, hidroelektrik ve jeotermal enerji kaynağı alternatiflerinin kullanımı yaygınlaştırılmaya çalışılmış, bu çağda ortaya çıkan sürdürülebilirlik ve sürdürülebilir büyüme kavramları büyük önem kazanmıştır (Redcliff, 2005; Pamuk ve Soysal, 2018).

Nükleer enerji ve elektronik endüstrisinde yaşanan gelişmeler atom enerjisine dayalı araştırmalar, ileri bilgisayar teknolojileri, mikro-elektro mekanik sistemler ve fiber-optik ağlara dayalı alanlarda gelişmelerin yaşanmasını sağlamıştır (Kagermann ve diğerleri, 2013).

Endüstri 3.0 evresi ile sağlanan kazançlar Sarıkulak (2018) tarafından, yalın üretim ve otomasyonun temellerinin atıldığı Toyota fabrikasında gerçekleştirilen üretim üzerinden karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. 1987 yılında Amerika'da bulunan General Motors (GM) şirketinin fabrikalarında araba üretimi için gerekli olan süre 31 saat iken Toyota fabrikalarında bu sürenin 16 saat olduğu, stok tutma sürelerinin GM'de 2 hafta iken Toyota'da 2 saat, 100 araba için ortalama hata sayılarının ise GM'de 135 iken Toyota'da 45 olduğu belirtilmiştir. Endüstri 3.0 Sanayi Devrimi'nin 1990 sonrası diğer üretim sektörlerinde de uygulanmaya başlamasıyla 1996-2004 yılları arasında iş gücünde %2,46 emek verimliliği artışı sağlanmıştır (Sarıkulak, 2018: 31-32).

Otomasyon ve ileri teknoloji bilgi sistemlerinin üretimde kullanılması ile birlikte dijitalleşmeye başlayan üretim süreçleri, iş etüdü ve iş ölçümü uygulamalarının da buna uygun olarak evrilmesine neden olmuştur. M. E. Mundel'in iş ölçümü alanındaki çalışmaları ve önerdiği araçlar bu sanayi devrimi evresinde gerçekleştirilen iş etüdü uygulamalarına örnek olarak gösterilebilir. Shingo (1960) otomasyon ve yalın üretim çerçevesinde geliştirdiği yeni teknikler ile farklı sanayi kollarında çok önemli iyileştirmeler sağlamış, Matsushita ve Toyota gibi müşterilerle çalışmış, fabrika verimliliğini iki katına çıkarmıştır (Meyers ve Stewart, 2002: 33). Yalın üretim kavramının da hedeflediği, üretime doğrudan katkı sağlamayan gereksiz faaliyetlerin elimine edilmesi fikri aslında metot etüdü'nün de temel fikridir. Bir işletmede başarılı bir yalın üretim uygulanması hareket ve zaman etüdü tekniklerinin de başarılı bir biçimde kullanılmasını gerektirir.

3.4. Endüstri 4.0

Endüstri 4.0, 2011 yılında geleceğin bilgisayarlı imalatı ile ilgili projeden türetilen ve Almanya Eğitim ve Araştırma Bakanlığı tarafından yürütülen Dördüncü Sanayi Devrimi evresini ifade etmektedir (Yılmaz Kaya ve Dağdeviren, 2019b). Bulut teknolojileri, IoT uygulamaları ve siber-fiziksel sistemler gibi yeni teknolojilerin sanayide kullanılması akıllı ürün, akıllı fabrika ve insansız üretim kavramlarını doğurmuş; çeşitli elektro-mekanik sistemlerin, çip ve sensör teknolojilerinin ve internet erişiminin entegre kullanılması ile canlı ve cansız nesnelerin aracısız iletişime ve etkileşime geçebildiği tam otomasyonlu yeni üretim sistemleri kullanılmaya başlanmıştır. Endüstri 4.0 Sanayi Devrimi evresinin temel itici güçleri; sermayenin anlık değişen tüketici talebine uyum sağlama yeteneği kazanma isteği, küreselleşmiş olan ekonomik pazardaki ürün çeşitliliği ile rekabet etme ihtiyacı duyması, iş gücü maliyetini düşürme, tükenmekte olan doğal kaynakların korunması ve üretim, dağıtım ve tedarik süreçlerinde sürdürülebilirliğin sağlanması mecburiyeti olarak gösterilebilir (Herter ve Ovtcharova, 2016; Sinan, 2016; Yıldız, 2018).

Endüstri 4.0 ile birlikte üretimde yeni iş süreçlerinin oluşması ve yeni iş ölçümü tekniklerinin uygulamaya konması gerekmiş, geleneksel teknikler ile bu sistemlerde süreç yönetilememiştir. Ayrıca akıllı fabrikaların oluşması ve kullanılan ileri teknoloji otomasyon ve izleme sistemleri ile birlikte sanayide düşük nitelikli iş gücüne olan ihtiyacın azalacağı, fabrika içi hareketin sınırlandırılması, hata oranlarının en azlanabileceği ve bu teknolojilerin kullanımı ile verimlilik oranlarının artacağı öngörülmektedir.

Bu bağlamda iş ölçümü ve iş planlaması süreçleri, yeni sanayi devrimi çağının içermekte olduğu teknolojik araçlar ile unsurlar gereğince değişime uğramaktadır. Endüstri 4.0 sayısız yeni teknolojiyi ve ilişkili araçları kapsamaktadır, bu yeni teknolojiler Endüstri 4.0 uygulamalarını kapsayan bileşenler olarak farklı başlıklar altında incelenebilmektedir.

Nesnelerin İnterneti (IoT), içerisinde ağ bağlantısı bulunan fiziksel cihazların birbiriyle iletişimini ve bu nesnelerin uzaktan kontrol edilmesini ifade ederken, makine ile makine (Machine to Machine-M2M) iletişimini mümkün kılan bu sistem Endüstri 4.0 uygulamalarının bel kemiğini oluşturmaktadır (Pamuk ve

Soysal, 2018). IoT kavramı ilk olarak 1999'da Kevin Ashton tarafından literatüre kazandırılmıştır (Ashton, 2009) ve International Telecommunication Union tarafından 2005 yılında yayınlanan "The Internet of Things. ITU Internet Reports" raporu ile birlikte "IoT" bir kavram olarak kamuoyuna duyurulmuştur (Sayar, 2019: 44-46). Endüstri 4.0 çağında yeni internet protokolü IPv6'nın 2012 yılında devreye girmesi ile akıllı nesnelerin direk ağlarda iletişim halinde olabilmesi için yeterli adres sağlanmış, ayrıca ağ kaynakları, bilgi, nesneler ve insanlar etkileşime girerek IoT ortamını oluşturmaları mümkün olmuştur (Akben ve Avşar, 2018). IoT teknolojilerinin iş ölçümünde kullanımı ile radyo frekansı tanımlama (RFID) cihazları gibi düşük maliyetli sensör teknolojileri ile "nesneleri" etiketlemek ve izlemek fiziksel üretim ortamlarında mümkün hale getirilmiştir, bu sayede düşük maliyetli bilgi işlem faaliyetleri iş ölçümü ve iş planlamada kullanılabilir kılınmıştır.

Endüstriyel Nesnelerin İnterneti (IIoT) bileşeni ise belirli IoT teknolojilerinin (siber-fiziksel sistemler içindeki belirli türdeki akıllı nesnelerin) endüstriyel bir ortamda, sanayiye özgü hedeflerin desteklenmesi için kullanılması, yani IoT teknolojilerinin imalatta kullanılması olarak tanımlanabilmektedir (Boyes ve diğerleri, 2018). IIoT, en kritik sistemlere dahi tamamen yeni altyapılar getirerek, etkinliği büyük ölçüde iyileştirebilen akıllı dağıtılmış makineler oluşturma fırsatı ve neredeyse tüm endüstrilerde verimlilik artışı olanağı sunmaktadır (Schneider, 2016). IIoT teknolojilerine; aktuatörler, robotlar, freze makineleri, 3D yazıcılar ve montaj hattı bileşenleri, kimyasal karıştırma tankları, motorlar, insülin ve infüzyon pompaları örnek gösterilebilir (Thames ve Schaefer, 2016; Yıldız, 2018).

Endüstri 4.0'ın bir diğer bileşeni olan *Siber-Fiziksel Sistemler (Cyber-Physical Systems-CPS)* fiziksel dünya ile siber dünya arasındaki iletişim ve koordinasyonu içeren yapıların bütünü olarak tanımlanabilir ve yeni sanayi çağının getirisi ile makineleri ekstra zeki ve esnek yazılımlar sayesinde kontrol etmeyi ifade etmektedir. Siber-fiziksel sistemlerde, yerleşik üretim faktörlerine gömülü yazılımlar ve sensörler sayesinde daha önceden programlanan sistemler M2M iletişimi ile herhangi bir müdahale gerektirmeden otonom çalışabilmektedir (Oesterreich ve Teuteberg, 2016). Siber-fiziksel sistemler fiziksel süreçlerle hesaplanan bütünlüğüyle üretim sürecinde kontrol, gözetim, şeffaflık ve verimliliğin çok daha iyileştirilmiş yeni bir derecesini sağlamaktadır (Yıldız, 2018). Sistemin başlangıcında yapılan programlamayla sistem tüm süreci hiçbir müdahale ya da düzenleme gerekmeden otomatik olarak gerçekleştirebilmektedir. Geçmiş tecrübelerden edindikleri bilgilerle mevcut bir problemi çözebilen, programcılar tarafından sunulan veri setleri ile çalışan ve ortaya çıkabilecek sorunları çözebilen robotlar olan öğrenen robotlar (Akben ve Avşar, 2018) siber-fiziksel süreçlerde önemli rol oynamaktadır. Bu süreçte, günümüzde özellikle hali hazırda yer alan öğrenen robotların da içinde bulunduğu birçok makine üretim sürecinin içerisine dâhil olmakta, bu süreçlerde gerçekleştirilecek iş ölçümü ya da iş planlama faaliyetlerinde ise simülasyon teknikleri, derin öğrenme algoritmaları, yapay sinir ağları ve yapay zekâ tekniklerinden faydalanılmaktadır.

Büyük Veri ya da *Veri Analitiği* Endüstri 4.0 çağının temel bileşenlerinden bir diğeri olarak görülmektedir. Büyük veri terimi, geleneksel yöntemlerde çok büyük veya karmaşık veri kümelerini analiz etmek için kullanılan, makineler ve cihazlar aracılığıyla üretilen ve yetersiz kalan geleneksel tablo programları yerine bulut altyapılı sistemler içerisinde depolanabilen, büyük veri analitiği kullanımıyla çözümlendirilerek anlamlandırılabilen her türlü veri kümesi olarak tanımlanabilmektedir (Kagermann ve diğerleri, 2013). Genel bir bakış açısıyla, siber-fiziksel sistemlerde akıllı makineler için sürekli olarak bilgi üretimi ve bilgi depolaması yapılması gerektiğinden, bu bilgilerin analiz edilmesi, ölçülmesi ve yapılandırılması gerektiğinde büyük veri analizi bir başka isimle veri madenciliği ön plana çıkmaktadır. Büyük verilerin analizi ve kullanımı ile temel olarak etkinliğin artırılması, hata oranlarının azaltılması, esnekliğin artırılması, müşteri etkileşiminin artırılması ve yeni ürün geliştirmede avantajlar sağlanabilir (Akben ve Avşar, 2018; Pamuk ve Soysal, 2018).

Bulut Tabanlı İmalat müşteri tarafından oluşturulan değişken talebe yanıt vermek için verimliliği artıran, ürün ömrü maliyetlerini düşüren ve optimum kaynak tahsisine izin veren, geçici, yeniden yapılandırılabilir siber-fiziksel üretim hatları oluşturmak için paylaşılan çeşitlendirilmiş ve dağıtılan üretim kaynaklarının bir paylaşım kümesinde talep üzerine erişimden yararlanan bir ağa bağlı üretim modeli olarak tanımlanan önemli bir diğer Endüstri 4.0 bileşenidir (Yıldız, 2018).

Akıllı Ürün ve *Akıllı Fabrika* bileşenleri de Endüstri 4.0 çağının en önemli ve uygulamada kendilerine yeni yerler edinmekte olan bileşenlerindedir. Akıllı ürün; yaşam döngüsü boyunca farklı ortamlarda kendi kendini organize etmek için tasarlanmış, bağlam farkındalığı, anlamsal öz tanımlama, proaktif davranış, çok modlu doğal arayüzler, yapay zekâ planlaması ve makine öğrenmesi sayesinde gelişmiş ürünler arası (product to product - p2p) ve kullanıcı ve ürün arası (Product to User - p2u) etkileşim aracılığıyla ileri seviyede etkinlik, verimlilik ve kullanım kolaylığı sağlayan bir maddi nesne, yazılım veya hizmettir (Mühlhäuser, 2007). Akıllı ürünler, mikroçipler, yazılımlar ve sensörler gibi ileri teknoloji bileşenler içeren ve bu nedenle bilgi toplayabilen, işleyebilen ve üretebilen ürünlerdir. Bu sayede akıllı olmayan ürünlerde yalnızca sınırlı ölçüde bulunabilen bir dizi yeteneği üst seviyelerde sağlayabilirler (Rijsdijk ve Hultink, 2009).

Akıllı ürünler, tüm üretim süreciyle entegredir, üretim süreçlerini aktif olarak destekler, bireysel üretim aşamalarını bağımsız olarak kontrol eder. Ayrıca, bitmiş ürünler olarak akıllı ürünler, kullanım parametrelerinin farkındadır ve tüm yaşam döngüleri boyunca durumları hakkında bilgi verebilir. Bu gömülü sistemler, akıllı fabrikayı lojistik, üretim, bakım ve iş yönetimi süreçlerine göre optimize ederek tüm değer zinciri boyunca gerçek zamanlı olarak yönetilebilir (Nunes ve diğerleri, 2017). Akıllı ürün üretiminde iş ölçümü ve iş planlama faaliyetleri, üretim sürecinin içine entegre edilmiş halde, büyük veri işlemleri ve yapay sinir ağları uygulamaları gibi teknikler ile gerçekleştirilebilmektedir.

Akıllı Fabrikalar ise dinamik ve hızlı bir şekilde yüksek karmaşıklıkla pazar gereksinimlerini karşılamaya uygun esnek ve uyarlanabilir süreçlerin performansına izin veren Endüstri 4.0 üretim bileşenleridir (Nunes ve diğerleri, 2017). Akıllı fabrika, akıllı sensörler ve algılama, hesaplama ve tahmine dayalı analitik ve esnek kontrol teknolojilerinden oluşan IoT ve endüstriyel internet teknolojilerini kullanarak büyük ölçekli üretimde yeni bir yaklaşım tanımlamaktadır (Calp ve diğerleri, 2018). Her bir endüstri devrimiyle birlikte, fabrikaların üretim süreçlerinde değişim yaşanmış ve otomasyonun devreye girmesiyle üretimdeki insan faktörünün rolü değişmiştir (Pamuk ve Soysal, 2018). Akıllı fabrika ortamı, insan kaynakları, makine ve akıllı ürünler gibi nesnelere arasında bir ağdaki iletişim ile karakterize edilir. Akıllı fabrikalar operasyon ve süreç karmaşıklığını yönetebilmekte ve bu sayede hata oranını azaltarak üretim verimliliğini artırabilmektedir (Nunes ve diğerleri, 2017). Her fiziksel bileşen ve makine, siber uzayda, sensör ağlarından ve manuel girişlerden üretilen verilerden oluşan ikiz bir modele sahiptir. Akıllı fabrikalar üretimi yüksek verimli, atak ve esnek bir şekilde gerçekleştirmek için birbirine bağlı sistemlerden bilgi ağını güçlendirir. Akıllı bir fabrikada imalatçı üretimdeki son dakika değişikliklerini ve geleneksel fabrikalarda elde edilemeyecek esneklik seviyelerini destekleyerek, herhangi bir üretim hızında müşteri şartnamelerini karşılayabilmektedir. Akıllı fabrikalar ayrıca prototip ürün çıkarmada, yatırımcılara ürün üretilmeden önceki ilk halini sipariş edebilme, müşterilere ise kendi tasarımını yapabileme imkânı tanıma gibi önemli yararlar sağlamaktadır (Calp ve diğerleri, 2018).

Sanayileşmede geline son dönemin şartları çerçevesinde Endüstri 4.0 sanayi devrimi ile bu süreçte uygulanacak iş etüdü ve iş ölçümü yöntemleri de dijitalleşmektedir. Akıllı fabrikalarda gerçekleştirilecek iş ölçümü ve zaman etüdü çalışmaları için Yapay Sinir Ağları (YSA), 3D modelleme ve simülasyon teknikleri, tesis tasarımı ve hareket çalışmaları için IoT temelli derin öğrenmeli hareket algılama sistemleri, kümeleme analizleri ve kinematik analizler kullanılabilir. Ayrıca, IoT temelli iletişim uygulamaları ve siber-fiziksel sistem tasarımları ile M2M ve insan-makine arasında iyileştirilmiş etkileşimin sağlanmasının da akıllı fabrika uygulamalarının getireceği bir diğer avantaj olacağı öngörülmektedir. İş ölçümü, zaman ve hareket çalışmaları ve iş etüdü analizlerinin büyük veri, IoT temelli teknolojiler, sensörler, veriye duyarlı analitik modüller ve çeşitli yazılımların kullanılmasıyla işlem, bekleme ve ortalama çalışma süreleri ile hata oranları düşürülürken, çıktı miktarlarının, dolayısıyla da verimlilik oranlarının artırılabilirliği öngörülmektedir.

Üretim sistemlerinde yaşanan dijital dönüşümün iş etüdü teknikleri üzerindeki etkisini analiz ederken, kilit nokta, fiziksel iş gücünün yerini makinelerin alması, üretimde fiziksel iş gücünün kontrol edici bir araç olarak kullanımının söz konusu olması olarak ifade edilebilir. Geleneksel iş etüdü tekniklerinin emek yoğun işletmelerde uygulanarak, işletmelere verimlilik ve maliyet açılarından ciddi katkılar sunduğu bilinmektedir. Ancak, makinelerin otomatikleşmeye başlaması, kendi hatalarını tespit edebilen ve bunları kontrol ederek sürece uyarılar gönderen makinelerin üretim sistemlerinde yer almaya başlaması ile iş etüdü tekniklerinin de modernize olması ve bu sürece entegre olması kaçınılmaz olmuştur. Önümüzdeki yıllarda, vasıfsız fiziksel iş gücüne olan talebin gittikçe azalması, nitelikli iş gücünün ön plana çıkmasına ve insanın üretim sürecinde bir kontrolör olarak yer almasına neden olacaktır. Fakat bu noktada bile, iş etüdü tekniklerinin kullanımı kaçınılmaz olacaktır. Emek yoğun işletmelerde, çalışanın üretim ortamında fiziki dolaşımını minimize etmek için uygulanan metot etüdü teknikleri, yeni düzende kontrolör olarak görev yapan çalışanın görevini en az hareket ve süreyle en verimli yapabileceği şekilde tasarlanabilecek, süreçteki makro-hareket etütleri yerini mikro-hareket etütlerine bırakacaktır. Benzer şekilde otomatik kontrollü makinelerin yer aldığı üretim sistemlerinde, ki bu durum aslında Endüstri 3.0 ile başlayan ve özellikle yalın üretim tekniklerinin devreye girmesi ile verimliliğin hızla arttığı döneme işaret etmektedir, insan-makine etkileşimi temelindeki iş etüdü tekniklerinin uygulanma alanları genişleyecektir.

4. YAPAY ZEKÂ ve YAPAY ZEKÂNIN İŞ ETÜDÜ TEKNİKLERİNİN DİJİTALLEŞMESİ ÜZERİNE ETKİSİ

4.1. Yapay Zekâ Kavramı

Yapay zekâ, farklı alanlardaki problemleri öğrenirken ve çözerken insan zekâsı gibi düşünebilen ve karar verebilen makinelerdir (Hemalatha ve diğerleri, 2021). Başka bir ifadeyle tanımlanacak olursa, yapay zekâ çevresinde olanları anlayabilir, analiz edebilir, çevresindekilerle etkileşim kurabilir, geçmiş verilerden öğrenebilir ve karmaşık problemleri dışarıdan müdahale olmadan kendi başına çözebilir (Hmoud ve Laszlo, 2019). Yapay zekâ tekniklerinin kullanımı; deneyimi, karar verme özelliği, sözel verileri dikkate alması ve yapay sinir ağlarının öğrenme kabiliyeti ile beraber bir bütündür. Tüm bu bileşenler yardımıyla uygulayıcı,

geçmiş deneyimlerini sisteme aktararak karmaşık ve doğrusal olmayan problemlerin çözümlenmesini yapabilmekte ve model oluşturma yeteneklerini daha ileriye götürebilmektedir. Bu nedenle, yapay zekâ teknikleri günümüzde birçok alanda başarıyla uygulanabilmektedir.

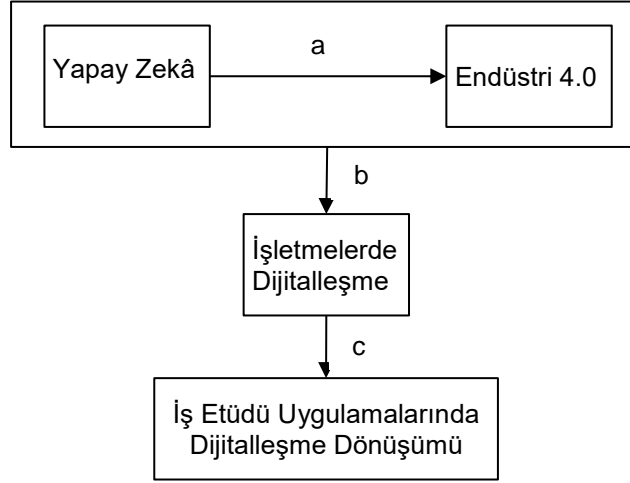
4.2. Yapay Zekâ Teknikleri ile Zaman Ölçümü

Yapay zekâ, işletmelerin üretim modellerinin süreç kalitesinden ödün vermeden gelişmelerine imkân verir. Pazarda artan rekabet göz önüne alındığında bu gelişme oldukça önemlidir. Makine öğrenimi ve derin öğrenme gibi yapay zekâ teknikleri doğru ve yerinde kullanıldığında, işletmelerin yatırım getirisi üzerinde çok önemli etkilere sahip olunabilir. Makine öğrenimi, Endüstri 4.0 kapsamında akıllı üretimi destekleyen gelişmiş çok farklı ve kullanışlı algoritmalar sunmaktadır. Örneğin, üretim sırasında toplanan verilerin analiz edilip, analiz sonucu ortaya çıkan değişikliklerin otomatik olarak fabrika sürecine uyarlanabilir olması günümüz işletmeleri için büyük avantaj sağlamaktadır. Makine öğreniminden ortaya çıkan ve bir alt küme olan derin öğrenme, denetimsiz öğrenmeye izin veren kendi sinir ağlarını oluşturur ve bu yöntemlerin özerkliğini daha da ileri götürür. Dijitalleşme ile birlikte robotların, fiziksel iş yükünün, yapay zekânın ise zihinsel iş yükünün yerini alacağı iş yeri çalışma ortamlarında iş etüdü ve ergonomi uygulamaları için yeni alanlar ortaya çıkmaktadır (Çakıt ve diğerleri, 2020).

İş etüdü uygulamaları kapsamında, standart zamanı doğru belirlemeyen firmalarda, üretim planları ve programları, kısa ve uzun vadeli tahminler, fiyatlandırma ve diğer teknik ve yönetsel faaliyetleri hazırlamak çok zordur. Ne yazık ki, doğrudan veya dolaylı iş ölçüm yöntemleri çoğu durumda standart zamanı belirlemede yetersiz kalmaktadır. Doğru zaman ölçümünün mevcut iş etüdü teknikleri ile çok karışık, maliyetli ve zaman alıcı olmasından dolayı literatürde yapay zekâ tekniklerinin kullanım avantajlarından yararlanılmıştır. Eraslan (2009) ve Dağdeviren ve diğerleri (2011) yaptıkları çalışmalarda yapay zekâ tekniklerinden olan yapay sinir ağlarına (YSA) dayalı, maliyeti olmayan ve kolaylıkla uygulanabilir alternatif bir dolaylı iş ölçüm yöntemi önermişlerdir. Bu şekilde, önerilen yapay zekâ tahmin yönteminin ilgili yapay sinir ağları algoritmalarını kullanarak birçok benzer süreçte standart zamanların doğru belirlenmesinde yapay zekâ algoritmalarının uygulanabileceği sonucuna varmışlardır. Benzer şekilde Atalay ve diğerleri (2015), dolaylı standart zamanın tahmini için bulanık regresyon analizini uygulamışlardır. Adizue ve diğerleri (2020) bir başka çalışmada yapay sinir ağları kullanarak süreç zaman kısıtlamalarını dikkate almış ve elde ettikleri tahmin değerleri ile daha hızlı ve güvenilir sonuçlar ortaya çıkarmışlardır. Susanto ve diğerleri (2012) tekstil sektöründe ürün teslim sürelerini yapay sinir ağları kullanarak modellemişlerdir. Shao ve diğerleri (2021) destek vektör makineleri yardımıyla parçacık sürü optimizasyonu uygulayarak standart zamanı tahmin etmişlerdir.

Tüm bu çalışmalarda kullanılan yapay zekâ teknikleri geleneksel ölçüm yöntemleriyle karşılaştırıldığında birçok avantaj ve uygulanan sektörlere sağlanan faydalar ortaya çıkmıştır. Bu avantajlar sırasıyla, i) standart zamanı tahmin etmek için ürün ile ilgili uzun süreli deneyim gerektirmemesi, ii) zaman ve para israfından kaçınmak için çalışma süresini en aza indirmesi, iii) çok sınırlı hata aralığı ile yüksek doğrulukta sonuçlar vermesi, iv) önceden ölçülen değerlerle zamanı etkileyen tüm faktörleri göz önünde bulundurması ve daha objektif tahminlerde bulunması ve v) standart zaman üzerinde daha fazla etkisi olan faktörlerin izlenmesinin sağlanması şeklinde sıralanmıştır (Eraslan, 2009).

Yapay zekâ, Endüstri 4.0 ve dijitalleşen iş etüdü uygulamaları arasındaki kavramsal ilişki literatürdeki çalışmalar (Eraslan, 2009; Dağdeviren ve diğerleri, 2011; Susanto ve diğerleri, 2012; Atalay ve diğerleri, 2015; Adizue ve diğerleri, 2020; Shao ve diğerleri, 2021) kapsamında belirlenmiş ve aşağıdaki gibi oluşturulmuştur (Şekil 2):



Şekil 2. Yapay Zekâ, Endüstri 4.0 ve dijitalleşen iş etüdü uygulamaları arasındaki kavramsal ilişki

Şekil 2'de verilen kavramsal ilişki aşağıda verilen maddeler çerçevesinde özetlenebilir:

- Yapay zekâ teknolojisi Endüstri 4.0 uygulamalarını etkiler. Yapay zekâ teknolojileri ile makineler programlanıp akıllı makinelere dönüştürülürken, birbirleriyle etkileşime geçen makineler Endüstri 4.0 uygulamalarında yaşanan yeniliklerin temellerini oluşturmaktadır.
- Yapay zekânın Endüstri 4.0'a olan etkisi işletmelerde dijitalleşmeyi önemli kılar. Yapay zekânın Endüstri 4.0'a olan etkisi ile genelde insan gücü ile tamamlanan görevler yapay zekâ teknolojisiyle ön plana çıkan akıllı robot işçilere bırakılırken, hâlihazırda akıllı bilgisayar ve otomasyon sistemleri üretim ekosisteminin vazgeçilmez unsurları arasında gösterilmektedir.
- Yapay zekâ tekniklerinin endüstride kullanımının artması ile iş etüdü uygulamalarında dijitalleşme hızlanır. İşletmelerin dijitalleşme süreci ile daha esnek, hızlı ve tahmin edilenden daha verimli bir sürece katkı sağlamak amaçlanmaktadır. Yapay zekâ bu amacın gerçekleşmesi için çok önemli bir yerde bulunmaktadır. Verimlilik artırma yaklaşımlarından olan iş etüdü uygulamalarında yapay zekâ teknikleri ile standart zaman ölçümünün daha doğru, daha az maliyetli ve daha kısa sürede tamamlanması ile iş etüdü uygulamalarında dijitalleşme hızlanmaktadır.

5. SONUÇ ve TARTIŞMA

Endüstri 2.0 ile emek ve sermaye yoğun olarak görülen iş süreçlerinde klasik iş etüdü tekniklerini uygulamak ve verimlilik hesapları için bir temel oluşturmak oldukça kullanışlı bir yoldu. Devamında yaşanan hızlı sanayileşme insan gücünün yerine makine gücünün kullanımını hızlandırdı, ancak yine de geleneksel iş etüdü teknikleri süreçlerin verimlilik ölçümü için temel oluşturmaya devam etti. Üretim sistemlerindeki makineleşme arttıkça geleneksel gözlem, ölçüm ve hesaplama yöntemlerini, bu dijitalleşmiş sistemlerde uygulamak yine mümkün olmuştur ancak neredeyse her türlü işlemin teknolojidten faydalanarak yürütüldüğü bir üretim ortamında, klasik bir iş etüdü çalışmasını yürütmek iş gücü ve zaman kaybı olarak değerlendirilebilir. Bu nedenle, üretim ortamındaki dijitalleşme arttıkça, geleneksel iş etüdü tekniklerinin de bu dijitalleşmeye ayak uydurduğunu, üretim ortamındaki değişen ihtiyaca cevap verebilmek için klasik gözlem ve hesaplama tekniklerinin de dijital ortamlara taşındığını söylemek mümkündür. Akıllı telefonlara kurulan birtakım uygulamalar ile üretim ortamındaki iş ölçümü verilerine ve hesaplamalarına anında ulaşma imkânı sağlayan ticari yazılımların geliştirilmesi, üretimi izleme ve verimliliği değerlendirme açısından işletmelere oldukça kolaylık sağlamıştır.

Öte yandan her türlü üretim faaliyetini fiziksel iş gücünü en az düzeyde kullanarak gerçekleştirmeye çalışan, Endüstri 4.0 kavramıyla hayatımıza giren, akıllı ve karanlık fabrikalarda, tasarım aşamalarında hareket etüdü tekniklerinin hala kullanıldığını söylemek yanlış olmaz. Büyük veri işleme ve yapay zekâ kavramları ile geçmiş dönemlerdeki iş ölçümü verilerinden geleceğe yönelik gerçekçi ve akıllı tahminlerin yapılması, tekrarlayan hareketlerden yola çıkarak farklı ürün grupları için belki de hiç ölçüm alınmadan standart zaman hesaplarının yapılabilir hale gelmesi, iş etüdü tekniklerinin de dijitalleşme sürecine uyum sağladığının ciddi örnekleri olarak gösterilebilir. Sonuç olarak üretim ortamlarında yaşanan dijital dönüşüm süreçleri karşısında, iş etüdü tekniklerinin geleneksel ölçüm alma ve elle hesaplama aşamasında kalmasını beklemenin gerçekçi olmayacağını, iş etüdü tekniklerinin de gerek ölçüm alma gerek hesaplama gerek hesaplanan verilere anlık erişim ve geçmiş verilerden geleceğin projeksiyonunu yaparak doğru tahmin mekanizmalarının kurulması gibi kendi iç süreçlerinde bir dijital dönüşüm geçirerek daha da gelişeceğini

söylemek mümkündür. Dördüncü Endüstri Devrimi ile müşterinin değişen ihtiyaçlarına anlık bir şekilde uyum sağlayacak esnek üretim sistemlerinin kurulması hedefleniyor ise üretimdeki verimliliği kontrol etmenin kritik anahtarlarından biri olan iş etüdü çalışmalarının da üretim ortamlarının değişen ihtiyaçlarına uyum sağlayacak şekilde dijitalleşmesi gerekmektedir.

Gelinen noktada önemli bir tespit de üretime yönelik yapay zekâ ve dijitalleşme süreçlerinde söylemden eyleme geçilememesidir. Yapılan araştırmalar makine öğrenmesi, yapay sinir ağları vb. yapay zekâ araçlarının bilinirliğinin çok fazla olduğunu, ancak sanayide kullanımının hala çok düşük seviyelerde olduğunu ve önemli fırsatlar içerdiğini göstermektedir (Business Advantage Group, 2018). Bu fırsatlardan biri de geleneksel olarak çok fazla zaman ve iş gücü gerektiren iş etüdü tekniklerinde yapay zekâ araçlarının kullanımının artırılmasıdır. Bu çalışma kapsamında yapılan araştırma yapay zekâ temelli iş etüdü uygulamalarının çok kısıtlı ve gelişmeye açık bir alan olduğunu göstermiştir. Bu gelişimi yakalayabilmek birçok parametre ile birlikte, süreçleri yönetecek olan mühendislerin yetiştirildiği eğitim programlarındaki müfredatın dijital dönüşüme bağlı olarak güncellenmesini de gerektirmektedir. İşletmeler hızla dijitalleşirken ilgili programların önemli bir kısmında hala geleneksel yöntemlerin dışına çıkılamaması, yapay zekâ araçlarının bilinme oranının yüksek olmasına rağmen kullanma oranlarının düşük olmasının nedenlerinden biridir. Çağın gereklerine uygun yetkinlikte insanların yetiştirilmesi ülkeler için stratejik bir konudur. Sistemler ne kadar dijital ve mükemmel olursa olsun sistemi yönetecek insanın gerekli yetkinlikte olmaması beklenen faydayı geçersiz kılacaktır. Sistemlerin dijitalleşmesi insana duyulan ihtiyacı ortadan kaldırmamakta sadece beklenen yetkinliği farklılaştırmaktadır. Bu değişimi yönetmek, süreçte görev alan tüm karar vericilerin sorumluluğundadır.

Bu çalışma kapsamında özetle, üretim ortamında yaşanan dijitalleşmenin, iş etüdü teknikleri üzerindeki etkisi literatürdeki çalışmalar temel alınarak araştırılmış ve analiz edilmiştir. Ancak çalışma elbette ki birtakım kısıtlar içermektedir. Bu kısıtlardan ilki, yerli ve yabancı yazında, makalede ele alınan konuyu derleyen başka bir çalışmanın bulunmamasıdır. Böyle bir çalışmanın bulunmaması bir yandan çalışmanın özgün yönünü oluştururken diğer yandan çalışmadaki çıkarımların karşılaştırılarak, tartışılmamasına neden olmuştur. Çağın gereklerine adapte olarak, dijital imkânlardan faydalanan işletmelerde uygulanan revize iş etüdü tekniklerinin uygulamaya dönük kalması ve akademik yazına aktarılamaması ise çalışmanın bir diğer kısıtı olarak değerlendirilebilir. Bu durum, dijitalleşen iş etüdü teknikleri açısından mevcut durumun tam olarak değerlendirilerek analiz edilmesine engel olmuş olabilir. Gelecekte, bu kısıtların önüne geçebilmek için, saha uygulamalarının akademik yazına kazandırılmasına yönelik çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKÇA

- Adizue, U.L., Nwanya, S.C. ve Ozor, P.A. (2020). "Artificial Neural Network Application to a Process Time Planning Problem for Palm Oil Production", *Engineering and Applied Science Research*, 47(2), 161-169.
- Akben, İ. ve Avşar, İ. (2018). "Endüstri 4.0 ve Karanlık Üretim: Genel Bir Bakış", *Türk Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi*, 3(1), 26-37.
- Aksoy, S. (2017). "Değişen Teknolojiler ve Endüstri 4.0: Endüstri 4.0'ı Anlamaya Dair Bir Giriş", *SAV Katkı Teknoloji*, 34-44.
- Alizon, F. Shooter, S. B. ve Simpson, T.W. (2009). "Henry Ford and the Model T: Lessons for Product Platforming and Mass Customization", *Design Studies*, 30(5), 588-605.
- Ashton, K. (2009). "That 'Internet of Things' Thing", *RFID Journal*, 22(7), 97-114.
- Atalay, K. D., Eraslan, E. ve Cinar, M.O. (2015). "A Hybrid Algorithm Based on Fuzzy Linear Regression Analysis by Quadratic Programming for Time Estimation: An Experimental Study in Manufacturing Industry", *Journal of Manufacturing Systems*, 36, 182-188.
- Boyes, H., Hallaq, B., Cunningham, J. ve Watson, T. (2018). "The Industrial Internet of Things (IIoT): An Analysis Framework", *Computers in Industry*, 101, 1-12.
- Business Advantage Group (2019). "2018-19 Global CAD Trends", <https://www.business-advantage.com/2018-19%20Global%20CAD%20Trends%20-%20Version%201.0%20DOWNLOAD.pdf>, (Erişim Tarihi: 24.08.2021).
- Calp, M.H., Bahçekapılı, E. ve Berigel, M. (2018). "Endüstri 4.0 Kapsamında Akıllı Fabrikaların İncelenmesi", *The Fifth International Management Information Systems Conference*, October 24-26 2018, Ankara.
- Çakıt, E., Adem, A. ve Dağdeviren, M. (2020). "Endüstri 4.0 Ergonomi için Tehdit mi Fırsat mı?", *Verimlilik Dergisi*, 3, 43-57.
- Dağdeviren, M., Eraslan, E. ve Çelebi, F.V. (2011). "An Alternative Work Measurement Method and Its Application to a Manufacturing Industry", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24(5), 563-567.
- Dombrowsi, U. ve Wagner, T. (2014). "Mental Strain as Field of Action, In the 4th Industrial Revolution Variety Management in Manufacturing", *Procedia CIRP*, 17, 100-105.
- Ekinci, N. (2019). "Klasik, Neoklasik Teori, Sistem ve Durumsallık Yaklaşımları ile Bunların Karşılaştırılması ve Toplam Kalite Yönetimi İçerisindeki Yerlerinin Değerlendirilmesi", *Avrasya Sosyal ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 6(11), 16-38.
- Eraslan, E. (2009). "The Estimation of Product Standard Time by Artificial Neural Networks in the Molding Industry", *Mathematical Problems in Engineering*, 1-12.
- Ghafoorpoor Yazdi, P., Azizi, A. ve Hashemipour, M. (2018). "An Empirical Investigation of the Relationship between Overall Equipment Efficiency (OEE) and Manufacturing Sustainability in Industry 4.0 with Time Study Approach", *Sustainability*, 10(9), 3031.
- Ghafoorpoor Yazdi, P., Azizi, A. ve Hashemipour, M. (2019). "A Hybrid Methodology for Validation of Optimization Solutions Effects on Manufacturing Sustainability with Time Study and Simulation Approach for SMEs", *Sustainability*, 11(5), 1454.
- Günay, D. (2002). "Sanayi ve Sanayi Tarihi", *Mimar ve Mühendis Dergisi*, 31, 8-14.
- Hemalatha, A., Kumari, P.B., Nawaz, N. ve Gajenderan, V. (2021). "Impact of Artificial Intelligence on Recruitment and Selection of Information Technology Companies", *2021 International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS)*, March 2021, 60-66.
- Herter J. ve Ovtcharova, J. (2016). "A Model Based Visualization Framework for Cross Discipline Collaboration in Industry 4.0 Scenarios", *Procedia CIRP*, 57, 398-403.
- Hmoud, B. ve Laszlo, V. (2019). "Will Artificial Intelligence Take Over Humanresources Recruitment and Selection?", *Network Intelligence Studies*, 7(13), 21-30.
- Kagermann, H., Wahlster, W. ve Helbig, J. (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.
- Kılıç, S. ve Alkan, R. (2018). "Dördüncü Sanayi Devrimi Endüstri 4.0: Dünya ve Türkiye Değerlendirmeleri", *Girişimcilik İnovasyon ve Pazarlama Araştırmaları Dergisi*, 2(3), 29-49.
- Kitana, A. (2016). "Overview of the Managerial Thoughts and Theories from the History: Classical Management Theory to Modern Management Theory", *Indian Journal of Management Science*, 6(1), 16-19.
- Kurt, M. ve Dağdeviren, M. (2003). "İş Etüdü", Gazi Kitabevi, Ankara.

- Mahmood, Z. ve Basharad, M. (2012). "Review of Classical Management Theories", *International Journal of Social Sciences and Education*, 2(1), 514-517.
- Meyers, F.E. ve Stewart, J.R. (2002). "Motion and Time Study for Lean Manufacturing, Upper Saddle River", Prentice Hall, New Jersey.
- Muhlhäuser, M. (2007). "Smart Products: An Introduction", *AMI 2007 Workshops European Conference on Ambient Intelligence*, November, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 158-164.
- Nunes, M.L., Pereira, A.C. ve Alves, A.C. (2017). "Smart Products Development Approaches for Industry 4.0", *Procedia Manufacturing*, 13, 1215-1222.
- Oesterreich, T.D. ve Teuteberg, F. (2016). "Understanding the Implications of Digitisation and Automation in the Context of Industry 4.0: A Triangulation Approach and Elements of a Research Agenda for the Con-Struction Industry", *Computers in Industry*, 83, 121-139.
- Pamuk, N. ve Soysal, M. (2018). "Yeni Sanayi Devrimi Endüstri 4.0 Üzerine Bir İnceleme", *Verimlilik Dergisi*, 1, 41-66.
- Prokopenko, J. (2001). "Verimlilik Yönetimi: Uygulamalı El Kitabı", MPM Yayınları, Ankara.
- Redclift, M. (2005). "Sustainable Development (1987-2005): An Oxymoron Comes of Age", *Sustainable Development*, 13(4), 212-227.
- Rijsdijk, S.A. ve Hultink, E.J. (2009). "How Today's Consumers Perceive Tomorrow's Smart Products", *Journal of Product Innovation Management*, 26(1), 24-42.
- Sarıkulak, Ö. (2018). "Endüstri Devrimlerinin Performans Göstergelerine Etkilerinin İncelenmesi ile Endüstri 4.0 Analizi", Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Sayar, S. (2019). "Dijitalleşme ile Yeni Oluşan Kavramlar Endüstri 4.0, IOT ve Blockchain Uygulamaları", Yüksek Lisans Tezi, Maltepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Schneider, S. (2016). "The Industrial Internet of Things (IIoT)", *Internet of Things and Data Analytics Handbook*, Editör: Geng, H., Wiley, 41-81.
- Shao, Y., Ji, X., Zheng, M. ve Chen, C. (2021). "Prediction of Standard Time of the Sewing Process Using a Support Vector Machine with Particle Swarm Optimization", *AUTEX Research Journal*, DOI: 10.2478/aut-2021-0037.
- Sinan, A. (2016). "Üretim İçin Yeni Bir İzlek: Sanayi 4.0", *Journal of Life Economics*, 8, 19-30,
- Susanto, S., Tanaya, P.I. ve Soembagijo, A.S. (2012). "Formulating Standard Product Lead Time at a Textile Factory Using Artificial Neural Networks", *2012 2nd International Conference on Uncertainty Reasoning and Knowledge Engineering*, 99-104.
- Thames, L. ve Schaefer, D. (2016). "Software-Defined Cloud Manufacturing for Industry 4.0", *Procedia CIRP*, 52, 12-17.
- Tunzelmann, N.V. (2003). "Historical Coevolution of Governance and Technology in the Industrial Revolutions", *Structural Change and Economic Dynamics*, 14(4), 365-384.
- TÜSİAD (1994). "Türkiye'de ve Dünyada Yükseköğretim Bilim ve Teknoloji", Yayın No. 94.6-167, İstanbul.
- Westbrook, J.I. ve Ampt, A. (2009). "Design, Application and Testing of the Work Observation Method by Activity Timing (WOMBAT) to Measure Clinicians' Patterns of Work and Communication", *International Journal of Medical Informatics*, 78, 25-33.
- Wierschem, D.C., Jimenez, J.A. ve Mediavilla, F.A.M. (2020). "A Motion Capture System for the Study of Human Manufacturing Repetitive Motions", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110(3), 813-827.
- Yıldız, A. (2018). "Endüstri 4.0 ve Akıllı Fabrikalar", *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(2), 546-556.
- Yılmaz Kaya, B. ve Dağdeviren, M. (2019a). "Strategy Selection for Smoothing the Transition Period of Industry 4.0 Applications Implementation", *10th International Symposium on Intelligent Manufacturing and Service Systems*, Sakarya, Türkiye, 728-737.
- Yılmaz Kaya, B. ve Dağdeviren, M. (2019b). "A Guiding Analysis to Accomplish the Challenges for Implementation of Industry 4.0", *10th International Symposium on Intelligent Manufacturing and Service Systems*, Sakarya, Türkiye, 738-746.

TÜRKİYE'DEKİ BAKIM YÖNETİM ve KESTİRİMCİ BAKIM BİLİŞİM SİSTEMLERİNİN FİRMALARA ÖZGÜ DURUMLARI ÜZERİNE BİR SAHA ARAŞTIRMASI

Arafat Salih AYDINER¹, Burak KUBİLAY²

ÖZET

Amaç: Çalışmada, sanayideki dijital dönüşüm süreçleri ile Türkiye'de bakım yönetim ve kestirimci bakım bilişim sistemleri kullanımlarının firmaya özgü durumlar karşısındaki olası farklılıklarının incelenmesi amaçlanmıştır.

Yöntem: Ampirik yöntemin benimsendiği çalışmada, 641 bakım sektör profesyoneline uygulanan anket ile elde edilen veriler sistem ve bütüncül yaklaşımlar ışığında parametrik olmayan Kruskall Wallis ve Mann Whitney fark testlerine tabi tutulmuştur.

Bulgular: Bakım yönetim bilişim sistemleri, bakım performans göstergeleri ve kestirimci bakım bilişim sistemleri test değişkenlerinin firmaya özgü durumların kullanım şeklinin literatür ile paralel olan ve olmayan farklılıklar gösterdiği ve Türkiyede düşük verimlilik düzeyi olduğu yönünde bulgulara ulaşılmıştır.

Özgünlük: Makalede, çoğunlukla alt-sistem düzeyinde özel çalışmalara odaklanan literatürdeki boşluğa işaret edilerek bakım bilişim teknolojisi yatırımları, organizasyonel seviyede yapılan değerlendirmeler ile firmaya özgü durumlar ele alınmış, bilgisayarlı bakım yönetim ve kestirimci bakım bilişim sistemlerinin gösterdiği farklılığın yanı sıra bakım performans göstergelerinin bu iki değişkenle ilintisi bütüncül bir yaklaşım ile ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Bakım Yönetim Bilişim Sistemleri, Bakım Performans Göstergeleri, Kestirimci Bakım Bilişim Sistemleri.

JEL Kodları: L15, M11, M15.

A FIELD RESEARCH ON THE COMPANYS' SPECIFIC CONDITIONS OF MAINTENANCE MANAGEMENT AND PREDICTIVE MAINTENANCE INFORMATION SYSTEMS IN TURKEY

ABSTRACT

Purpose: This study is aimed to examine the possible differences between the use of maintenance management and predictive maintenance information systems in Turkey, which is an important research area with the digital transformation developments in the industry, against company-specific conditions.

Methodology: In the study, the empirical method was adopted. The data obtained by the survey questionnaire was applied to 641 maintenance sector professionals. Non-parametric Kruskall Wallis and Mann Whitney difference tests were applied for the data. System and holistic theoretical approaches are adapted.

Findings: It has been found that maintenance management information systems, maintenance performance indicators and predictive maintenance information systems test variables show differences in the way of using at company-specific conditions that there is a low level of productivity related to maintenance management in Turkey.

Originality: In the article, maintenance information systems` investments and company-specific conditions are evaluated by organizational level approach. The relationships between the variables are investigated in a holistic way. Also, the study introduces the gap in the literature, which mostly focuses on special studies at the sub-system level.

Keywords: Maintenance Management Information Systems, Maintenance Performance Indicators, Predictive Maintenance Information Systems.

JEL Codes: L15, M11, M15.

¹ Dr. Öğretim Üyesi, İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Siyasal Bilgiler Fakültesi, İşletme Bölümü, İstanbul, Türkiye, arafat.aydiner@medeniyet.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1133-5995 (Sorumlu Yazar-Corresponding Author).

² Yüksek Lisans Öğrencisi, İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Siyasal Bilgiler Fakültesi, İşletme Bölümü, burakkubilay01@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9467-0678.

1. GİRİŞ

Doğru bir bakım işletme yönetimine sahip olmayan organizasyonlar, düşük maliyet ile yüksek kalite ve hızlı teslimat talep eden pazarda geride kalmaktadır (Desirey, 2000). Ilangkumaran ve Kumanan (2012), endüstri türüne bağlı olarak, üretim maliyetlerinin %15-%70 arasındaki kısmının bakım işletme yönetimi ile bir şekilde ilintili olduğunu belirtmektedir. Üretim sürecinde hayati bir rol üstlenen bakım, kurumların hayatta kalmaları açısından vazgeçilmez bir unsur haline gelmiştir (Al-Najjar ve Alsyouf, 2004; Kans, 2008). Bu suretle, stratejik bir unsur olarak görülmelidir (Velmutuguran ve Dhingra, 2014). Teknolojinin gelişimi ve küresel talep tanımlamalarının değişikliğe uğraması nedeniyle organizasyon yapılarının farklılaşması bakım kaynaklarının optimal bir şekilde tahsisini güçleştirmektedir (Swanson, 2003). Paralel olarak, kurumların bakım örgütlenmeleri de ihtiyaçlar etkisiyle dönüşüm geçirmektedir. Genellikle bu süreçler, reaktif stratejilerinin terk edilerek ön alıcı stratejilere geçişi içermektedir. Bilgi teknolojileri ve sistemleri (BT/S) ile bakım işlevi arasındaki etkileşim de ön alıcı stratejilerin etkinliğinin artmasını sağlamıştır (Swanson, 2001). Gelişen sensör teknolojisinin sistemlerden toplanan verilerin niteliğini ve niceliğini artırması dijital dönüşüm süreçlerine önemli katkıda bulunmuştur. Ancak, ortaya çıkan boşucu veri denizinin (Pwc ve Mainnovation, 2017) düzenlenmesi, analiz edilmesi ve kaynakların tüm organizasyon taleplerine yanıt verebilecek şekilde planlanması da önemli sorunlardır. Bu noktada, karmaşıklık ve belirsizlik olguları önemli bir bakış açısı sunmaktadır (Swanson, 2003). Swanson (2003), bakım işlevinin üretim süreçlerinde yüzleşilen karmaşıklık ve belirsizlik ortamları ile farklı stratejiler uygulayarak başa çıktığını, gelişmiş üretim teknolojilerinin ise önleyici bakım, kestirimci bakım bilişim sistemleri (KBBS) ve bakım yönetim bilişim sistemleri (BYBS) gibi bakım sistemleri (BS) unsurları ile güçlü bir şekilde ilişkilendirildiğini ifade etmiştir. Diğer yandan, Swanson (2003), bakım yönetiminin önleyici/KBBS uygulamaları ile bilgiyi işleme ihtiyaçlarını azaltırken BYBS ve yatay organizasyon ilişkileri vasıtasıyla da bilgi işleme kapasitelerini geliştirdiklerini aktarmıştır. Sonuç olarak, BYBS ve KBBS'nin daha tahmin edilebilir ve yönetilebilir bir çalışma ortamı yaratmak suretiyle etkinliğin artırılmasına ve dijital dönüşüm sürecine destek verdiği ifade edilebilir. Kaynaklarda, varlıklar içine yerleştirilen sensörlerin sağladığı veriler ile anlık ve muhtemel gelece ksağlık durumlarını görüntüleme ve bunların daha da ötesinde meydana gelebilecek arızalara yapılacak optimal müdahale şekillerinin tarif edilmesini kapsayan öngörücü bakım yaklaşımlarının incelendiği, son yıllardaki araştırmaların ise tek donanım-donanım grubu özelinde geribildirim sağlayabilen KBBS üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Buna karşın, kaynaklarda yüzlerce makine parkurundan oluşan tesislerde toplanan verilerin yönetilmesi, koordinasyonu ve toplam bakım işletme verimliliğine ilişkin bütüncül bir çalışma olmadığı ve kaynaklarda bu konuda bir boşluk olduğu görülmektedir. Bu kapsamda Mathews ve diğerleri (2020), enerji üretim tesisleri özelinde yapılan çalışmaların çoğunun izole tek donanım üzerine yoğunlaştığını, tüm komplekse ilişkin öngörülerde bulunabilmek için alt sistemlerin müşterek etkilerinin görülmesinin önemli olduğunu aktarmıştır. Diğer yandan Accorsi ve diğerleri (2019), çoğu araştırmaların sürecin tek aşamasına yöneldiğini, binlerce alt sistemden oluşan günümüz karmaşık üretim organizasyonları için daha entegre yaklaşımlar gerektiğini ifade etmektedir. Bu hususlar, bütüne ilişkin amaçların nihai olduğunu vurgulayan sistem teorisi ile paralellik göstermektedir. (Koçel, 2011). Öte yandan, özü itibarıyla etkin dijital dönüşüm ve entegrasyon ile ilişkili olan bütüncül yaklaşım, BT/S kurum stratejisinin, yönetim kontrolü, kalite ve insan kaynakları işlevleri ile bütünleşmiş şekilde planlanması gerektiğini ifade etmektedir (Magalhaes, 2004). Bu hususlardan hareketle, dijital dönüşümün bakım işlevi uygulamalarında gelişiminin ve bu sürecin organizasyonun toplam verimliliğine sağladığı katkının net olarak görülebilmesi açısından çalışmada sistem ve bütüncül yaklaşımlar benimsenmiş ve bakım bilişim teknolojilerinin toplam organizasyonel verimlilik ile ilişkilendirildiği özgün bir model oluşturmak suretiyle literatüre katkıda bulunulmuştur.

Özetle, bakım sistemleri (BS) alt unsurlarının organizasyon ölçeğinde durumlarının tespit edilmesi ve bu sistemlerin organizasyonun toplam etkinliğine sağladığı katkının, sistem ve bütüncül perspektifler ile bakım performans göstergeleri temel alınarak değerlendirilmesi ve bakım hizmetlerinde dijital dönüşüm durumunun görülmesi çalışmanın temel amacını oluşturmaktadır. Bu kapsamda, ikinci bölümde BS ve bakım performans göstergeleri (BPG) test değişkenlerinin oluşturulması için kullanılan kaynaklar aktarılmış ve üçüncü bölümde araştırmada kullanılan tekniklere ilişkin ayrıntılı bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde ise saha araştırması ile elde edilen verilerin analizi sonucunda ulaşılan bulgular sunulmuştur. Son olarak beşinci bölümde bulguların değerlendirmesi yapılmış ve gelecek araştırma alanları ile ilgili öneriler paylaşılmıştır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. Bakım Yönetim Bilişim Sistemleri (BYBS)

Daha karmaşık tasarımlar nedeniyle yeni bakım teknikleri bulunması, bakım organizasyonlarında değişikliklere yol açmıştır. Bu kapsamda artan karmaşıklık ile başa çıkabilmek için BT/S'lerin imkanlarından faydalanılmıştır. Varlıkların güvenilirlik durumlarının ekonomik veri çıktıları sağlayabilen bir bakış açısı ile analiz edilmesi ve yaşam döngüsü maliyet hesapları için gerekli verilerin elde edilmesi, uygun bilgi

kaynaklarına sahip olmayı gerektirmektedir (ISO 14224, 2006). Bu kapsamda; bakım iş gücü hesaplamaları, yedek parça envanterlerinin takibi, onarım programları oluşturulması ve donanım geçmişlerinin takibi gibi eylemlere ilişkin verilerin yönetilmesine imkân veren BYBS ön plana çıkmaktadır (Ben-Daya ve diğerleri, 2009). BYBS, genel olarak bakım yönetimini otomatikleştirmekte, bakım departmanlarının üretkenliklerini arttırmakta (Majeed Ali, 2007) ve organizasyon dikey iletişim kanallarını güçlendirerek bakım bölümlerinin iletişim ve koordinasyon kabiliyetlerini arttırmalarını sağlamaktadır (Swanson, 2003). Ayrıca, gelişmiş BT/S ve iletişim vasıtaları desteğiyle organizasyon çalışanları ve organizasyon çözüm ortakları arasında etkin iletişim sağlayarak, fiziki mesafelerin ayırdığı bakım personeli / satıcılar / hizmet sağlayıcıları için problem çözüme ekip yaklaşımını desteklemektedir (Velmuguran ve Dhingra, 2014). Aşağıdakiler ile sınırlı olmamak üzere BYBS'nin sahip olduğu özellikler şunlardır (Lopes ve diğerleri, 2016:269; Swanson, 2003:62; Fumagalli ve diğerleri, 2009:1618; Azahar ve Mydin, 2014:56):

Varlık Yönetimi: Varlıkların, makine parkurlarının kaydının tutulmasını ve bakım/onarım işlemlerine ilişkin verilerin zamansal olarak veritabanlarına kayıt edilmesini sağlamaktadır.

İş Gücü Yönetimi: Planlama ve programlama işlevlerini otomatikleştirerek bakım yönetimine, bakım iş gücünün kontrol edilmesine ve gerektiğinde iş emirleri oluşturulması konusunda desteklemektedir.

Önleyici Bakım Yönetimi: Planlama ve programlama işlemlerini destekler, faaliyetlerin kontrolünü iyileştirir ve daha proaktif bir ortam sağlar.

Envanter Kontrolü: Kullanıcıların yedek parçaların durumu hakkında bilgi almasını kolaylaştıran bir işlevdir.

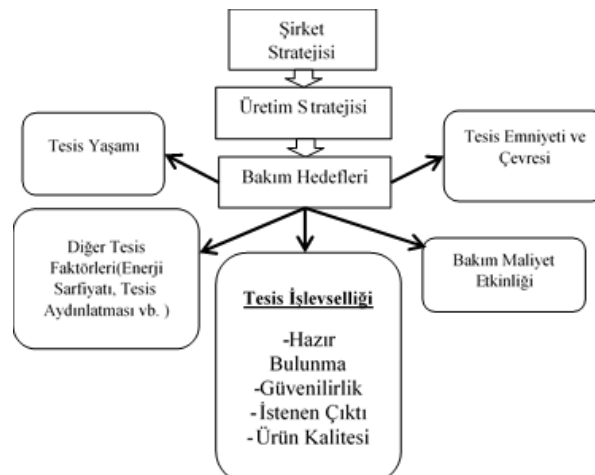
Rapor Yönetimi: Veri analizleri ve BPG'lere ilişkin raporlar sağlayarak bakım yönetimine destek verir.

Gider/ Bütçe Kontrolü: Bakım işletme bütçesinin ve giderlerin kontrol edilmesi imkanını sağlar.

Yukarıdaki işlevler göz önüne alındığında BYBS'nin organizasyon alt sistemleri özelinde münferit bir bakış açısı sağlamaktan ziyade, tüm bakım operasyonuna ilişkin veri ve bakım işletme kaynakları hakkında bütüncül bir perspektif sağlayarak dijital dönüşümü hızlandırdığını söylemek yanlış olmayacaktır. Bu kapsamda, Büroğul ve Koçer (2018), önbellekleme ile elektronik imza süreçlerinin dahil edildiği, müşteri geri bildirimlerinin alınabildiği işletme bakım maliyetlerini düşüren mobil ve web tabanlı bir bakım yönetim bilişim sistemi geliştirmişlerdir. Bıçakçı ve diğerleri (2020) ise çalışmalarında onarım faaliyetlerine ilişkin kararların verilmesi için kullanılan onarım ağ yapılarını gözden geçirmişler ve daha etkin olabilecek bir onarım seviyesi analizine ilişkin önerilerde bulunmuşlardır.

2.2. Bakım Performans Göstergeleri (BPG)

Bakımın tüm organizasyon verimliliğine etki edebilecek bir durumda olması bakım işletmesi özelinde isabetli kararların verilmesini önemli hale getirmektedir. Bu çerçevede, tesisin/varlığın arzu edilen verimi elde etmesini sağlama yükümlülüğü bulunan bakım yöneticisi, bakım süreçleri ve neticelerini kontrol edebilmek için isabetli bir bakım amaç tanımlamasına (Şekil-1) ve buna bağlı olarak etkin bir performans izleme sistemine gereksinim duymaktadır (Muchiri ve diğerleri, 2010:1). Tesislerde bulunan sistemlerin performans verileri ve düzeltilen/güncellenen bakım kararları arasında potansiyel bir bağ bulunmaktadır (Wijesinghe ve Mallawarachchi, 2019). BPG, genel başarıyı ölçmek için kullanılırlar ve beklentileri karşılama oranlarını gösterirler (Hastings, 2015). Bakım müdahalelerinin tesirleri yalnızca bakım departmanı üzerindeki etkileriyle gözlemlenemez.



Şekil 1. Bir bakım departmanı için özet bakım amaçları (Muchiri ve diğerleri, 2010: 3)

Diğer yandan, doğrudan bakım maliyetlerine odaklanılması da eksik bir perspektif sunmaktadır. Alsyouf (2006), bütüncül bir bakım performans ölçümü için:

- Bakım işlevinin stratejik iş hedeflerine katkısını değerlendiren,
- Uygulanan bakım stratejisinin kuvvetli ve zayıf taraflarını tanımlayan,
- Nicel ve nitel veriler ile desteklenen, kapsamlı bir bakım onarım geliştirme stratejisi için sağlam bir çerçeve oluşturan,
- Bakım işletme ve performans karşılaştırmasına ilişkin kıstasları en iyi sektör ve sektör dışı uygulamalar ile tekrar gözden geçiren bir bakım performans değerlendirme sistemi oluşturulması gerektiğini ifade etmiştir.

Günümüzün açık sistem üretim organizasyonları, bakımı stratejik bir rekabet kaynağı (Şekil-2) ve organizasyon sistemi olarak görme eğilimindedir (Simoes ve diğerleri, 2011).

Kutucuoğlu ve diğerleri (2001: 181), dengeli bir bakım performans ölçüm sisteminin beş başlık altında toplamışlardır:

- Donanıma ilişkin performans,
- Göreve ilişkin performans,
- Maliyete ilişkin performans,
- Anlık müşteri etkisiyle ilişkili performans,
- Öğrenme ve büyümeyle ilişkili performans

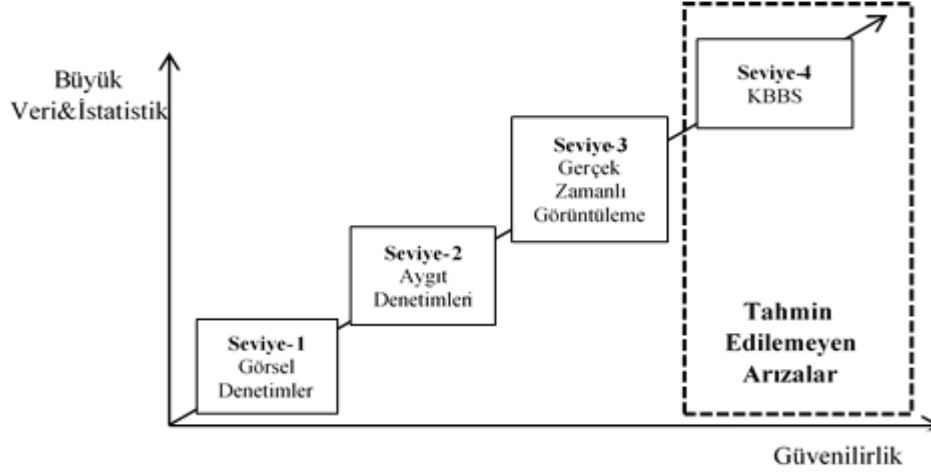
Sahip olunan bakım yönetim bilişim sistemleri varlıklarının, tüm organizasyon performansına etkileyen bakım işletme verimliliği üzerindeki etkileri ve toplam katma değerlerinin bakım performans göstergeleri yardımıyla daha sağlıklı bir şekilde görülebileceği değerlendirilmektedir. Bu suretle, bakım yönetim bilişim sistemlerinden beklenen yatırım geri dönüşlerinin gerçekleşme oranları daha net tespit edilebilecek ve sistemde yaşanan sürtünmelere zamanında müdahale edilebilecektir.



Şekil 2. Bakım faaliyetlerinin gelişiminin evrimi (Simoes ve diğerleri, 2011: 129)

2.3. Kestirimci Bakım Bilişim Sistemleri (KBBS)

Koşul temelli bakım stratejisinin geliştirilmiş şekli olan KBBS son yıllarda büyük ilgi çekmektedir (Zonta ve diğerleri, 2020). KBBS, bakım eğitimine ilişkin yatırımlar, personel arası rekabetin artırılması, BYBS ve durum görüntüleme teknolojisinin yaygın kullanımı, arızalara ilişkin analizleri, arıza modları, arıza etkileri, arıza kritiklik analizleri ve istatistiksel modelleme gibi güvenilirlik merkezli bakım stratejisi kapsamında benimsenen metodların kullanılması ile özdeşleştirilir (Gulati ve Smith, 2009). Büyük verinin kullanımı ve bilişim sistemlerinin artan gelişimi ile anılan Endüstri 4.0, gerçek zamanlı verilere göre karar alma ve erken arıza tespiti kabiliyetlerini artırarak KBBS'yi desteklemektedir (Rousopoulou ve diğerleri, 2020).



Şekil 3. KBBS olgunluk endeksi (Pwc ve Mainnovation, 2017)

Pwc ve Mainnovation firmaları, bakım yönetiminde büyük veri analitiğinin uygulanmasının KBBS evrim modelinde dördüncü seviyeyi temsil ettiğini ifade etmişler ve bunu "Kestirimci Bakım 4.0" olarak isimlendirmişlerdir (Şekil-3). "Kestirimci Bakım 4.0" ın içeriğinin, cihaz teknik durumu, kullanımı, çevrenin durumu, bakım geçmişi, benzer donanımların durumları gibi ve bir donanımın performansı ile ilgili olabilecek tüm büyük verilere gelişmiş veri analiz teknikleri uygulayarak gelecekte meydana gelebilecek arızaları tahmin etmek ile ilişkili olduğunu ifade etmektedirler (Pwc ve Mainnovation, 2017). Jimenez ve diğerleri (2020), KBBS'yi, beklenmedik durumların önüne geçmek amacıyla arızaların kök nedenlerini ve sistemin sağlık durumunu görüntülemeyi amaçlayan tanisal (diagnostics) ve sistemin gelecekteki durumu ve kalan faydalı ömrünün kestirilmesi için kullanılan belirtisel (prognostics) yöntemler olmak üzere iki başlıkta incelemiştir.

Bottani ve diğerleri, (2014: 145) ve Alsyouf (2009: 220) KBBS'yi ölçümlemek için İtalyan ve İsveç sanayilerinde yürüttükleri saha araştırmalarında aşağıdaki değişkenleri kullanmışlardır:

- Bakım ekibinin yeteneklerinin ve rekabet seviyesinin artırılması için kaynak ayrılmıştır.
- BYBS yaygın şekilde kullanılmaktadır.
- Donanımların olası risklerini belirlemek amacıyla çevrim-dışı testler gerçekleştirilmektedir.
- Donanımların olası risklerini belirlemek amacıyla çevrim-içi testler gerçekleştirilmektedir.
- Donanımın belirli performans ölçütleri göz önüne alınarak bakım planlaması yapılmaktadır.
- Bakım faaliyetleri istatistiksel arıza verileri göz önüne alınarak planlanmaktadır.

Kızrak ve Bolat (2019), çalışmalarında LTSM bellek yapısını kullanarak uçak motorlarının kalan yaşam ömrünü tespit edebilen bir kestirimci bakım bilişim sistemi önerisinde bulunmuşlardır. Ilgın ve diğerleri (2016) ise istatistiksel süreç kontrolü prensiplerinden yararlanarak bir kestirimci bakım bilgi sistemi geliştirmişlerdir. Özetle, KBBS'nin tek donanım veya benzer donanım grubu için sağladığı katkılar son yıllarda dijital dönüşüm ve bakım alanında gerçekleştirilen akademik çalışmaların odağındadır. Diğer yandan, bakım yönetim bilişim sistemlerinin kolektif olarak bakım işletme verimliliğine verdiği katkıya ilişkin bütüncül çalışmaların eksikliği konu hakkında önemli soru işaretleri doğurmaktadır.

2.4. Firmaya Özgü Durumlar

Sektörler: Bilişim teknolojilerinden (BT) yararlanma konusunda bazı sektörler daha etkin davranmaktadır (Aydiner ve Tatoğlu, 2019). Bu husus göz önüne alındığında, bakım BT'lerinin sektör bazındaki durumunu irdelemenin sektörlerin bakım BT kullanım durumlarını görmek açısından katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Katılımcılar: Bakım yöneticileri organizasyonlarda planlama ve stratejilerin belirlenmesi konusunda karar verici görevi üstlenmektedir. Bu suretle, yönetici pozisyonunda çalışan profesyonellerden elde edilecek verilerin isabetli olması ihtimali daha fazladır (Swanson, 1997).

Faaliyet Alanı: Çoğunlukla kamuya ait organizasyonlar, risk alma ve ön görücü yaklaşım sergileme hususlarında özel sektör kurumlarına kıyasla daha az isteklidir (Zhou ve diğerleri, 2008).

Firma/Tesis Özellikleri: Organizasyon yıllık bütçesi, kurum çalışan sayısı ve firma/tesis yaşı firma/tesis özellikleri kapsamındadır (Swanson, 1997). Bu kapsamda, çalışan sayısı ve yıllık bütçe, şirketin büyüklük ölçütleri olarak kabul edilmektedir. Bu kapsamda, 18.11.2005 tarihli KOBİ Yönetmeliği Türkiye'de faaliyet gösteren işletmeleri bütçe ve çalışan sayılarına göre büyük, orta, küçük ve mikro işletme olarak tasnif

etmektedir (Bakanlar Kurulu, 2005). Aydın ve Tatoğlu (2019) çalışmalarında firma büyüklüğünün işletme performansına etkisinin olabileceğini ifade etmişlerdir. Diğer yandan, Mani ve diğerleri (2010), büyük şirketlerin bilgi kapasitelerini arttırmak için genellikle küçük firmalara oranla daha fazla mali ve beşeri kaynak kullandığını ifade etmişlerdir. Bunun yanında, deneyimli firmaların sahip oldukları tecrübe avantajı ile kendi gelişimleri sürdürme konusunda genç firmalara oranla daha yüksek avantaja sahip oldukları söylenebilir (Chen ve diğerleri, 2015). Ancak, deneyimli organizasyonların sosyal eylemsizlik nedeniyle yeni teknolojilere yatırım yapmaktan kaçınmaları da söz konusu olabilir (Aydın ve Tatoğlu, 2019).

Bakım Departmanı Özellikleri: Yıllık bakım bütçesi, bakıma tabi donanımın ortalama piyasa değeri toplamı, makinelerin ortalama yaşı, bakım personel sayısı ve saha personelinin kullanılma şekli bakım departmanı özellikleri kapsamına alınmıştır.

2.5. Çalışmanın Dayandığı Teoriler

Sistem yaklaşımında, yapıları başka yapılar ile bağlantılarını göz önüne alarak incelemenin daha doğru olacağı ileri sürülmektedir. Bu "Bütüncü" bakış açısının yönetim bilimine tesir etmesi sonucunda "Sistem Yaklaşımı" adı verilen yeni bir teori ortaya çıkmıştır (Koçel, 2011). Buna göre, belirli parçalardan oluşan bütüne sistem adı verilmektedir. Bütünü oluşturan alt bileşenlerin ise kendine has işleyişleri vardır ve alt sistemlerin etkinlikleri de birbirlerine bağlıdır. Sistem yaklaşımı, alt bileşenleri ve aralarındaki ilişkileri bir arada incelemekte ve ana sistemin çıktısının alt sistemlerin kümülatif münferit çıktılardan daha fazla olduğunu öne sürmektedir. Sistem yaklaşımına ait iki husus, bu çalışmanın önemli dayanak noktalarını teşkil etmektedir. Birincisi, yönetim biliminde organizasyonun ana (esas) sistem olduğu (Koçel, 2011: 249) ve ana sistemin birbirleri ile ilintili ve karşılıklı bağımlı alt parçalardan meydana geldiği olgusudur. Bundan hareketle, araştırma kapsamında, BYBS ve KBBS donanımlarının verimliliğine odaklanmak yerine, organizasyonel seviye temel alınmıştır. İkincisi, sistemin alt bileşenleri arasındaki etkileşime ve sistemin toplam çıktısına odaklanılmasıdır. Bu suretle, çalışmada BYBS ve KBBS yatırımları ve organizasyonun BPG'leri incelemeye alınmıştır.

"Örgütsel Bütünlük" perspektifi, BT/S'lerin geliştirme döngüleri tamamlandığında sona eren "tek seferlik" bir olay olmadığını öne sürmektedir. Bilişim sistemlerinin organizasyonlarda tatbik edilmesi, münferit hadiseler / olay serileri veya anlık çözümlenmelere indirgenmemeli, devamlı sonuçlara yol açan, çözümsel vasıtalar ile derinlemesine irdelenmesi icap eden bir süreç olarak görülmelidir (Magalhaes, 2004: 2). Başka bir ifadeyle, bu yaklaşımda çoğunlukla kurum yöneticilerinin, danışmanların ve hatta eğitmenlerin BT/S projelerinin sosyal/örgütsel perspektifini göz ardı ettiği ve bu konulara salt teknik hususlar olarak baktığı öne sürülmektedir. Bu suretle, kurumlarda, verimli BS idaresi için stratejik planlanma, yönetsel kontrol, kalite ve insan kaynakları unsurları ile bütünleşme önem arz etmektedir. BYBS ve KBBS'yi salt donanım edinimleri olarak gören organizasyonlarda, iç çevredeki sürtünmeler nedeniyle, bu yatırımların bakım işletme performansına etkisi sınırlıdır. Çalışmada bu teori ışığında BYBS ve KBBS'nin BPG ile olan ilişkileri değerlendirilmiştir.

3. YÖNTEM

Türk sanayilerinde bakım sistemlerinin kullanımlarının ve BPG'lerinin ölçülmesi araştırmanın genel amacını oluşturmaktadır. Bottani (2014), Alsyouf (2009) ve Swanson (2003)'ün benzer çalışmalarında ampirik yöntemin benimsendiği görülmüş ve araştırma modeli bu husus göz önüne alınarak oluşturulmuştur. Diğer yandan, sistem ve bütüncül yaklaşımlar organizasyonu temel alan araştırma modelinin genel çerçevesini oluşturmaktadır.

3.1. Araştırma Modeli

Kaynak taraması, saha araştırmaları, bakım profesyonellerinin geri bildirimleri ve gerçekleştirilen analizler neticesinde belirlenen BYBS, KBBS ve BPG test değişkenlerinin firmaya özgü durumlarda gösterebileceği olası farklılıkların ölçülmesi hedeflenmiş ve ampirik araştırma modeli oluşturulmuştur. Diğer yandan, bilimsel araştırmalarda tespit edilen boşluklara dikkat çekmek ve gelecek araştırmalar için önerilerde bulunmak üzere kavramsal tespitlerde bulunulmuştur. Şekil-4'te sunulan araştırma modelinin birinci aşaması, test değişkenleri ve grup test değişkenleri verilerinin saha araştırması ile toplanmasını içerir. İkinci aşama ise test değişkenlerinin grup değişkenlerinde gösterdiği olası farklılıkların incelenmesi sürecini kapsamaktadır.



Şekil 4. Araştırma modeli

3.2. Evren ve Örneklem

Gelişmekte olan ülkeler ligindeki Türkiye'nin BT/S yatırımları konusunda önemli bir potansiyeli bulunmaktadır ve Türkiye'de bakım faaliyeti yürüten organizasyonların tümü araştırma evreni olarak belirlenmiştir. Kaynak kıtlığı, operasyonel ve hukuki nedenler organizasyonların tümüne ulaşma şansını engellediğinden araştırma örnekleme yöntemi kullanmak suretiyle yürütülmüştür. Örneklem içerisindedir sektör, faaliyet alanı ayrımı yapılmamıştır.

3.3. Veri Toplama Araçları

Pandemi süreci nedeniyle çevrimiçi kesitsel anket yöntemi tercih edilmiştir. Anketin birinci (giriş) bölümünde, 6698 sayılı KVKK mevzuatı uyarınca oluşturulan aydınlatma metni, araştırma hakkında bilgi veren bir ön söz ve etik kurul onay belgesi alt bölümleri yer almaktadır. İkinci, üçüncü ve dördüncü bölümlerde sırasıyla BYBS, KBBS ve BPG test değişkenlerine ilişkin sorular bulunmaktadır. Bu sorularda kullanılan ölçekler literatürden edinilmiş ve cevaplar 5'li Likert ölçeğinden (1=Kesinlikle Katılmıyorum, 5=Kesinlikle Katılıyorum) yararlanılarak oluşturulmuştur. Paralel olarak beşinci bölümde, firmaya özgü durum bilgilerinin toplanması amacıyla kaynaklardan alınmış ölçekler yardımıyla oluşturulmuştur.

3.4. Veri Toplama Süreci

Değişkenler, Qualytrics programı kullanılarak on-line anket formuna getirilmiştir. Müteakiben, bir ön test uygulaması gerçekleştirilmiştir (Presser ve diğerleri, 2004). Bu kapsamda anket üç akademisyen ve üç sektör profesyonelinin incelemesine sunulmuş ve geri bildirimler doğrultusunda revize edilmiştir. Müteakiben, 62 kurum/kuruluş ve 112 bakım profesyoneline on-line pilot anket dağıtımı gerçekleştirilmiştir. Dağıtım kanalları olarak sosyal medya ve kurumsal e-posta adresleri tercih edilmiştir. İkinci bölümde belirtilen hususlar ile paralel olarak anketin mümkün olduğunca yöneticilik görevlerinde bulunan profesyonellere gönderilmesine özen gösterilmiştir. Toplam 127 kişi tarafından yanıtlanan anket çalışması 4 ay sürmüştür. Süreç sonunda yapılan kontrollerde 72 gözlemin eksik verilerden oluştuğu, kalan 55 gözlemin ise analize elverişli olduğu anlaşılmıştır. Veriler, SPSS programı kullanılmak suretiyle sırasıyla faktör ve güvenilirlik analizlerine tabi tutulmuştur. Analizler sonucunda 61 anket sorusunun 21'i elenmiş ve esas saha çalışmasında kullanılacak 40 soruluk ana çerçeve oluşturulmuştur. Pandemi sürecinde dağıtım kanalları olarak sosyal medya ve elektronik posta kullanılmıştır. Edinilen tecrübeler ışığında yeni bir anket dağıtım tekniği geliştirilmiş ve farklı sanayi dallarından binlerce sektör profesyoneli ile iletişim kurma imkânı veren LinkedIn sosyal medya platformu arama sayfasında, "Kestirimci Bakım" ve "Bakım Mühendisi" anahtar kelimeleri ile "Kişiler" sekmesi üzerinden özel mesajlar gönderilmiş ve anket linki paylaşılmıştır. Veri toplama sürecinde, bireysel temasın ve bu kapsamda oluşturulan anket dağıtım tekniğinin cevap alma oranını belirgin şekilde artırmış olduğu görülmüştür. Bunun yanında yoğun saha tecrübesine sahip olan bakım profesyonelleri ile sağlanan etkileşim, nitelikli geri bildirimlerin alınmasını sağlamıştır. Ön test safhası ile paralel olarak, anket dağıtımının mümkün olduğunca yöneticilik yürüten kişilere yapılmasına özen gösterilmiştir. Neticede, toplamda 641 gözlem elde edilmiş, yapılan inceleme ile bunların 380'inin cevaplanmayan anket soruları içermesi nedeniyle elenmesi gerektiği anlaşılmıştır. Müteakiben yapılan analizlerde 2 tam yanıtlanan gözlemin anlamsal bütünlükten yoksun şekilde cevaplanmış olması nedeniyle örneklemden çıkarılması gerektiği tespit edilmiş ve son olarak 259 adet analize hazır gözlem elde edilmiştir.

3.5. Değişkenlerin Ölçümü

BYBS değişkeni, Swanson (2003) ve Fumagalli ve diğerleri (2009)'nin çalışmalarında kullandıkları soru setleri ile toplamda 18 soruluk BYBS anket bölümü oluşturulmuştur. Pilot anket veri analizleri sonucunda bu soruların sayısı 17'ye indirilmiş ve esas ankette kullanılmıştır. Son olarak esas anket sürecinde elde edilen verilerin tekrar analiz edilmesi sonucunda toplamda 9 soru elenmiş ve BYBS test

değişkenleri elde edilmiştir (Tablo 2) (Lopes ve diğerleri, 2016: 269; Swanson, 2003: 62; Fumagalli ve diğerleri, 2009: 1618; Azahar ve Mydin, 2014: 56).

Wijesinghe ve Mallawarachchi (2019:47), giyim endüstrisinde kullanılan BPG'leri 27 başlık altında toplamışlardır. Bu ölçütler, Türk sanayilerinde geçerlilik oranlarının görülmesi maksadıyla pilot araştırma anketi kapsamına alınmıştır. Pilot anket çalışması sürecinde bakım profesyonellerinin geri bildirimleri ve anketten elde edilen verilerin analiz edilmesi neticesinde, 21 adet bakım performans ölçütü soru grubundan çıkarılmış ve esas anket çalışması için 6 soruluk bir bölüm elde edilmiştir (Tablo 2) (Wijesinghe ve Mallawarachchi, 2019:47).

Bottani ve diğerleri, (2014: 145) ve Alsyouf (2009: 220)'un çalışmalarındaki değişkenler pilot ankete dahil edilmiş, bakım profesyonellerinin görüşleri ve gerçekleştirilen analizler neticesinde herhangi değişiklik yapılmamış ve esas anket sürecinde de aynı sorular kullanılmıştır. Esas anket süreci sonunda ise, verilerin analiz edilmesi ile toplam 1 adet soru elenmiştir. Ek olarak, BYBS anket sorularından 1'i faktör analizleri neticesinde KBBS faktörüne dâhil olmuştur (Tablo 2). Tablo 2'te 6'ncı sırada gösterilen değişken, Azahar ve Mydin (2014:56)'in BYBS özellikleri arasında yer almasına rağmen, saha araştırması sonucunda gerçekleştirilen faktör ve güvenilirlik analizleri ile KBBS test değişkenlerine dâhil olmuştur. Bu durumun, katılımcıların Şekil-3'te aktarılan "Seviye-3: Gerçek Zamanlı Görüntüleme Özelliği" ile ilişkilendirilmesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir (Bottani ve diğerleri, 2014:145; Alsyouf, 2009: 220).

Tablo 1. Faktör yükleri

Bileşenler	1	2	3
Sistemimiz ile planlı/ plansız bakım faaliyetleri ve bu faaliyetlerin son durumları izlenebilmektedir.	0,818	0,301	0,042
Sistemimizde donanım bakım/onarım geçmiş görülebilmektedir.	0,764	0,379	0,029
Sistemimiz ile iş emirleri geriye dönük olarak izlenip takip edilebilmektedir. (Gün, Müdahale Eden Kişi vs.)	0,748	0,394	0,031
Sistemimiz ile planlama yapıp önleyici bakım iş emri çıkarıyoruz.	0,696	0,113	0,319
Sistemimiz ile iş emri verilebilmekte, iş önceliklendirme ve donanımla/bileşenle iş izlemesi yapılabilmektedir.	0,661	0,200	0,199
Bakım talimatları ve garanti kapsam bilgileri bakım sistemimizde muhafaza edilebilmektedir.	0,651	0,247	0,249
Tüm teknik mevzuatı bakım sistemimizde bulundurabiliyor ve istediğimizde erişim sağlayabiliyoruz.	0,558	0,069	0,425
Bakım yapılan cihazların verim seviyeleri tatmin edici düzeydedir.	0,271	0,780	0,212
Gerçekleştirdiğimiz bakımların güvenilirlik derecesi yüksektir.	0,275	0,775	0,205
Tüm iş emirleri göz önüne alındığında sonuçlandırılmış iş emirlerinin oranı yüksek ve tatmin edicidir.	0,357	0,711	0,252
Planlanan zamanda başlayan iş emirleri oranı yüksektir.	0,164	0,706	0,335
Tamamlanan iş emirleri konusunda olumlu geri dönüşler alıyoruz.	0,346	0,670	0,270
Sistemimizin etkinliği sayesinde iş gücü yönetimi optimal seviyededir.	0,325	0,527	0,492
Teknik Teçhizatın olası arıza risklerini tanımlamak için çevrim içi (Internet) testler yapılmaktadır.	0,082	0,083	0,847
Teknik teçhizatın olası arıza risklerini tanımlamak için çevrim dışı(Intranet) testler yapılmaktadır.	0,073	0,168	0,777
Bakım sisteminde IOT-Internet of Things (Nesnelerin İnterneti) kullanılarak anlık bilgi akışı sağlanmaktadır.	0,115	0,279	0,668
İstatistiksel arıza verilerinin analizi (Data analysis) ile kestirimci (Predictive) bakım uygulamaları gerçekleştiriyoruz.	0,270	0,360	0,575
Devam eden bakımlarda, cihazlara müdahale esnasında donanımın gerçek zamanlı durumunu izleme/görüntüleme imkân kabiliyetimiz mevcuttur. (Real-Time monitoring)	0,197	0,261	0,545
Teknik teçhizatın, belirli performans göstergeleri dikkate alınarak gelecekte oluşabilecek arızalara karşı bakım planlaması yapılabilmektedir.	0,304	0,366	0,527

Organizasyonlara ilişkin durumlar altında değerlendirilen başlıklar ve Swanson (1997:12)'un çalışması göz önüne alınarak 11 adet grup değişkeni belirlenmiştir. Müteakiben grup değişkenleri, bakım

profesyonellerinin görüşleri, pilot ve esas anket çalışmalarına ilişkin analizler sonucunda Tablo 4'teki son haline getirilmiştir (Swanson,1997: 12).

3.6. Analiz ve Bulgular

BYBS, BPG ve KBBS'nin değişken haline getirilmesi maksadıyla veriler sırasıyla faktör ve güvenilirlik analizlerine tabi tutulmuştur. Faktör analizi kapsamında örneklem sayısının ($KMO=0,923>0,800$), değişkenler arasındaki ilişkinin ve toplam varyansın açıklanma oranının ($\%61,88>0,500$) uygun olduğu (Bartlett küresellik testi p değeri = 0,000 ve $\%5$ anlamlılık seviyesinde) tespit edilmiş (Durmuş ve diğerleri, 2018) ve faktör yük tablosu oluşturulmuştur (Tablo 1). Güvenilirlik analizi sonucunda elde edilen değerler ise Tablo 2'de sunulmuştur.

Buna göre, BYBS, BPG ve KBBS faktörlerine ilişkin Cronbach's Alpha değerleri sırasıyla 0,875; 0,898; 0,834 ve tümü 0,7'nin üzerinde olup, mevcut değişkenlerin elenmesi ile bu değerlerin artmadığı görülmektedir (Tablo 2). Müteakiben, faktör skor hesaplaması ile BYBS, KBBS ve BPG test değişkenleri oluşturulmuş ve verilerin normal dağılımını test etmek için Kolmogorov-Smirnov testi uygulanmıştır.

Tablo 2. Güvenilirlik analiz testi değerleri

BYBS FAKTÖRÜ		BPG FAKTÖRÜ		KBBS FAKTÖRÜ	
$\alpha^{(1)} = 0,875$		$\alpha^{(1)} = 0,898$		$\alpha^{(1)} = 0,834$	
Değişkenler	$\alpha^{(2)}$	Değişkenler	$\alpha^{(2)}$	Değişkenler	$\alpha^{(2)}$
Sistemimiz ile planlama yapıp önleyici bakım iş emri çıkarıyoruz.	0,860	Tamamlanan iş emirleri konusunda olumlu geri dönüşler alıyoruz.	0,879	Devam eden bakımlarda, cihazlara müdahale esnasında donanımın gerçek zamanlı durumunu izleme/görüntüleme imkân kabiliyetimiz mevcuttur. (Real-Time monitoring)	0,825
Sistemimiz ile iş emri verilebilmekte, iş önceliklendirme ve donanımla /bileşenle iş izlemesi yapılabilmektedir	0,865	Sistemimizin etkinliği sayesinde iş yönetimi optimal seviyededir.	0,887	Bakım sisteminde IOT- Internet of Things (Nesnelerin İnterneti) kullanılarak anlık bilgi akışı sağlanmaktadır.	0,806
Sistemimiz ile iş emirleri geriye dönük olarak izlenip takip edilebilmektedir. (Gün, Müdahale Eden Kişi vs.)	0,851	Tüm iş emirleri göz önüne alındığında sonuçlandırılmış iş emirlerinin oranı yüksek ve tatmin edicidir.	0,874	Teknik teçhizatın olası arıza risklerini tanımlamak için çevrim dışı (Intranet) testler yapılmaktadır.	0,798
Sistemimiz ile planlı/ plansız bakım faaliyetleri ve bu faaliyetlerin son durumları izlenebilmektedir.	0,844	Gerçekleştirdiğimiz bakımların güvenilirlik derecesi yüksektir.	0,881	Teknik Teçhizatın olası arıza risklerini tanımlamak için çevrim içi (Internet) testler yapılmaktadır.	0,793
Bakım talimatları ve garanti kapsam bilgileri bakım sistemimizde muhafaza edilebilmektedir.	0,857				
Tüm teknik mevzuatı bakım sistemimizde bulundurabiliyor ve istediğimizde erişim sağlayabiliyoruz.	0,875	Bakım yapılan cihazların verim seviyeleri tatmin edici düzeydedir.	0,879	Teknik teçhizatın, belirli performans göstergeleri dikkate alınarak gelecekte oluşabilecek arızalara karşı bakım planlaması yapılabilmektedir.	0,812
Sistemimizde donanım bakım/onarım geçmişi görüntülenebilmektedir.	0,849	Planlanan zamanda başlayan iş emirleri oranı yüksektir.	0,885	İstatistiksel arıza verilerinin analizi (Data analysis) ile kestirimci (Predictive) bakım uygulamaları gerçekleştiriyoruz.	0,806

Not: Tabloda $\alpha^{(1)}$ olarak ifade edilen Cronbach's Alpha değeri, $\alpha^{(2)}$ olarak ifade edilen ise Cronbach's Alpha If Item Deleted değeridir.

Tablo 3. Normallik testi değerleri

<i>Değişkenler</i>	<i>Kolmogorov-Smirnov^a</i>			<i>Shapiro-Wilk</i>		
	<i>İstatistik</i>	<i>Serbestlik Derecesi</i>	<i>Anlamlılık Düzeyi</i>	<i>İstatistik</i>	<i>Serbestlik Derecesi</i>	<i>Anlamlılık Düzeyi</i>
BYBS	0,149	259	0,000	0,883	259	0,000
BPG	0,131	259	0,000	0,910	259	0,000
KBBS	0,086	259	0,000	0,974	259	0,000

Test değişkenleri istatistiksel anlamlılık değerleri sıfıra eşit ve %5 güven aralığında olduğundan verilerin normal dağılıma sahip olmadığı (Tablo3) ve test değişkenlerinin grup değişkenlerindeki farklılığını bulabilmek için parametrik olmayan Kruskal Wallis ve Mann Whitney testleri kullanılması gerektiği anlaşılmıştır. Bu suretle, üç gruptan oluşan sektör ve bakım personeli ağırlıklı kullanıma şekli değişkenlerinde Kruskal Wallis ve Post-Hoc testleri, iki gruptan oluşan faaliyet alanı, yıllık bütçe, tesiste çalışan personel sayısı, yıllık bakım bütçesi, bakım yapılan makinelerin toplam piyasa değeri ve bakım personel sayısı değişkenlerinde ise Mann Whitney testi uygulanmıştır. Analizlere ilişkin değerler Tablo 4'te sunulmuştur. Tablo 5'te ise araştırma modeline göre oluşturulan denencelerin test sonuçları aktarılmıştır.

Tablo 4. Farklılık analizlerine ilişkin değerler

İfadeler ⁽¹⁾⁽²⁾	İstatistik			Firmaya Özgü Durumlar	Ortalama Değerler / Sıralama								
	BYBS	BPG	KBBS		BYBS			BPG			KBBS		
					Enerji ve Lojistik	İmalat	Diğer	Enerji ve Lojistik	İmalat	Diğer	Enerji ve Lojistik	İmalat	Diğer
Aşağıdaki sektörlerden size en uygun olanını seçiniz. ⁽¹⁾	0,022*	0,019*	0,018*	Enerji ve Lojistik	-	-0,154	-0,400*	-	-0,122	-0,396*	-	0,174	-0,220
				İmalat	0,154	-	-0,246*	0,122	-	-0,274*	-0,174	-	-0,395*
				Diğer	0,400*	0,246*	-	0,400*	0,274*	-	0,220	0,395*	-
Aşağıdakilerden hangisi firmanızın/tesis(ler)inizin faaliyet gösterdiği alanı temsil etmektedir? ⁽²⁾	0,025*	0,093	0,464	Kamu		104,46		-	-	-	-	-	-
				Özel		134,26		-	-	-	-	-	-
Firmanızın/Tesis(ler)inizin yıllık bütçesi hangi aralıkta yer almaktadır? ⁽²⁾	0,025*	0,487	0,532	125 milyon TL veya daha az		121,32		-	-	-	-	-	-
				125 milyon TL'den fazla		142,53		-	-	-	-	-	-
Firmanızda/Tesis(ler)inizde çalışan personel sayısı hangi aralıktadır? ⁽²⁾	0,006*	0,051	0,804	249 ve daha az		112,84		-	-	-	-	-	-
				250 ve daha fazla		139,45		-	-	-	-	-	-
Firmanızın/Tesis(ler)inizin yıllık bakım/onarım bütçesi hangi aralıktadır? ⁽²⁾	0,030*	0,081	0,037*	10 milyon TL veya daha az		123,01		-	-	-	-	123,30	
				10 milyon TL'den fazla		144,56		-	-	-	-	143,95	
Firmanızın/Tesis(ler)inizde bulunan ve bakım/onarım yapılan makinelerin ortalama piyasa değeri toplamı hangi aralıkta yer almaktadır? ⁽²⁾	0,001*	0,821	0,036*	5 milyon TL veya daha az		96,56		-	-	-	-	151,50	
				5 milyon TL'den fazla		136,84		-	-	-	-	125,60	
Bakım/Onarım ekibinde görevli çalışan sayısı hangi aralıktadır? ⁽²⁾	0,015*	0,032*	0,057	49 veya daha az		121,51			122,52			-	
				50 veya daha fazla		144,90			143,13			-	
Bakım/Onarım faaliyetlerinde saha personelinin ağırlıklı kullanıma şekli nedir? ⁽¹⁾	0,037*	0,003*	0,000*	Grup	Acil Müdahale Çalışması	Planlı Bakım Çalışması	Bekleyen İş Emirleri	Acil Müdahale Çalışması	Planlı Bakım Çalışması	Bekleyen İş Emirleri	Acil Müdahale Çalışması	Planlı Bakım Çalışması	Bekleyen İş Emirleri
				Acil Müdahale Çalışması	-	-0,279*	-0,062	-	-0,343*	-0,253	-	-0,600*	-0,476*
				Planlı Bakım Çalışması	0,279*	-	0,217	0,343*	-	0,091	0,600*	-	0,121
				Bekleyen İş Emirleri	0,062	-0,217	-	0,253	-0,121	-	0,476*	-0,121	-

* Test değişkeninin ilgili grup değişkeninde %5 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığa sahip olduğunu ifade etmektedir. ⁽¹⁾ İlgili grup değişkeninin 3 veya daha fazla gruptan oluşması nedeniyle fark testi olarak Kruskal Wallis ve Post-Hoc testlerinin kullanıldığını gösterir. ⁽²⁾ İlgili grup değişkeninin 2 gruptan oluşması nedeniyle fark testi olarak Mann-Whitney testinin kullanıldığını gösterir.

Tablo 5. Denence testi sonuçları ve ortalamalar

Önermeler	BYBS	BPG	KBBS
Sektör grup değişkeninde ilgili test değişkeni istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığa sahiptir.	H _{1a} Kabul	H _{2a} Kabul	H _{3a} Kabul
Faaliyet alanları grup değişkeninde ilgili test değişkeni istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığa sahiptir.	Diğer>İmalat>Enerji ve Lojistik	Diğer>İmalat>Enerji ve Lojistik	Diğer>İmalat
Yıllık bütçe grup değişkeninde ilgili test değişkeni istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığa sahiptir.	H _{1b} Kabul	H _{2b} Red	H _{3b} Red
Firma/Tesiste çalışan personel sayısı grup değişkeninde ilgili test değişkeni istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığa sahiptir.	H _{1c} Kabul	H _{2c} Red	H _{3c} Red
Firma/Tesis yıllık bakım/onarım bütçesi grup değişkeninde ilgili test değişkeni istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığa sahiptir.	Özel Sektör>Kamu Sektörü	-	-
Firma/Tesis yıllık bakım/onarım bütçesi grup değişkeninde ilgili test değişkeni istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığa sahiptir.	H _{1d} Kabul	H _{2d} Red	H _{3d} Red
Firma/Tesis yıllık bakım/onarım bütçesi grup değişkeninde ilgili test değişkeni istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığa sahiptir.	125.000.000 TL'den fazla	-	-
Firma/Tesis yıllık bakım/onarım bütçesi grup değişkeninde ilgili test değişkeni istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığa sahiptir.	>125.000.000 TL veya daha az	-	-
Firma/Tesis yıllık bakım/onarım bütçesi grup değişkeninde ilgili test değişkeni istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığa sahiptir.	H _{1e} Kabul	H _{2e} Red	H _{3e} Kabul
Firma/Tesis yıllık bakım/onarım bütçesi grup değişkeninde ilgili test değişkeni istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığa sahiptir.	250 veya daha fazla	-	-
Firma/Tesis yıllık bakım/onarım bütçesi grup değişkeninde ilgili test değişkeni istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığa sahiptir.	>249 veya daha az	-	-
Firma/Tesis yıllık bakım/onarım bütçesi grup değişkeninde ilgili test değişkeni istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığa sahiptir.	H _{1f} Kabul	H _{2f} Red	H _{3f} Kabul
Firma/Tesis yıllık bakım/onarım bütçesi grup değişkeninde ilgili test değişkeni istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığa sahiptir.	10.000.000 TL'den fazla	-	10.000.000 TL'den fazla
Firma/Tesis yıllık bakım/onarım bütçesi grup değişkeninde ilgili test değişkeni istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığa sahiptir.	>10.000.000 TL veya daha az	-	>10.000.000 TL veya daha az
Firma/Tesis(ler)de bulunan ve bakım/onarım yapılan makinelerin ortalama piyasa değeri toplamı grup değişkeninde ilgili test değişkeni istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığa sahiptir.	H _{1g} Kabul	H _{2g} Kabul	H _{3g} Red
Bakım/Onarım ekibinde görevli çalışan sayısı grup değişkeninde ilgili test değişkeni istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığa sahiptir.	5.000.000 TL'den fazla	-	5.000.000 TL veya daha az
Bakım/Onarım ekibinde görevli çalışan sayısı grup değişkeninde ilgili test değişkeni istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığa sahiptir.	>5.000.000 TL veya daha az	-	>5.000.000 TL'den fazla
Bakım/Onarım faaliyetlerinde saha personelinin ağırlıklı kullanılma şekli grup değişkeninde ilgili test değişkeni istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığa sahiptir.	H _{1h} Kabul	H _{2h} Kabul	H _{3h} Kabul
Bakım/Onarım faaliyetlerinde saha personelinin ağırlıklı kullanılma şekli grup değişkeninde ilgili test değişkeni istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığa sahiptir.	Planlı Çalışmaları	Bakım Planlı Çalışmaları	Planlı Bakım Çalışmaları
Bakım/Onarım faaliyetlerinde saha personelinin ağırlıklı kullanılma şekli grup değişkeninde ilgili test değişkeni istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığa sahiptir.	>Acil Çalışmaları	Müdahale	>Bekleyen İş Emirleri
Bakım/Onarım faaliyetlerinde saha personelinin ağırlıklı kullanılma şekli grup değişkeninde ilgili test değişkeni istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığa sahiptir.	>Acil Çalışmaları	Müdahale	>Acil Müdahale Çalışmaları

BYBS test değişkeninin firmaya özgü durumlardan sektör grup değişkeninde 0,022 değeri ile %5 güven aralığında anlamlı olduğu ve H_{1a} denencesinin kabul edildiği görülmüştür (Tablo 4 ve Tablo 5). Accorsi ve diğerleri (2019: 99), karmaşık üretim sistemlerinin bakımının küresel rekabet açısından hayati öneme haiz olduğunu ifade etmektedir. Tablo 5'te, Türkiye'de BYBS'nin hizmet ve madenciliğin yoğunlukta olduğu "Diğer" sektör gruplarında en yüksek, "İmalat (Üretim)" sektöründe ikinci ve "Enerji ve Lojistik" sektör gruplarında ise en düşük ortalamaya sahip olduğu görülmektedir. İmalat sanayi konusunda önemli atılımları olan Türkiye'de üretimdeki BYBS kullanım yoğunluğu diğer sektör gruplarındaki BYBS kullanımının gerisinde kalmıştır.

BYBS test değişkeninin firmaya özgü durumların faaliyet alanı grup değişkeninde 0,025 değeri ile %5 güven aralığında anlamlı olduğu ve H_{1b} denencesinin kabul edildiği görülmüştür (Tablo 4 ve Tablo 5). Zhou ve diğerleri (2008: 990), çalışmalarında kamu kurumlarının özel sektör organizasyonlarına oranla risk alma

ve öngörü konusunda daha isteksiz olduğunu ifade etmiştir. Beklentilere paralel olarak Türk özel sektöründe kamu sektörüne oranla daha yüksek oranda BYBS kullanılmaktadır.

BYBS test değişkeninin firmaya özgü durumlardan yıllık bütçe grup değişkeninde 0,025 değeri ile %5 güven aralığında anlamlı olduğu ve H_{1c} denencesinin kabul edildiği görülmüştür (Tablo 4 ve Tablo 5). Bu kapsamda, organizasyon büyüklüğü için belirlenmiş birinci değişken organizasyon yıllık bütçesidir. Yıllık bütçesi 125 milyon TL'den fazla olan büyük ölçekli organizasyonların BYBS kullanım oranı, bütçesi daha az olan orta, küçük veya mikro ölçekli organizasyonlara oranla daha yüksektir.

Farklılık testleri sonucunda BYBS test değişkeninin firmaya özgü durumlardan firma/tesiste çalışan sayısı grup değişkeninde 0,006 değeri ile %5 güven aralığında anlamlı olduğu ve H_{1d} denencesinin kabul edildiği görülmüştür (Tablo 4 ve Tablo 5). Buna göre, 250 veya daha fazla personel çalıştıran büyük ölçekli organizasyonlarda BYBS kullanımı, daha az personel çalıştıran orta, küçük ve mikro organizasyonlara oranla daha yüksektir. Bu husus, Aydiner ve Tatoğlu (2019: 65)'nin büyük ölçekli organizasyonlardaki yönetim bilişim sistemi uygulamalarının küçük ve orta büyüklükteki uygulamalara oranla daha anlamlı bir fark oluşturduğu yönündeki bulguları ile örtüşmektedir.

BYBS test değişkeninin firmaya özgü durumlardan firma/tesis yıllık bakım bütçesi grup değişkeninde 0,030 değeri ile %5 güven aralığında anlamlı olduğu ve H_{1e} denencesinin kabul edildiği görülmüştür (Tablo 4 ve Tablo 5). Mani ve diğerleri (2010), çalışmalarında büyük şirketlerin yüksek bilgi işlem kapasitesine ulaşmak amacıyla daha fazla kaynak ayırdıklarını ifade etmektedir. Bu ifade ile paralel olarak, 10 milyon TL'den fazla bakım bütçesine sahip olan organizasyonlarda BYBS kullanımı daha az bakım bütçesine sahip olan organizasyonlara oranla daha yüksektir.

BYBS test değişkeninin firmaya özgü durumlardan bakım/onarım yapılan makinelerin ortalama piyasa değeri grup değişkeninde 0,030 değeri ile %5 güven aralığında anlamlı olduğu ve H_{1f} denencesinin kabul edildiği görülmüştür (Tablo 4 ve Tablo 5). Swanson (2003), bakım işlevinin karmaşıklık (iç ve dış) ile başa çıkmak için BYBS kullandığını aktarmıştır. Türkiye'de de benzer şekilde 5 milyon TL'den daha fazla piyasa değerli bakıma tabi karmaşık makinelere sahip organizasyonlarda BYBS kullanımı, daha az değerli makineye sahip organizasyonlara oranla daha yüksektir.

BYBS test değişkeninin firmaya özgü durumlardan bakım/onarım ekibinde görevli çalışan sayısı grup değişkeninde 0,015 değeri ile %5 güven aralığında anlamlı olduğu ve H_{1g} denencesinin kabul edildiği görülmüştür. Velmuguran ve Dhingra (2014: 1649), çalışmalarında BT'lerin tesis çalışanları arasındaki iletişimi geliştirdiğini ifade etmişlerdir. Bakım ekibinde çalışan personel sayısı arttıkça iletişim ve koordinasyon ihtiyaçlarının da artacağı değerlendirilmektedir. Buna göre, "50 veya daha fazla" bakım personeline sahip olan organizasyonlar, daha az bakım personeline sahip olanlara oranla daha yüksek BYBS kullanımına sahiptir.

BYBS test değişkeninin firmaya özgü durumlardan bakım/onarım faaliyetinde saha personelinin ağırlıklı kullanıma şekli grup değişkeninde 0,037 değeri ile %5 güven aralığında anlamlı olduğu ve H_{1h} denencesinin kabul edildiği görülmüştür. Majeed Ali (2007: 987), BYBS'nin iş emirleri üretilmesini kolaylaştırdığını, önleyici bakıma katkıda bulunduğunu ve bakım yönetimini otomatikleştirerek departmanların gelişmelerine yardımcı olduğunu ifade etmektedir. Türkiye'de benzer şekilde, bakım iş gücünü ağırlıklı olarak planlı bakım çalışmalarında kullanan organizasyonlarda BYBS kullanımı, personelinin ağırlıklı olarak acil müdahale çalışmalarında kullanan organizasyonlara oranla daha fazladır.

BPG test değişkeninin firmaya özgü sektör grup değişkeninde 0,019 değeri ile %5 güven aralığında anlamlı olduğu ve H_{2a} denencesinin kabul edildiği görülmüştür (Tablo 4 ve Tablo 5). Buna göre, BPG "Diğer" sektör gruplarında en yüksek, "İmalat" sektöründe ikinci ve "Enerji ve Lojistik" sektör gruplarında en düşük ortalamaya sahiptir. BYBS'nin de ilgili grup değişkenlerinde aynı ortalamaya sahip olduğu düşünüldüğünde BPG'lerin bu durumu beklentiler ile paralellik oluşturmaktadır.

BPG test değişkeninin firmaya özgü durumlardan faaliyet alanı grup değişkeninde 0,093 değeri %5 güven aralığında anlamlı olmadığı ve H_{2b} denencesinin red edildiği görülmüştür (Tablo 4 ve Tablo 5). Buna göre, BPG test değişkeni kamu ve özel sektör grup değişkenlerinde istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık göstermemektedir. Labib (1998: 66) ve Wienker ve diğerleri (2016), BYBS'nin dünya standartlarında bakım hizmet seviyesi elde etmek için elverişli bir araç olabileceğini aktarmışlardır. Bundan hareketle, Türkiye'de özel sektörün kamu sektörüne oranla daha yüksek BYBS kullanımına sahip olmasının BPG test değişkeninde de paralel etkiler doğurması beklenirken BPG'nin kamu özel sektör faaliyet alanlarında anlamlı bir farklılığa sahip olmaması, BYBS verimliliği ile ilgili kuşku doğurmaktadır.

BPG test değişkeninin firmaya özgü durumlardan yıllık bütçe grup değişkeninde 0,487 değeri %5 güven aralığında anlamlı olmadığı ve H_{2c} denencesinin red edildiği görülmüştür (Tablo 4 ve Tablo 5). BYBS bulguları bölümünde bütçesi 125 milyon TL'den fazla olan büyük ölçekli organizasyonların BYBS kullanım

oranının daha yüksek olduğu görülmüştü. Bunun yanında BYBS'nin bakım performansını artırıcı etkilere sahip olduğu da literatürde yer almaktadır. Ancak, beklentilerin aksine, büyük ölçekli organizasyonlar ile orta, küçük veya mikro ölçekli organizasyonlar arasında BPG test değişkeni açısından anlamlı bir farklılık tespit edilememiştir.

BPG test değişkeninin firmaya özgü durumlardan firma/tesiste çalışan sayısı grup değişkeninde 0,051 değeri %5 güven aralığında anlamlı olmadığı ve H_{2d} denencesinin red edildiği görülmüştür (Tablo 4 ve Tablo 5). BPG test değişkeninin yıllık bütçe grup değişkeninde anlamlı bir farklılık göstermemesi nedeniyle bu bulgunun beklentiler ile paralel olduğu söylenebilir. Ancak, 250 veya daha fazla personel çalıştıran büyük ölçekli organizasyonlarda BYBS kullanımının, daha az personel çalıştıran orta, küçük ve mikro organizasyonlara oranla daha yüksek olması BPG test değişkeninin de büyük ölçekli organizasyon grubunda daha yüksek olması beklentisini doğurmaktadır. Beklentilerin aksine büyük ölçekli organizasyonlar ile orta, küçük veya mikro ölçekli organizasyonlar arasında BPG test değişkeni açısından anlamlı bir farklılık tespit edilememiştir.

BPG test değişkeninin firmaya özgü durumlardan yıllık bütçe grup değişkeninde 0,081 değeri %5 güven aralığında anlamlı olmadığı ve H_{2e} denencesinin red edildiği görülmüştür (Tablo 4 ve Tablo 5). BYBS ve KBBS test değişkenlerinin yıllık bakım onarım bütçesi grup değişkenlerinde anlamlı bir farklılık göstermesi ve 10 milyon TL'den fazla bakım bütçesine sahip olan organizasyonlarda BYBS ve KBBS kullanımının daha fazla olması, BPG test değişkeninin de bu grup değişkenlerinde benzer farklılığa sahip olması gerektiği beklentisini doğurmaktadır. Beklentilerin aksine, 10 milyon TL'den fazla bakım/onarım bütçesine sahip organizasyonlar ile daha az bakım bütçesi kullanan organizasyonlar arasında BPG test değişkeni açısından anlamlı bir farklılık tespit edilememiştir.

BPG test değişkeninin firmaya özgü durumlardan bakım/onarım yapılan makinelerin ortalama piyasa değeri grup değişkeninde 0,821 değeri ile %5 güven aralığında anlamlı olmadığı ve H_{2f} denencesinin red edildiği görülmüştür (Tablo 4 ve Tablo 5). Zonta ve diğerleri (2020: 1), KBBS'nin arıza sürelerinin kısaltılmasına, maliyetlerin azaltılmasına, kontrolün sağlanmasına ve üretimin kalitesinin iyileştirilmesine katkıda bulunduğunu belirtmektedir. BYBS ve KBBS test değişkenlerinin bakım/onarım yapılan makinelerin ortalama piyasa değeri grup değişkeninde istatistiksel olarak anlamlı farklılığa sahip olması, BPG test değişkeninin de bu grup değişkeninde anlamlı farklılığa sahip olması beklentisini doğurmaktadır. Aksine, bakım BT unsurlarının anlamlı farklılığa sahip olduğu grup değişkeninde BPG anlamlı bir farklılığa sahip değildir.

BPG test değişkeninin firmaya özgü durumlardan bakım/onarım ekibinde görevli çalışan sayısı grup değişkeninde 0,032 değeri ile %5 güven aralığında anlamlı olduğu ve H_{2g} denencesinin kabul edildiği görülmüştür (Tablo 4 ve Tablo 5). Buna göre, "50 veya daha fazla" bakım personeline sahip olan organizasyonlar, daha az personele sahip organizasyonlara oranla daha yüksek BPG seviyesine sahiptir ve bu husus BYBS'nin bu grup değişkenindeki ortalaması ile paralellik göstermektedir.

BPG test değişkeninin firmaya özgü durumlardan bakım/onarım faaliyetlerinde saha personelinin ağırlıklı kullanıma şekli grup değişkeninde 0,003 değeri ile %5 güven aralığında anlamlı olduğu ve H_{2h} denencesinin kabul edildiği görülmüştür (Tablo 4 ve Tablo 5). Buna göre, BPG test değişkeni açısından planlı bakım çalışmaları ve acil müdahale çalışmaları grupları arasında anlamlı bir farklılık bulunmakta ve beklentiler ile paralel olarak BPG'nin planlı bakım çalışmaları grubunda daha yüksek ortalamaya sahip olduğu görülmektedir.

KBBS test değişkeninin firmaya özgü durum olan sektör grup değişkeninde 0,018 değeri ile %5 güven aralığında anlamlı olduğu ve H_{3a} denencesinin kabul edildiği görülmüştür (Tablo 4 ve Tablo 5). Buna göre, diğer sektör gruplarındaki KBBS ağırlığı imalat sektörü grubuna göre daha fazladır. Bu husus, BYBS ve BPG test değişkenlerinin bu grup değişkeninde gösterdiği farklılık ile paraleldir.

KBBS test değişkeninin firmaya özgü durumlardan olan faaliyet alanı grup değişkeninde 0,464 değeri ile %5 güven aralığında anlamlı olmadığı ve H_{3b} denencesinin red edildiği görülmüştür (Tablo 4 ve Tablo 5). Bu suretle, KBBS test değişkeninin kamu ve özel sektör grup değişkenlerinde istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık gösterdiği söylenemez.

KBBS test değişkeninin firmaya özgü durumlardan yıllık bütçe grup değişkeninde 0,532 değeri ile %5 güven aralığında anlamlı olmadığı ve H_{3c} denencesinin red edildiği görülmüştür (Tablo 4 ve Tablo 5). Bu suretle, yıllık bütçesi 125 milyon TL'den fazla olan büyük ölçekli organizasyonların KBBS kullanım oranları ile daha düşük bütçeli organizasyonların KBBS kullanım oranları arasında anlamlı bir farklılık olduğu söylenemez.

KBBS test değişkeninin firmaya özgü durumlardan firma/tesiste çalışan sayısı grup değişkeninde 0,804 değeri ile %5 güven aralığında anlamlı olmadığı ve H_{3d} denencesinin red edildiği görülmüştür (Tablo

4 ve Tablo 5). Buna göre KBBS test değişkeni açısından 250 veya daha fazla personele sahip büyük ölçekli organizasyonlar ile daha az personele sahip organizasyonlara arasında anlamlı bir farklılık olduğu söylenemez.

KBBS test değişkeninin firmaya özgü durumlardan yıllık bakım/onarım bütçesi grup değişkeninde 0,037 değeri ile %5 güven aralığında anlamlı olduğu ve H_{3e} denencesinin red edildiği görülmüştür (Tablo 4 ve Tablo 5). Buna göre, 10 milyon TL'den fazla bakım bütçesine sahip olan organizasyonlarda KBBS kullanımı ile daha az bakım bütçesine sahip olan organizasyonlardaki kullanım oranları arasında, 10 milyon TL'den fazla bakım bütçeli organizasyonlar lehine anlamlı bir farklılık bulunmaktadır. Mani ve diğerleri (2010), büyük şirketlerin bilgi kapasitelerini arttırmak için genellikle küçük firmalara oranla daha fazla mali kaynak kullandığını ifade etmişlerdir. Diğer yandan, firma büyüklüğü ile ilgili yıllık bütçe ve firma/tesis çalışan sayısı grup değişkenlerinde BYBS test değişkeni anlamlı bir farklılığa sahip iken, KBBS test değişkeni açısından beklentiler ile paralel olmayacak şekilde anlamlı bir farklılık tespit edilememiştir.

KBBS test değişkeninin firmaya özgü durumlardan bakım/onarım yapılan makinelerin ortalama piyasa değeri grup değişkeninde 0,036 değeri ile %5 güven aralığında anlamlı olduğu ve H_{3f} denencesinin kabul edildiği görülmüştür (Tablo 4 ve Tablo 5). Buna göre, 5 milyon TL ve daha az piyasa değerli bakıma tabi makineye sahip kurumlarda KBBS kullanımı, 5 milyon TL'den daha fazla piyasa değerli makineye sahip organizasyonlara oranla daha yüksektir. Bu durum, aynı grup değişkenlerinde BYBS'nin gösterdiği anlamlı farklılık ile uyumsuzluk oluşturmaktadır.

KBBS test değişkeninin firmaya özgü durumlardan olan bakım/onarım ekibinde görevli çalışan sayısı grup değişkeninde 0,057 değeri ile %5 güven aralığında anlamlı olmadığı ve H_{3g} denencesinin red edildiği görülmüştür (Tablo 4 ve Tablo 5). Tran Anh ve diğerleri (2018), çalışmalarında KBBS'nin insan hatalarını ve tecrübeli personele olan ihtiyacı azalttığını aktarmışlardır. Türk sanayilerinden elde edilen bulgular ise bu husus ile benzeşmemektedir.

KBBS test değişkeninin firmaya özgü durumlardan bakım/onarım faaliyetlerinde saha personelinin ağırlıklı kullanıma şekli grup değişkeninde 0,000 değeri ile %5 güven aralığında anlamlı olduğu ve H_{3h} denencesinin kabul edildiği görülmüştür (Tablo 4 ve Tablo 5). Swanson (2001: 237), ön alıcı bakım stratejilerinin kestirimci bakımdan faydalandığını ifade etmektedir. Benzer şekilde, Türkiye'de bakım iş gücünü ağırlıklı olarak planlı bakım çalışmalarında kullanan organizasyonlardaki KBBS seviyesi, personelini ağırlıklı olarak bekleyen iş emirleri ve acil müdahale çalışmalarında kullanan organizasyonlara oranla daha yüksektir.

4. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Elde edilen sonuçlar üç başlık altında ifade edilebilir. Birincisi, BYBS ve KBBS test değişkenlerine ilişkin verilerin BPG test değişkenini desteklememesi ve bakım performansında beklenen etkiyi yaratmamasıdır. Kısacası, BYBS ve KBBS yatırımları organizasyon bakım işletme verimliliğine aynı oranda katkı sağlamamaktadır. Lopes ve diğerleri, (2016: 269), pazarda şirketlerin özel ihtiyaçlarına karşılık veremeyen hazır BYBS'lerin bulunduğunu, bu nedenle bazı firmaların kendi ihtiyaçlarına karşılık veren BYBS'leri geliştirmeyi tercih ettiklerini ifade etmektedir. Buna bağlı olarak, Türkiye'deki firmaların yeterli değerlendirmeler yapmadan BYBS temin etmesinin bakım verimliliğini azaltarak dijital dönüşüm süreçlerine zarar verebileceği değerlendirilmektedir. Diğer taraftan, Pwc ve Mainnovation (2017: 5) firmaları raporlarında, KBBS'nin hayat döngüsünde başlangıç dönemlerinde olduğunu ve şirketlerin kestirimci bakım 4.0'ı uygulama konusunda önemli teknik engeller ile karşılaştığını ifade etmektedir. Sonuçlar, sistem ve bütüncül yaklaşımlar açısından değerlendirildiğinde, Türk sanayisinde organizasyonların sahip olduğu BYBS ve KBBS bakım bilgi teknolojileri girdilerinin organizasyon içi veya dışı sürtünmeler (teknik engeller, yanlış karar alma süreçleri, endüstrilerdeki genel altyapı eksikliği vb.) nedeniyle beklenen çıktı olan dijital bakım performansına dönüşemediğini ileri sürmek yanlış olmayacaktır. Bu suretle, sürtünmelerin minimize edilmesinin ve bu sürtünmelere neden olan çevresel faktörlerin gelecek araştırmalarda incelenmesinin önem arz ettiği değerlendirilmektedir.

İkinci husus, bakım BT/S kaynakları kullanımının hizmet ve madencilik sektörü ağırlıklı "Diğer" sektör gruplarında "İmalat (Üretim)" ve "Enerji ve Lojistik" sektör gruplarına oranla daha fazla olmasıdır. Aydiner ve Tatoğlu (2019:66), çalışmalarında muhatap olunan müşteri kitlesine karşı teknoloji yoğun servis sektörlerinde firmaların daha aktif rol üstlenerek yüksek yönetim bilişim sistemleri kullanımına yöneldiğini ifade etmektedir. Türkiye'nin özel sektör ağırlıklı endüstriyel yapısı da bakım alanındaki dijital dönüşüm yatırımlarının bu sanayi kolunda yoğunlaşmasında etki sahibi olabilir. Diğer yandan, Accorsi ve diğerleri (2019:99), karmaşık üretim sistemlerine ilişkin bakımın küresel rekabet açısından hayati öneme haiz olduğunu belirtmektedir. Üretim duraklamalarının ve arıza sürelerinin, belirli sayı ve kalitede üretim hedefleri olan organizasyonlar için minimize edilmesi gerekmektedir. Bu suretle, verimli bir dijital dönüşüm için Türkiye'nin bakım BT/S unsurlarının rolünü göz önüne alarak üretim yatırım politikalarını yönlendirmesinin

önemli olduğu değerlendirilmektedir. Gelecek çalışmaların, “Üretim” yatırımlarında bakım BT/S'nin rolünü mercek altına almasının dijital dönüşüm süreçlerine önemli katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Üçüncü husus, büyük organizasyonların KBBS kullanım oranlarının anlamlı bir farklılık teşkil etmemesidir. Chen ve diğerleri (2010), çalışmalarında BT/S yatırımları özelinde organizasyon davranışlarını tasnif etmişler, BT/S yenilikçisi, BT/S muhafazakarı, tanımsız tipolojileri tanımlamışlar ve BT/S muhafazakarı olan organizasyonların, gelecek vaat eden sistemlere bu yeniliklerin endüstride rüştünü ispat etmesinden sonra entegre olduklarını öne sürmüşlerdir. Bundan hareketle, Türkiye’de büyük ölçekli firmaların BYBS’yi kullanmasına karşın, nispeten daha yeni bir sistem olan KBBS’nin endüstride kendisini ispat etmesini bekleyerek dijital dönüşümde muhafazakâr bir yaklaşım sergiledikleri öne sürülebilir. Öte yandan, Pwc ve Mainnovation (2017: 11) firmalarının raporunda, benzer varlıklara sahip olan organizasyonların KBBS konusunda daha önde oldukları ifade edilmektedir. Bu avantajın ise benzer varlıkların gelişmiş veri analizleri için daha zengin bir veri kaynağı teşkil etmesinden kaynaklandığı öne sürülmektedir. Çalışmada Türkiye’de yüksek piyasa değerli makinelere sahip organizasyonların, nispeten daha düşük maliyetli makinelere sahip organizasyonlara oranla düşük KBBS kullanım oranına sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu sonucun birbirinden farklı sistemlere veri toplama işlevi için entegre edilecek IoT cihazlarının uyumlarındaki zorluklardan ve ortaya çıkması muhtemel yüksek maliyetten kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Dolayısıyla endüstri genelinde KBBS’nin optimum kullanımını sağlayabilecek bir model oluşturulmasının dijital dönüşümde önemli bir araştırma alanı olacağı değerlendirilmektedir.

Çalışmada Türkiye’de faaliyet gösteren kurumlara odaklanılması, bu coğrafya haricindeki uygulamalar özelinde bir bakış açısı edilmesini zorlaştırmaktadır. Diğer yandan çalışmada, belirli bir sanayi koluna veya belirli ölçeklerdeki kurumlara odaklanılmamış, Türk sanayisinin genel resminin elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu suretle, farklı coğrafi alan, sektör veya kurum ölçeklerine yoğunlaşmak daha derin bir araştırma konusu olacaktır. Son olarak, veri sahibi olunmaması nedeniyle analizlerde organizasyonların bilgi teknolojisi uygunluk göstergeleri göz ardı edilmiştir. Bu nedenle, araştırma konusu olan organizasyonların bilgi teknolojisi uygunluklarının ölçülmesi ve çalışma sonuçlarının bu verilere göre değerlendirilmesi daha sağlıklı bir bakış açısı sağlayabilir.

KAYNAKÇA

- Accorsi, R., Gallo, A., Tufano, A., Bortolini, M., Penazzi, S. ve Manzini, R. (2019). "A Tailored Maintenance Management System to Control Spare Parts Life Cycle", *29th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM 2019)*, Limerick, 92-99.
- Al-Najjar, B. ve Alsyouf, I. (2004). "Enhancing a Company's Profitability and Competitiveness Using Integrated Vibration-Based Maintenance: A Case Study", *European Journal of Operational Research*, 157, 643-657.
- Alsyouf, I. (2006). "Measuring Maintenance Performance Using a Balanced Scorecard Approach", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 12(2), 133-149.
- Alsyouf, I. (2009). "Maintenance Practices in Swedish Industries : Survey Results", *International Journal of Production Economics*, 121, 212-223.
- Aydiner, A.S. ve Tatoğlu, E. (2019). "Türkiye'deki İşletmelerde Bilişim Sistemleri Uygulamaları Üzerine Bir Saha Araştırması", *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 12(1), 59-73.
- Azahar, N.F. ve Mydin, M.O. (2014). "Potential of Computerized Maintenance Management System in Facilities Management", *Annals of the University of Oradea*, 1, 51-59.
- Bakanlar Kurulu, (2005). "Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletmelerin Tanımı, Nitelikleri ve Sınıflandırılması Hakkındaki Yönetmelik", *Türkiye Cumhuriyeti Resmi Gazetesi*, 25997(5-44), 1-14.
- Ben-Daya, M., Duffuaa, S.O., Raouf, A., Knezevic, J. ve Ait-Kadi, D. (2009). "Handbook of Maintenance Management and Engineering", Springer Publication, London.
- Bıçakçı, İ., İç, Y.T., Karasakal, E. ve Dengiz, B. (2020). "Entegre Lojistik Sistemler için Bir Onarım Ağı Yapısı Önerisi", *Journal of Turkish Operation Management*, (4)2, 409-423.
- Biroğul, S. ve Koçer, K. (2018). "Web ve Mobil Tabanlı Bakım Onarım ve Varlık Yönetim Sisteminde Önbellekleme Yaklaşımları", *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(4), 579-589.
- Bottani, E., Ferretti, G., Montanari, R. ve Vignali, G. (2014). "An Empirical Study on the Relationships Between Maintenance Policies and Approaches Among Italian Companies", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 20(2), 135-162.
- Chen, D.Q., Mocker, M. ve Preston, D.S. (2010). "Information Systems Strategy Reconceptualization, Measurement and Implications", *MIS Quarterly*, 34(2), 233-259.
- Chen, Y., Wang, Y., Nevo, S., Benitez-Amado, J. ve Kou, G. (2015). "IT Capabilities and Product Innovation Performance: The Roles of Corporate Entrepreneurship and Competitive Intensity", *Information & Management*, 52, 643-657.
- Desirey, S.T. (2000). "Positioning Maintenance as a Competitive Advantage", <https://www.plantengineering.com/articles/positioning-maintenance-as-a-competitive-advantage/> (Erişim Tarihi: 04.12.2020).
- Durmuş, B., Yurtkoru, E.S. ve Çinko, M. (2018). "Sosyal Bilimlerde SPSS'le Veri Analizi", Beta Yayınevi, İstanbul.
- Fumagalli, L., Macchi, M. ve Rapaccini, M. (2009). "Computerized Maintenance Management Systems in SMEs: A Survey in Italy and Some Remarks for the Implementation of Condition Based Maintenance", *13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, Moscow, 1615-1619.
- Gulati, R. ve Smith, R. (2009). "Maintenance and Reliability Best Practices", Industrial Press, New York.
- Hastings, J.N.A. (2015). "Physical Asset Management", Springer International Publishing AG Switzerland, New York.
- Ilangkumaran, M. ve Kumanan, S. (2012). "Application of Hybrid VIKOR Model in Selection of Maintenance Strategy", *International Journal of Information Systems and Supply Chain Management*, 5(2), 59-81.
- Ilgın, M.A., Söyler, D. ve Sözen, K. (2016). "İstatistiksel Süreç Kontrolü Prensiplerini Kullanarak Bir Kestirimci Bakım Bilgi Sisteminin Geliştirilmesi", *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 9(2), 55-61.
- ISO 14224, (2006). "ISO 14224 Standarts: 2006", Cenova.
- Jimenez, M.J.J., Schwartz, S., Vingerhoeds, R., Grabot, B. ve Salaün, M. (2020). "Towards Multi-Model Approaches to Predictive Maintenance: A Systematic Literature Survey on Diagnostics and Prognostics", *Journal of Manufacturing Systems*, 56, 539-557.
- Kans, M. (2008). "An Approach for Determining the Requirements of Computerised Maintenance Management Systems", *Computers in Industry*, 59, 32-40.
- Kızrak, M.A. ve Bolat, B. (2019). "Uçak Motoru Sağlığı için Uzun-Kısa Süreli Bellek Yöntemi ile Öngörücü Bakım", *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 12(2), 103-109.
- Koçel, T. (2011). "İşletme Yöneticiliği", Beta Yayıncılık, İstanbul.

- Kutucuoğlu, K.Y., Hamalı, J., İrani, Z. ve Sharp, J.M. (2001). "A Framework for Managing Maintenance Using Performance Measurement Systems", *International Journal of Operations & Production Management*, 21(1/2), 173-194.
- Labib, A.W. (1998). "World-Class Maintenance Using a Computerised Maintenance Management System", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 4, 66-75.
- Lopes, I., Senra, P., Vilarinho, S., Sa, V., Teixeira, C., Lopes, J., Alves, A., Oliveria, A.O. ve Figueiredo, M. (2016). "Requirements Specification of a Computerized Maintenance Management - A Case Study", *Procedia CIRP*, 52, 268-273.
- Magalhaes, R. (2004). "The Holistic Approach to Information Systems Implementation", *Proceedings of the Portuguese Association for Information Systems Conference*, Lisbon, 1-11.
- Majeed Ali, A.A. (2007). "Application of Computerized Maintenance Management System In Industry", *International Conference on Computers and Industrial Engineering*, Alexandria, 984-995.
- Mani, D., Barua, A. ve Whinston, A. (2010). "An Empirical Analysis of the Impact of Information Capabilities Design on Business Process Outsourcing Performance", *MIS Quarterly*, 34(1), 39-62.
- Mathews, I., Mathews, E.H., Van Laar, J.H., Hamer, W. ve Kleingeld, M. (2020). "A Simulation - Based Prediction Model for Coal-Fired Power Plant Condenser Maintenance", *Applied Thermal Engineering*, 174, 1-10.
- Muchiri, P., Pintelon, L., Gelders, L. ve Martin, H. (2010). "Development of Maintenance Function Performance Measurement Framework and Indicators", *International Journal of Production Economics*, 1-8.
- Presser, S., Couper, M.P., Lessler, J.T., Martin, E., Martin, J., Rothgeb, J.M. ve Singer, E. (2004). "Methods for Testing and Evaluating Survey Questions", *Public Opinion Quarterly*, 68(1), 109-130.
- Pwc ve Mainnovation, (2017). "Predictive Maintenance 4.0 Predict the Unpredictable", Pwc; Mainnovation Report, 1-32.
- Rousopoulou, V., Nizamis, A., Vafeiadis, T., Ioannidis, D. ve Tzovaras, D. (2020). "Predictive Maintenance for Injection Moulding Machines Enabled by Cognitive Analytics for Industry 4.0", *Frontiers in Artificial Intelligence*, 3, 1-12.
- Simoes, J.M., Gomes, C.F. ve Yasin, M.M. (2011). "A Literature Review of Maintenance Performance Measurement A Conceptual Framework and Directions for Future Research", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 17(2), 116-137.
- Swanson, L. (1997). "Computerized Maintenance Management Systems : A Study of System Design and Use", *Production and Inventory Management Journal*, 38(2), 11-15.
- Swanson, L. (2001). "Linking Maintenance Strategies to Performance", *International Journal of Production Economics*, 70, 237-244.
- Swanson, L. (2003). "An Information Processing Model of Maintenance Management", *International Journal of Production Economics*, 83, 45-64.
- Tran Anh, D., Dabrowski, K. ve Skrzypek, K. (2018). "The Predictive Maintenance Concept in Maintenance Department of the "Industry 4.0" Production Enterprise", *Foundations of Management*, 10, 283-291.
- Velmuguran, R.S., ve Dhingra, T. (2014). "Maintenance Strategy Selection and Its Impact in Maintenance Function A Conceptual Framework", *International Journal of Operations & Production Management*, 35(12), 1622-1661.
- Wienker, M., Henderson, K. ve Volkerts, J. (2016). "The Computerized Maintenance Management System An Essential Tool for World Class Maintenance", *Procedia Engineering*, 138, 413-420.
- Wijesinghe, D. ve Mallawarachchi, H. (2019). "A Systematic Approach for Maintenance Performance Measurement Apparel Industry in Sri Lanka", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 25(1), 41-53.
- Zhou, K.Z., Li, J.J., Zhou, N. ve Su, C. (2008). "Market Orientation, Job Satisfaction, Product Quality and Firm Performance Evidence From China", *Strategic Management Journal*, 29(9), 985-1000.
- Zonta, T., Andre Da Costa, C., Da Rosa Righi, R., Jose de Lima, M., Da Trindade, E S. ve Pyng Li, G. (2020). "Predictive Maintenance in The Industry 4.0 A Systematic Literature Review", *Computers & Industrial Engineering*, 150, 1-17.

MEASURING FIRM PERCEPTION TO ADAPTATION OF INDUSTRY 4.0: THE CASE OF TURKEY

Ebru AŞAR¹, Filiz BÜLBÜL², Mansur AKBULUT³, Pınar BAYARSLAN⁴, Tunahan KERMEN⁵, Derya FİNDİK⁶

ABSTRACT

Purpose: This study aims at examining the perceptions of various layers within a firm toward integrating Industry 4.0 applications in production.

Methodology: We follow a case study approach to obtain detailed information about the selected firm. We focus on machinery, food, and automotive spare parts sectors having a strategic role in digital transformation. In total, 12 interviews with blue-collar workers, engineers, and managers are conducted in five different companies.

Findings: The results of the study are twofold. As for the senior management layer and engineers, the adaptation of Industry 4.0 applications to the firm will increase the firm efficiency. As far as its effect on employment is considered, it has been determined that the concept is not fully understood, especially by blue-collar workers, and it is not known how it will contribute to production. Production line workers, therefore, think that they will experience the threat of losing their jobs with the implementation of Industry 4.0 applications.

Originality: Despite its importance, the number of studies dealing with the difficulties, benefits, opportunities, and threats of adopting Industry 4.0 especially for developing countries is still few. This study, therefore, closes this gap by conducting a comprehensive study with various layers of the firm.

Keywords: Industry 4.0, Supply Chain Management, Case Study.

JEL Codes: L2, L6, M2.

ENDÜSTRİ 4.0'İN ADAPTASYONUNA YÖNELİK FİRMA ALGISININ ÖLÇÜLMESİ: TÜRKİYE ÖRNEĞİ

ÖZET

Amaç: Bu çalışma, bir firma içindeki çeşitli birimlerin üretimde Endüstri 4.0 uygulamalarının kullanılmasına yönelik algılarını incelemeyi amaçlamaktadır.

Yöntem: Firmadaki çeşitli birimlerin algılarını analiz etmek için vaka çalışması yaklaşımı kullanılmıştır. Dijital dönüşümde stratejik rolü olan makine, gıda ve otomotiv yedek parçaları sektörlerine odaklanılmıştır. Toplamda beş farklı firmada mavi yakalı işçi, mühendis ve yönetici ile 12 görüşme yapılmıştır.

Bulgular: Çalışmanın sonuçları iki yönlüdür. Üst yönetim kademesi ve mühendislere göre, Endüstri 4.0 uygulamalarının firmaya uyarlanması, üretim sürecini iyileştirecek ve verimliliği artıracaktır. İstihdam üzerindeki etkisi düşünüldüğünde ise, kavramın özellikle mavi yakalı çalışanlar tarafından tam olarak anlaşılmadığı ve üretime nasıl bir katkı sağlayacağını bilinmediği tespit edilmiştir. Bu nedenle üretim hattı çalışanları, Endüstri 4.0 uygulamalarının hayata geçirilmesiyle işlerini kaybetme tehdidini yaşayacaklarını düşünmektedirler.

Özgünlük: Endüstri 4.0'ın özellikle gelişmekte olan ülkelerde benimsenmesi önündeki zorlukları, sağladığı faydaları, sunduğu fırsatları ve yarattığı tehditleri ele alan çalışmaların sayısı hala azdır. Bu çalışmada, firmanın çeşitli katmanlarının algıları kapsamlı bir şekilde analiz edildiği için yazına katkı sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Endüstri 4.0, Tedarik Zinciri Yönetimi, Vaka Çalışması.

JEL Kodları: L2, L6, M2.

¹ Postgraduate Student, Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Business, Department of Management Information Systems, Ankara, Turkey, asrebru@gmail.com, ORCID:0000-0001-9182-8732.

² Postgraduate Student, Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Business, Department of Management Information Systems, filizbulbul91@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9477-7811.

³ Postgraduate Student, Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Business, Department of Management Information Systems, m.mansurakbulut@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7677-8586.

⁴ Postgraduate Student, Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Business, Department of Management Information Systems, pinarbayarslan@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1418-6021.

⁵ Postgraduate Student, Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Business, Department of Management Information Systems, kermementunahan@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7184-8840.

⁶ Doç. Dr., Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Business, Department of Management Information Systems, Ankara, Turkey, dfindik@ybu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-3002-4391 (Sorumlu Yazar-Corresponding Author).

1. INTRODUCTION

Today, the industrial powers of early-developed countries have been shaped by the fourth phase of industrialization, Industry 4.0, which is based on a high level of automation (Stock and Seliger, 2016). The new process brings several changes in both production processes and customer relationships. It includes key elements as Cyber-Physical Systems, the Internet of Things, the Internet of service, and the Smart Factory (Brettel et al., 2017). Besides, Industry 4.0 allows physical objects to communicate with each other and with humans by monitoring physical operations with physical systems in modular smart factories, thereby resulting in decentralized business decisions.

In today's competitive environment, firms implement Industry 4.0 applications to protect their strategic resources (He and Jin, 2016). Using the information obtained from different sources, Industry 4.0 succeeds to create a link between man and machine in the context of cyber-physical systems (Monostori, 2015). Implementation of such a network in the production and operational environment generates several effects on the entire supply chain and overall productivity. It provides transparency between various stakeholders including customers and suppliers. Additionally, with the use of Industry 4.0, the entire supply chain management structure is automated which in turn shortens lead-time (Tjahjono et al., 2017). All these changes play crucial roles in the firm's productivity. For this purpose, we aim at examining the perceptions of various layers within a firm to understand the opportunities and potential threats of integrating Industry 4.0 applications into the production system. By doing this, we try to understand whether it will increase productivity or not. To have a comprehensive perspective, we focus on certain sectors such as the machinery, food, and automotive spare parts sectors playing an important role in the digital transformation of production. As interviews are conducted with firm representatives from different sectors, comparative results have been obtained for Industry 4.0 applications, revealing the current and future situations.

This study contributes to the related literature in at least three ways. In addition to other country cases such as Brazil (Tortorella and Fetterman, 2018) and Italy (Zheng et al., 2019), this study represents a comprehensive example including different layers of the firm. By following the framework of Orlikowski (1993), we analyze whether top management, engineers, and production workers have similar perceptions toward Industry 4.0 applications. To formulate any policy targeting the successful implementation of Industry 4.0, it is necessary to learn feedback from production workers as well as professionals and top management. Moreover, the number of studies dealing with difficulties and benefits that firms in developing countries face is still few. It is clear that developing economies and transition countries face various challenges in the pre-implementation process (Haaker et al. 2021). This study fills this gap by focusing on certain sectors in Turkey. Finally, yet importantly, in the light of the results of this study, a list of necessary policy implications at various levels will be possible.

This paper is organized as follows: Section 2 briefly discusses the literature. The data and methodology are explained in Section 3. Section 4 introduces interview results. Section 5 discusses the results' implications and concluding remarks.

2. LITERATURE REVIEW

Industry 4.0 refers to the automation and data exchange activities in production technologies. It was first announced in 2011 to increase German competitiveness in the manufacturing industry (Kagermann, et al., 2013). Machines, objects, and systems communicating with each other provide benefits such as analyzing and understanding production issues, then solving them with minimal human involvement, and automating production lines (Tjahjono, et al., 2017). Industry 4.0 will significantly affect people's working environments. When advanced technologies are applied in businesses, processes such as purchasing, production, the processes of sales and maintenance will change which in turn increases business value (Prifti et al., 2020).

The important components of Industry 4.0 include Cyber-Physical Systems, Internet of Things (IoT), Internet Services (IoS), Smart factory, Big Data Analytics, Simulation, Autonomous Robots, Cloud Computing, Additive Manufacturing, and Augmented Reality (Sniderman et al., 2016).

A system that provides communication and coordination between the physical world and the cyber world is called as Cyber-Physical Systems (CPS). It covers compute and storage capacity, mechanics, and electronics (Baheti and Gill, 2011). Accordingly, the Internet is a communication medium (Schmidt et al., 2015). The main role of the CPS is to respond to the changing requirements of production, thereby improving the efficacy and efficiency of the firm's operations (Brettel et al., 2017). Industry 4.0 is characterized by an unprecedented connection between the Internet and the CPS, which provides a completely new level of control, oversight, transparency, and efficiency in the production process (Parvin et al., 2013).

CPS uses two parallel networks to control the communication links between the physical network of interconnected components of the infrastructure and a cyber network (Parvin et al., 2013). It integrates these networks using multiple sensors, actuators, control processing units, and communication devices (Hofmann and Rüsçh, 2017).

Another component of Industry 4.0 includes IoT. It refers to a network wherein the CPS cooperates with other components via unique addressing schemes (Hermann et al., 2015). The internet of things (IoT) is the movement to attach physical things to the internet and each other through wireless technology. This system permits objects and machines consisting of cell phones and sensors to "communicate" with each other as well as human beings (Holdowsky et al., 2015). In the first decade of the 21st century, the "internet of things" has become popular and is thought of as a technology that allows industries to get through from Industry 3.0 to Industry 4.0 by adding information to the products and processes in the supply chain (Hermann et al., 2015).

Additionally, IoT is based on low-cost sensor technologies such as radio frequency identification (RFID) devices and includes a wide range of devices, such as sensors, actuators, robots, milling machines, 3D printers, and assembly line components, chemical mixing tanks, motors, planes, trains, and automobiles (Thames and Schaefer, 2016). The IoT provides enhanced connectivity of devices and products through machine-to-machine (M2M) or human-machine (H2M) communication (Holler et al., 2014). Each device connected to the Internet expects to have several smart services called Internet Services (IoS) (Monnier, 2013). Thus, services are made easily accessible through web technologies, with the help of these technologies (Wahlster et al., 2014).

So far, CPS, IoT, and IoS have been introduced as key components of Industry 4.0. The CPS has a structure called "Smart factory" which is a decentralized production system based on the connection between IoT and IoS. People, machines, and resources communicate with each other as if they were on a social network (Kagermann et al., 2013). Thus, products, machinery, transportation systems, and close links and communication between people are expected to change the current production model.

Each firms' supply chain system depends on operational needs. Organizations are based on external inputs where the supply chain is made up of materials, parts, and other physical materials or data, information, and expertise. The use of Industry 4.0 helps organizations integrate planning and inventory processes and other capabilities (Mussomeli et al., 2016). Supplier factors are related to goods flow and supplier information. Each asset in the supply chain must be synchronized with changes in the business process of the manufacturer. Thus, technological networks are set up among various partners through Industry 4.0 (Sanders et al., 2016). These networks help to share material resources such as intangible assets such as research and information, data, information and machinery, equipment, and human experts (Tepeš et al., 2015). This alone will generate some difficulties and opportunities in the supply chain, many of which can be experienced by taking advantage of Industry 4.0 solutions.

3-D printing is another type of Industry 4.0 component that will be widely used in plant operations soon. It reflects the physical work in a virtual model by using real-time data. The use of this technology help firms reduces manufacturing costs, thereby increasing quality (Brettel et al., 2017). As observed in the case of Siemens and a German machine-tool vendor, the virtual machine is developed that can simulate the processing of parts using data from the physical machine. This reduces the installation time of the actual machining process to 80 percent.

Autonomous Robots are robotic systems with a certain level of intelligence conducting automatic operation functions. The size can vary considerably in terms of functionality, mobility, skill, intelligence, and cost (Fitzgerald and Quasney, 2017). Autonomous robots are expected to grow largely in supply chain operations. The continuous growth of autonomous robots allows those who perform these tasks to move to a strategic, less dangerous, and higher-value job. Autonomous robots expand in their use of more consistent quality and productivity levels, as people can perform tasks that they cannot or will not do or want to do (Brewster, 2016). As autonomous robots grow in size, the supply chain operations will be smoother. Many firms that use autonomous robots take advantage of a variety of robots to validate their expected productivity gains by using them in the supply chain. As innovative firms grow and expand, autonomous robots become a standard for optimizing production operations economically and efficiently. As a result of the widespread deployment of the robotics sector from the agricultural sector to the retail sector to the storage systems, cost reduction and productivity increase are expected in the supply chain (Fitzgerald and Quasney, 2017).

Additive manufacturing (AM) has been used for years to create prototypes in large quantities. Shortly, with the emergence of Industry 4.0, a broader understanding of AM's potential for value in product production, supply chain structure, and new business models have emerged (Cotteleer and Joyce, 2014).

Progress in technology has made a wider range of materials and increased operational competencies a more viable option for firms to consider (Cotteleer and Joyce, 2014).

Augmented-Reality-based systems are composed of services varying from selecting parts in a warehouse to sending repair instructions via mobile devices. Firms will rely on that technology to improve decision-making, work procedures for employees, and provide real-time information (Rüßmann et al., 2015). For example, employees will obtain information about the parts of the machine that need to be repaired using devices such as increased reality glasses. (Rüßmann et al., 2015).

Although it is used by manufacturers, the need for cloud-based software will increase even more due to the operations that require data sharing between firms and external stakeholders. Under the Industry 4.0 regime, the possibility of analyzing large-scale data is useful to make predictions for production activities and is an important issue for industrial technology development.

Considering the empirical literature on the adoption of Industry 4.0 on firm performance, studies are heavily based on developed countries. To illustrate, Chiarini et al. (2020) revealed that the practice of Industry 4.0 in Italian manufacturing results in performance increases in production processes. For some industries, the adoption of Industry 4.0 may generate a direct effect on performance, it affects the outcome through supply chain processes for some others. Delic and Evers (2020) have found that the adoption of Additive Manufacturing in the automotive sector positively affects supply chain flexibility which in turn improves firm performance. Another example is related to cloud ERP systems. Accordingly, the integration of cloud ERP positively affects all the indicators of sustainable performance indicators (Gupta et al., 2020). Some strands of literature deal with the adoption of big data and its performance effects. Mikalef et al. (2020) found that the use of big data analytics for firm operations increases the competitive advantage of the firm because it provides such advantages as higher operational capability.

3. DATA and METHODOLOGY

This study started with a desk-based study using various literature sources as primary data sources such as articles, scientific research, firm reports, and business journal. To find out relevant papers, we chose Industry 4.0, Supply Chain, and Supply Chain Management as keywords to access scientific papers through the Web of Science. After going deeper into the topic, we have extended the keywords by adding two important terms such as Internet of Things (IoT) and Cyber-Physical Systems. The search gave dozens of results, which signals Fourth Industrial Revolution is an emerging term for the literature. Thus, the papers were attentively reviewed to eliminate unrelated ones. The relevant papers were selected among the studies that are directly related to the topic of this study. Finally, 33 scientific papers were left on hand.

Since the purpose of this paper is to show the real interaction between Industry 4.0 and Supply Chain Management, we followed the interview technique to better understand the perceptions of different layers of the selected firm. Interview questions were constructed based on the papers we reviewed.

The interviews were held with representatives in various positions such as managers, engineers, and production line workers from the machinery, food, and automotive spare parts sectors. These sectors were chosen due to their large impact on the country's economy. Moreover, considering the digital transformation of the industry, these sectors are in the first place. (11th Development Plan, 2019-2023). In total, 12 interviews were conducted, and each interview took 40 minutes on average.

To understand the transition phase to Industry 4.0 and its impact on supply chain management, this study constitutes a comprehensive example. Based on our interviews, many questions arise concerning the fourth industrial revolution, technology use, and supply chain management. The interviews include yes-no and open-ended questions such that *"Have you heard the Industry 4.0 term before?" "How much did the Fourth Industrial Revolution affect supply chain management?" "Are your existing supply chain structures compatible with Industry 4.0 solutions?" "How will supply chains be in the future with Industry 4.0 implementations?"* The interview questions were designed according to received answers which can change the next questions for interviewees.

To illustrate, if the term Industry 4.0 is not known, the interview goes on with the questions of technology awareness and use. Since the interviews were held in firms in different sectors, the comparative results of Industry 4.0 applications which show the current and future situations were obtained.

Since the term Industry 4.0 is a new concept for Turkey, there are some uncertainties about the definition and domain of this term for the firms. In many cases, firms are reluctant to share knowledge about their future production activities. Despite these difficulties, we interviewed more than one firm, thereby obtaining comparable experiences.

4. RESULTS

Table 1 demonstrates the detailed information about the selected firms in this study. Also, it shows the organizational changes with the implementation of Industry 4.0 for each firm. To evaluate the results of the interviews, we followed the framework of Orlikowski (1993). For the firms operating in the automotive industry, they are labeled as AU1, AU2, and AU3, respectively. Remained sectors are construction (MS) and food (FS). Additionally, firms are classified in terms of their implementation level such as *implemented*, *almost fully implemented*, and *not implemented*. Table 2 shows the comparison between AU1, MS, and FS.

AU1

AU1 is the leading firm in the automotive supplier industry in Turkey. The technology in the firm plays a significant role in its current position in the sector. During the interview, we observed that they have an advanced workstation and an interest in new technologies in the automotive industry. The interviews were held with three positions as manager, engineer, and assembly line worker. The answers from the manager and the engineer are similar and they both are knowledgeable about the research topic. Besides, they have a high level of interest in technological developments. The production line worker, on the other hand, does not have information about Industry 4.0.

The firm has been invested in technology since it was founded, so Industry 4.0 concept does not refer to a substantial change. The manager gave an example to show how well the firm is compatible with the Industry 4.0 concept. He said that *an Indian group came to the firm to tell Industry 4.0 activities last month and they stayed a week. When the group left, there was nothing new for AU1. The manager added that they were already knowledgeable about Industry 4.0 concept.* The firm is eager to take full advantage of new technologies such as Industry 4.0. The interviewees said that *they were already too digital when the term Industry 4.0 appeared*, and they added that *they can take further steps in the field of Industry 4.0.*

When we check the requirements of the Industry 4.0 concept, it can be observed that the existing systems of the firm are compatible with the system requirements of Industry 4.0. To illustrate, AU1 has various software systems to provide an integration between business units and customers and to control the production process with the minimum involvement of the human factor. The answers to the questions about the future of Industry 4.0, therefore, were positive. According to their perspectives, if firms adopt the Industry 4.0 concept, there will be momentous changes in manufacturing soon. Besides, the interviewees believe that many jobs will disappear, but new ones will emerge shortly after the diffusion of Industry 4.0. Even the people at the bottom of the pyramid will be more skillful because this concept will push people to improve themselves.

Regarding the supply chain management questions, the firm uses Industry 4.0 applications a hundred percent in the supply chain process. The number of blue-collar workers in the supply chain will not change significantly in AU1 but the interviewees do not have the same opinion for the firms which rely on manual processes. If these firms want to be more digital and smarter, they will adopt Industry 4.0, thereby laying off several workers.

The impression during the interview indicates that the decision-makers are aware of Industry 4.0 and the firm makes continuous investments in technological development. There is one problem regarding workers in the production line. They are important actors of the production system, but they do not know the concepts.

AU2

AU2 is one of the new firms in the automotive supplier industry in Turkey. Although the firm has a 10-year history, the technology level is quite satisfactory. Since the founders of the firm are ex-employees of a Japanese brand, the influences of Japanese culture such as lifelong employment and inter-personal trust can be observed. The interviews were held with three positions as manager, engineer, and assembly-line worker. The manager and engineer preferred to answer the questions together due to the unexpected workload at the interview time. During the interview, it is observed that the manager and the engineer are knowledgeable about Industry 4.0, but the assembly line worker is not aware of the term similar to AU1. Thus, the assessment of the firm regarding the implementation of Industry 4.0 is based on the perceptions of two layers.

As the firm was founded in the digital age, the use of advanced technologies can be observed in every single process. Industry 4.0 is interpreted as "the future" by the manager and the engineer. The firm believes that if a well-designed investment is made in technology, the position of the firm gets stronger. AU2 holds several meetings for digitalization which are generally organized by the R&D department. The outcome of the meetings supports that adopting the Industry 4.0 concept increases the efficiency of

business activities. Also, the firm attends domestic and foreign trade fairs for the same purpose. Thanks to the fairs and the meetings, *the firm becomes more innovative day by day*. For instance, new production processes are added to the existing system and all processes are monitored at different points. Besides, the firm uses software systems integrated with suppliers, customers, and internal departments. As far as the questions about the future are considered, the manager and the engineer believe that the production processes will completely change and if employees cannot keep pace with this change, most of them will be eliminated. Additionally, some jobs will disappear, and the number of blue-collar employees will decrease compared to white-collar ones. The manager indicated that Industry 4.0 will upgrade workers and there will not be a significant change in the number of workers in the supply chain because the business volume gradually increases. In the current situation, the firm uses Industry 4.0 sixty percent in the supply chain. The full implementation of the Industry 4.0 concept to the supply chain will reduce the margin of error in production and thus better-quality products will be produced.

The engineer, on the other hand, has a more pessimistic attitude towards the effects of Industry 4.0 on employees. Accordingly, Industry 4.0 will have a deskilling impact on workers. The recruitment process will be conducted based on the requirements of the new business systems.

AU3

Unlike AU1 and AU2, AU3 is a member of an international group. Since the firm produces automotive spare parts, the technological advancement of the firm is at a certain level. However, the other production units of the same international group in different countries use more advanced technology in the production. In AU3, the interviews were held with a manager, an engineer, and a worker from the product line. The answers were not different in terms of the awareness of Industry 4.0 when compared to the other two firms but there are differences concerning the implementation of Industry 4.0.

According to received answers from the manager and the engineer, they are aware of the Industry 4.0 concept but there has not been any specific effort to implement this concept until now. The reason might be that the firm is satisfied with its existing systems or the firm believes that the implementation will be costly. When we compare the responses of the engineer and the manager, the engineer was more excited and interested in the Industry 4.0 concept. The manager, on the other hand, did not seem relevant to the issue of the implementation of Industry 4.0. According to the engineer, if the firm goes on with the current systems, some troubles such as an increasing churn rate and inability to sustain competitive power can appear in the rapidly changing market. AU3 improves itself but not specifically in the field of Industry 4.0. The engineer believes that the Industry 4.0 concept will bring brand-new technological developments and provide a competitive advantage.

MS

The firm has been serving the whole world with business and construction machines since 1972. It has been very successful with its wide product range and quality service. It has been in operation for more than 40 years, specialized in business machines, and provides solutions for customers' commercial needs. It brings together many modern and innovative business lines under the same roof with the leading organizations of the region with 500.000 m² open and closed production area and approximately 1000 personnel in Ankara. Project, R&D, Testing and Quality Control departments, CNC machining, Machining, Heat Treatment, Dyeing, and Sanding centers are the leading units. Also, after-sales services to customers in many countries around the world have 24 /7 service. As a firm operating in the machinery sector; the quality policy is to use advanced technology, to provide customer satisfaction by producing in time, and to comply with the relevant legislation, national and international standards.

The firm exports to many countries such as Kazakhstan, Russian Federation, Azerbaijan, Greece, Turkmenistan, Afghanistan, Syria, Saudi Arabia, Sudan, Libya, Algeria, Iraq, and Ireland. Additionally, it is among the largest working machinery manufacturing firms in Turkey. For this reason, its potential to use "Industry 4.0" applications is quite high. Within the scope of the interview, the firm's general manager, intelligent transportation systems engineer, and warehouse worker were chosen.

In general, there is no complete transition to "Industry 4.0" applications, even though the firm uses the technology extensively. However, the investments in recent technology are quite high. The fact that most of the robotic systems and software they use in production are created by their engineers. Since the firm's product range is wide, transition to "Industry 4.0" will be very costly for the firm. Nevertheless, the firm continues to invest in primary areas in Industry 4.0. According to this information, the firm has the potential to provide full integration in the future. The biggest competitors of this firm are European firms. Thus, it is crucial to increase the quality of the production to sustain a competitive edge in the world markets and it is conditional on introducing technological products.

Table 1. Implementation of Industry 4.0 (AU1, AU2 and AU3)

Categories	Concepts	AU1 (fully implemented)	AU2(almost fully implemented)	AU3 (not implemented)
Environmental Context	Customers	Well-known global automotive brand All car producers operating in Turkey	Well-known global automotive brand	Well-known global automotive brand
	Competitors	The company takes first place in terms of business volume in Turkey All companies which produce automotive spare parts around the globe	There are strong external and internal competitors All companies which produce automotive spare parts around the globe	There are strong external and internal competitors All companies which produce automotive spare parts around the world
	Technologies	Advanced hardware and software Continuous investment in business technologies Industry 4.0 concept can be observed in business activities	Advanced hardware and software Continuous investment in business technologies Industry 4.0 concept can be observed in business activities	Mid-level hardware and software Discontinuous investment in business technologies Industry 4.0 concept is not implemented
Organizational Context	Corporate strategies	To increase profitability for stakeholders To decrease time and costs of technological development To use technology to protect competitive advantage	Large market share in automotive spare parts To decrease time and costs of technological development To use technology to protect competitive advantage	Large market share in automotive spare parts To protect and improve the existing system
	Structure and Culture of firm	Divided business units Hierarchical structure Up or out the career path	Divided business units Hierarchical structure Lifetime employment (Japan culture)	Divided business units Hierarchical structure Lifetime employment (Japan culture)
	Role of IS for firm	New brand systems/technologies are always being developed for optimal production	New brand systems/technologies are always being developed for fast-growing and competitive advantage	To ensure the continuity of the current system
IS context	IS structure and operations	Similar but slightly modified applications for different departments To provide integrity	Integrated common applications exist	Integrated common applications exist
	IS policies and practices IS staff	No standardization The innovation department identifies the strategies for technology Skilled employees are considered for recruitment	No standardization R&D department identifies the strategies about technology New graduates and skilled employees are considered for recruitment	No standardization The same technology strategies for a long time Mid-skilled and skilled employee are considered for recruitment

Table 1. (Continued)

Categories	Concepts	AU1 (fully implemented)	AU2(almost fully implemented)	AU3 (not implemented)
Conditions for adopting and using Industry 4.0	Articulating IS problems	Increased demand from stakeholders for better applications	Increased demand from stakeholders for better applications In-house employee training for new technologies	Nothing new because the company is going on with the existing systems
	Formulating Industry 4.0 intentions	No significant change Increased productivity Decreased time and costs of technological development Reached a better point for competitive advantage	No significant change because the company was born into technology in 2007 Decreased time and cost of technological development Reached a better point for competitive advantage	Industry 4.0 is not implemented
Adopting and using Industry 4.0 concept	Acquiring Industry 4.0 requirements	In-house development by investing in existing systems	In-house development by investing existing systems	Industry 4.0 concept is not fully implemented
Consequences of adopting and using Industry 4.0	Changing IS policies and practices	No significant change due to great technological history	No significant change	No change
	Changing the IS structure and operations	No significant change due to great technological history	No significant change	No change
	Stakeholders' reactions	Impressed stakeholders due to facilitated businesses	Impressed stakeholders due to facilitated businesses especially customers	Industry 4.0 concept is not implemented Fix and regular business with customers for a long time Few workers have a fear of being removed if Industry 4.0 is implemented

Table 2. Implementation of Industry 4.0 (AU1, MS and FS)

Categories	Concepts	AU1 (fully implemented)	MS (Industry 4.0 not fully implemented)	FS (Industry 4.0 not implemented)
Environmental Context	Customers	Well-known global automotive brand All car producers operating in Turkey	Domestic market Turkish Republic and Balkan countries the Middle East countries	Regional local stores Grocers Wholesalers
	Competitors	The company takes first place in terms of business volume in Turkey All companies which produce automotive spare parts around the globe	Companies producing work machines in Germany Companies engaged in the production of work machines in the domestic market	The other jam and candy companies in Turkey
	Technologies	Advanced hardware and software Continuous investment in business technologies Industry 4.0 concept can be observed in business activities	The software designed within the company such as vehicle tracking systems, fuel tracking systems, and ERP modules Geat interest and investment in technology	The vehicle tracking system, RFID, and handheld terminal
Organizational Context	Corporate strategies	To increase profitability for stakeholders To decrease time and costs of technological development To use technology to protect competitive advantage Divided business units Hierarchical structure Up or out a career path	Maximum profit and quality in production To reach sufficient production capacity for the domestic market To reduce dependence on Europe Divided business units due to the broad product range Hierarchical structure Specialization is important Competitive and open to innovation	Maximum profit and quality in production Reach sufficient production capacity for domestic market Maximize customer satisfaction The variety of production is high No fully hierarchical because it is a family company Open to innovation
	Role of IS for a firm	New brand systems/technologies are always being developed for optimal production	Intensive IS is used for maximum productivity and quality in production	Traditional methods in production are better The technology is not being used extensively
IS context	IS structure and operations	Similar but slightly modified applications for different departments To provide integrity	Integrated common applications exist	Few integrated applications exist
	IS policies and practices	No standardization	No standardization	To provide standardization
	IS staff	The innovation department identifies the strategies for technology Skilled employees are considered for recruitment	R&D department identifies the strategies for technology New graduates and skilled employees are considered for recruitment	Employees in the production are experts Qualified employees are considered for recruitment

Table 2. (Continued)

<i>Categories</i>	<i>Concepts</i>	<i>AU1 (fully implemented)</i>	<i>MS (Industry 4.0 not fully implemented)</i>	<i>FS (Industry 4.0 not implemented)</i>
Conditions for adopting and using Industry 4.0	Articulating IS problems	Increased demand from stakeholders for better applications	The cost of new technology integration is high	The transition from the traditional method to the technological method (difference in the taste between traditional production and technological production)
	Formulating Industry 4.0 intentions	No significant change Increased productivity Decreased time and costs of technological development Reached a better point for competitive advantage	To increase production and productivity Cost reduction	To increase production and productivity To reduce costs To improve customer satisfaction
Adopting and using Industry 4.0 concept	To acquire Industry 4.0 requirements	In-house development by investing in existing systems	Industry 4.0 concept is not fully implemented	Industry 4.0 concept is not fully implemented
Consequences of adopting and using Industry 4.0	Changing IS policies and practices	No significant change due to great technological history	No significant change	No significant change
	Changing the IS structure and operations	No significant change due to great technological history	No significant change	No significant change
	Stakeholders' reactions	Impressed stakeholders due to facilitated businesses	Stakeholders are about to impress due to facilitated businesses Few workers have a fear of being removed from work if the industry 4.0 concept is fully implemented	Industry 4.0 concept is not implemented Fix and regular business with customers for a long time

During the interview, participants answered all questions about Industry 4.0. Only the assembly line worker was reluctant to answer the question because he had no information about "Industry 4.0". The interview with him proceeded more on technological awareness. As far as "Industry 4.0" is considered, we concluded that future technologies create anxiety for blue-collar workers. If the firm accomplishes a complete transition to Industry 4.0, the competence and continuity of the workers will be a very important issue for them. From a managerial point of view, Industry 4.0 has no disadvantages except costs. For engineers, the intensive use of technology is a great advantage. They know that new systems can produce flawless, efficient, and quality products. For this reason, Industry 4.0 for both positions is a very important investment area.

Since the cost of infrastructure is quite high, the transition period to the "Industry 4.0" applications does not occur rapidly. In this regard, the executive director emphasized the importance of state intervention as a solution. The excessive cost of necessary infrastructure negatively affects this process and it is thought that this problem can only be solved with government support.

As for the firm's supply chain management process, it can be observed that some Industry 4.0 technologies such as vehicle and fuel monitoring systems have been implemented. However, there is no complete transition in this section. Additionally, the supply chain process is a crucial element of the general vision of the firm. We, therefore, propose that supply chain management systems should be in the first place in the investment decision. Based on the current state of the firm and its future goals, it can be concluded that this firm can achieve full integration in the future. The transition period is not difficult for this firm, which uses technology extensively. It is thought that there will be no adaptation problem due to the presence of skilled employees in the firm.

FS

The firm operating in the food sector is one of Turkey's leading traditional food manufacturing firms. It was founded in 1989 as a family business. It produces goods such as "halva", "tahini", "molasses", "jam" and "Turkish delight". The firm emphasized the important role of the supply chain to meet customers' needs. We chose this firm to examine how the adoption process of advanced technology occurs in the low-tech sector such as food. Interviews were held with the firm's general manager and production engineer. The assembly line worker did not participate in the interview due to the intensive workload. The answers given by the manager and the engineer are similar. They do not have a deep knowledge of the issue because they use traditional methods in production.

According to the answers given by the manager and the engineer, they are aware of the concept of Industry 4.0, but no attempt has been made to apply this concept until now. There are various reasons for not adopting these technologies. First, firms rely on the existing technology since they are satisfied with the efficiency of the traditional methods. The second and most important reason is the costs of implementation. According to the engineer, the firm will keep using traditional methods in the future. However, this attitude will cause an undesired situation such as losing competitive power in the market.

Table 3 demonstrates the evaluation of firms' supply chain and Industry 4.0 situation by considering 6 variables including infrastructure, flexibility, efficiency, competitiveness, profitability, risk, and cost. The table enables us to understand why one case is different from the others.

Table 3. Evaluation of Industry 4.0 performance

	<i>Infrastructure for Industry 4.0</i>	<i>Flexibility</i>	<i>Efficiency</i>	<i>Competitiveness</i>	<i>Profitability</i>	<i>Industry 4.0 Implementation Risk and Cost</i>
AU1	Fully suitable	High level	High level	Forerunner	Very high level	Very low
AU2	Suitable	High level	Midlevel	Above average	High level	Very low
AU3	Suitable	Low level	Midlevel	Average	Midlevel	Very High
MS	Suitable	High level	Midlevel	Above average	Very high level	Low
FS	Not fully suitable	Very low level	High level	Above average	High level	Very High

The analysis makes it possible to compare firms from different perspectives. Scaling is performed according to the answers received in the interviews and a 1-5 rating scale is used for each variable. Infrastructure indicates the readiness of the current infrastructure of the firms regarding Industry 4.0 technologies. "Not fully suitable" means that the firm cannot shift to Industry 4.0 because its infrastructure is not ready. "Fully suitable", on the other hand, shows the presence of adequate infrastructure. We also

include the term of flexibility which shows the exchangeability of products in the production lines and the changeability of the existing system against new advanced systems. Scaling is performed in terms of the flexibility of the production line. Efficiency reflects how well the firms use their existing systems and how efficiently these systems operate. Competitiveness gives information about the position of the firms in the Turkish market. The comparison is made based on other competitors in the same industry. Profitability shows the value of the operations while risk and cost express the consequences of adopting the Industry 4.0 concept.

AU1: Since the firm's infrastructure is fully suitable for Industry 4.0 with low implementation risk and cost, full integration is provided. Besides, the flexibility and efficiency in supply chain management (SCM) are achieved at a high level. It makes the firm have a strategic position in comparison to the others in the same industry. Considering these factors and feedbacks from the interviewees, firm AU1 has a very high margin of profitability.

AU2: Being a young firm provides a great advantage in terms of shifting to Industry 4.0. So, it has adopted this concept to a large extent and has achieved a certain level of progress such as increased flexibility and efficiency in its production lines. With the low risk and cost, the firm has above average competition rate with high profitability.

AU3: The firm's infrastructure is suitable for industry 4.0, but due to its costs, the firm may not be able to integrate in a short time, thus flexibility is low. Although the industry has not made the transition to Industry 4.0, the market share is high which gives it a competitive advantage above the average.

MS: The firm's infrastructure is suitable for "Industry 4.0", so there is no obstacle for full integration in the future. The firm provides flexibility in SCM to a large extent. However, since full integration cannot be provided in the current situation, the level of efficiency is not that high. The use of technology is lower compared to international competitors, so the firm can compete at a moderate level. Regarding the general situation of the firm, it is one of the sector leaders with a high level of profitability. It is costly and risky to provide full integration due to the wide product range.

FS: The firm's infrastructure is not suitable for the Industry 4.0 concept and no attempt has been made to implement this concept. FS is apt to use traditional methods since they believe that they are more productive than new technologies. Additionally, they are costly and risky. Thus, flexibility in the supply chain is quite low. The productivity level, on the other hand, is high since it sustains its profitability using traditional methods, and the firm has a competitive power above the average in the market.

5. CONCLUSION and DISCUSSION

Industry 4.0 or Smart Manufacturing is the fourth industrial revolution. It could be a modern worldview and the joining of cutting-edge ICT and fabricating innovations. It offers successful and optimized choices. For the recognition of Smart Manufacturing, the latest modern technologies range from CPS, cloud manufacturing, enormous information analytics, IoT, and smart sensors to added substance fabricating, and 3D image.

The expanded consideration developed by this new mechanical worldview commonly known as Industry 4.0 has raised numerous questions regarding the scope of the concept and its implications, as well as the innovative advancements to be fulfilled. Based on the literature review conducted at the beginning of the study, to our knowledge, no studies have examined the different sectors and the perspectives of the different layers of the firm regarding Industry 4.0 and its effect on the supply chain management system.

Prior research has documented that, Industry 4.0 implementation has positive effects on firm performance and the supply chain systems. However, these studies do not analyze the whole system in a broader perspective by considering the opinions of managers, engineers, assembly-line workers, and their future predictions. In this study, three firms from the automotive sector were evaluated and the most successful automotive firm that adopted Industry 4.0 within its Supply Chain was compared with the other two firms from the food and machinery sectors. Hence, clear considerations can be acknowledged from the usage of Industry 4.0 from these evaluations.

The collaboration between machines and people may socially affect the life of the specialists in the long run. From the analysis executed, it can be seen that the implementation of certain technologies within the supply chain process can result in both opportunities for organizational perspective and threats for employees in the long run due to the minimum involvement of human factor with the adoption of Industry 4.0. Although previous studies provide a comprehensive perspective on the implementation of Industry 4.0 (Dalenogare et al. 2018) by exploiting secondary data, this study presents detailed information about each firm by applying a case study approach.

According to the interview results, managerial and engineer level workers of these five firms have a certain level of knowledge on Industry 4.0. Except for the firm in the food industry, which uses traditional production methods, Industry 4.0 has a positive influence on firm operations. Moreover, this study shows that Industry 4.0 integration into production systems could have negative effects on product quality which affects customer satisfaction and profitability in the long run. Workers at the bottom of the pyramid-*assembly line workers*-also have concerns about this new concept. They worry about losing their jobs, or not being able to adapt themselves to new technology and systems. As far as the implementation of Industry 4.0 across the industry is considered, we observe that firms lag the recent developments.

There are some limitations regarding the size of the sample, which thus constrain the generalizability of this study. Further studies may include firms from different industries and other stakeholders such as competitors and suppliers. Notwithstanding limitations, this study provides a comprehensive understanding of the link between the Industry 4.0 applications and supply chain management systems.

REFERENCES

- 11th Development Plan (2019-2023). <https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2019/07/OnbirinciKalkinmaPlani.pdf> (Erişim tarihi:30.09.2021).
- Baheti, R. and Gill, H. (2011). "Cyber-Physical Systems", *The Impact of Control Technology*, 12(1),161-166.
- Brettel, M., Friederichsen, N., Keller, M. and Rosenberg, M. (2017). "How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective", *International Journal of Information and Communication Engineering*,8(1), 37-44.
- Brewster, S. (2016). "The Age of Autonomous Robots is Upon Us", <https://fortune.com/2016/03/29/autonomous-robots-startups> (Erişim tarihi:10.12.2021).
- Chiarini, A., Belvedere, V. and Grando, A. (2020). "Industry 4.0 Strategies and Technological Developments. Exploratory Research from Italian Manufacturing Companies", *Production Planning & Control*, 31(16), 1385-1398.
- Cotteleer, M. and Joyce, J. (2014). "3D Opportunity for Production: Additive Manufacturing Makes Its (Business) Case", *Deloitte Review*, 15, 146-161.
- Dalenogare, L.S., Benitez, G.B., Ayala, N.F. and Frank, A.G. (2018). "The Expected Contribution of Industry 4.0 Technologies for Industrial Performance", *International Journal of Production Economics*, 204, 383-394.
- Delic, M. and Eysers, D.R. (2020). "The Effect of Additive Manufacturing Adoption on Supply Chain Flexibility and Performance: An Empirical Analysis from the Automotive Industry", *International Journal of Production Economics*, 228, 107689.
- Fitzgerald, J. and Quasney, E. (2017). "Using Autonomous Robots to Drive Supply Chain Innovation", *Deloitte Perspectives*, 1-12.
- Gupta, S., Meissonier, R., Drave, V.A. and Roubaud, D. (2020). "Examining the Impact of Cloud ERP on Sustainable Performance: A Dynamic Capability View", *International Journal of Information Management*, 51, 102028.
- Haaker, T., Ly, P.T.M., Nguyen-Thanh, N. and Nguyen, H.T.H. (2021). "Business Model Innovation Through the Application of the Internet-of-Things: A Comparative Analysis", *Journal of Business Research*, 126, 126-136.
- He, K. and Jin, M. (2016). "Cyber-Physical Systems for Maintenance in Industry 4.0", <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1071443/FULLTEXT01.pdf> (Erişim Tarihi: 30.09.2021).
- Hermann, M., Pentek, T., Otto, B., Pentek, T. and Otto, B. (2015). "Design Principles for Industry 4.0 Scenarios: A Literature Review", *49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, 3928-3937.
- Hofmann, E. and Rüsç, M. (2017). "Industry 4.0 and the Current Status as well as Prospects on Logistics", *Computers in Industry*, 89, 23-34.
- Holdowsky, J., Mahto, M., Raynor, M.E. and Cotteleer, M. (2015). "Inside the Internet of Things (IoT), Deloitte University Press, 1-54.
- Holler, J., Tsiatsis, V., Mulligan, C., Karnouskos, S., Avesand, S. and Boyle, D. (2014). "From Machine-to-Machine to the Internet of Things: Introduction to a New Age of Intelligence", Academic Press, Oxford.
- Kagermann, H., Wahlster, W. and Helbig, J. (2013). "Recommendations for Implementing the Strategic Initiative Industrie 4.0", Final Report of the Industrie 4.0 Working Group, Forschungsunion: Berlin, Germany.
- Mikalef, P., Krogstie, J., Pappas, I. O. and Pavlou, P. (2020). "Exploring the Relationship between Big Data Analytics Capability and Competitive Performance: The Mediating roles of Dynamic and Operational Capabilities", *Information & Management*, 57(2), 103169.
- Monnier, O. (2013). A Smarter Grid with the Internet of Things, Texas Instruments, 1-11.
- Monostori, L. (2015). "Cyber-Physical Production Systems: Roots from Manufacturing Science and Technology", *at-Automatisierungstechnik*, 63(10), 766-776.
- Mussomeli, A., Gish, D. and Laaper, S. (2016). The Rise of the Digital Supply Network: Industry 4.0 Enables the Digital Transformation of Supply Chains, *Deloitte Insights*, 1.
- Orlikowski, W.J. (1993). CASE Tools as Organizational Change: Investigating Incremental and Radical Changes in Systems Development", *MIS Quarterly*, 309-340.
- Parvin, S., Hussain, F.K., Hussain, O.K., Thein, T. and Park, J.S. (2013). "Multi-Cyber Framework for Availability Enhancement of Cyber-Physical Systems", *Computing*, 95(10-11), 927-948.
- Prifti, V., Markja, I., Dhoska, K. and Pramono, A. (2020). "Management of Information Systems, Implementation, and Their Importance in Albanian Enterprises", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 909(1), 012047. IOP Publishing.
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P. and Harnisch, M. (2015). "Industry 4.0: The future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries", *Boston Consulting Group*, 9(1), 54-89.

- Sanders, A., Elangeswaran, C. and Wulfsberg, J.P. (2016). "Industry 4.0 Implies Lean Manufacturing: Research Activities in Industry 4.0 Function as Enablers for Lean Manufacturing", *Journal of Industrial Engineering and Management*, 9(3), 811-833.
- Schmidt, R., Möhring, M., Härting, R.C., Reichstein, C., Neumaier, P. and Jozinović, P. (2015). "Industry 4.0-Potentials for Creating Smart Products: Empirical Research Results", *International Conference on Business Information Systems*, 16-27.
- Sniderman, B., Mahto, M. and Cotteleer, M. (2016). "Industry 4.0 and Manufacturing Ecosystems". Deloitte University Press.
- Stock, T. and Seliger, G. (2016). "Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0", *Procedia CIRP*, 40, 536-541.
- Tepeš, M., Krajnik, P., Kopač, J. and Semolič, B. (2015). "Smart Tool, Machine, and Special Equipment: An Overview of the Concept and Application for the Toolmaking Factory of the Future", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 37(4), 1039-1053.
- Thames, L. and Schaefer, D. (2016). "Software-Defined Cloud Manufacturing for Industry 4.0", *Procedia CIRP*, 52, 12-17.
- Tjahjono, B., Esplugues, C., Ares, E. and Pelaez, G. (2017). "What Does Industry 4.0 Mean to the Supply Chain?", *Procedia Manufacturing*, 13, 1175-1182.
- Tortorella, G.L. and Fettermann, D. (2018). "Implementation of Industry 4.0 and Lean Production in Brazilian Manufacturing Companies", *International Journal of Production Research*, 56(8), 2975-2987.
- Wahlster, W., Grallert, H.J., Wess, S., Friedrich, H. and Widenka, T. (2014). "Towards the Internet of Services: The Theseus Research Program", Springer.
- Zheng, T., Ardolino, M., Bacchetti, A., Perona, M. and Zanardini, M. (2019). "The Impacts of Industry 4.0: A Descriptive Survey in the Italian Manufacturing Sector", *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(5), 1085-1115.

KONFEKSİYONDA DİJİTAL NUMUNE İLE FİZİKSEL NUMUNE ÜRETİM SÜREÇLERİNİN VERİMLİLİK VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK AÇISINDAN KARŞILAŞTIRILMASI

Derya TATMAN¹, Ali Serkan SOYDAN², Buse GÜMÜŞ³

ÖZET

Amaç: Bu çalışma ile hazır giyim işletmelerinde uygulanmakta olan, geleneksel numune üretim yöntemi ile dijital iş akışının kullanıldığı sanal numune üretim yönteminin verimlilik ve sürdürülebilirlik açısından karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Yöntem: Çalışma hazır giyim sektöründe hem geleneksel hem de dijital numune üretim yöntemlerini kullanan bir tekstil firmasında uygulamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Belirlenen dört farklı model geleneksel ve dijital üretim süreçleri kullanılarak eş zamanlı üretilmiş, elde edilen veriler verimlilik ve sürdürülebilirlik açısından karşılaştırılmıştır.

Bulgular: Çalışmada seçilen dört model için yapılan karşılaştırmada %80 oranında maliyetlerden tasarruf sağlandığı görülmüştür. Geleneksel numune üretiminde belirgin miktarda pastal kâğıdı, yan ürün ve kumaş sarfiyatı oluşurken; dijital numune üretiminde, kâğıt, yardımcı malzeme kullanılmamış, kumaş ise fiziksel testler için çok az miktarda kullanılmıştır.

Özgünlük: Dijital iş akışı ile ilgili daha çok ölçülendirme ve gerçekliğe uygunluk yönünden çalışmalar mevcuttur. Ancak, dijital numune üretim süreci ile geleneksel numune üretim süreçlerinin verimlilik ve sürdürülebilirlik açısından karşılaştırıldığı çalışmalara rastlanmamıştır.

Anahtar Kelimeler: Konfeksiyonda Verimlilik, Numunede Dijital İş Akışı, Örne Konfeksiyonu, Sürdürülebilirlik, 3D Moda Tasarım.

JEL Kodları: C88, D24, M15, L67, Q56.

COMPARISON OF DIGITAL SAMPLE AND PHYSICAL SAMPLE PRODUCTION PROCESSES IN APPAREL IN TERMS OF PRODUCTIVITY AND SUSTAINABILITY

ABSTRACT

Purpose: This study aims to compare the traditional sample production method and the virtual sample production method, which uses digital workflow in terms of efficiency and sustainability.

Methodology: The study was conducted practically in a textile company that uses traditional and digital sample production methods in the ready-to-wear industry. The four different models have been produced simultaneously using conventional and digital production processes, and obtained data have been compared regarding efficiency and sustainability.

Findings: The comparison made for the four models selected in the study reveals that 80% cost savings were achieved with digital sample production. While a significant amount of marker paper, by-product, and the fabric is consumed in traditional sample production, never used paper and auxiliary materials in digital samples, and used a minimum amount of fabric for testing. It is thought that the spread of the digital workflow will contribute to the increase companies' efficiency.

Originality: There are studies on the digital workflow in terms of more dimensioning and conformity to reality. However, no studies compare the digital sample production process and traditional sample production processes in terms of efficiency and sustainability.

Keywords: Productivity in Apparel, Digital Workflow in the Sample, Knitting Apparel, Sustainability, 3D Fashion Design.

JEL Codes: C88, D24, M15, L67, Q56.

¹ Dr. Öğretim Üyesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Tasarım Bölümü, Moda Tasarımı Programı, Denizli, Türkiye, dtatman@pau.edu.tr, ORCID: 0000-0001-8498-2512.

² Dr. Öğretim Üyesi, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Denizli, Türkiye, assoydan@pau.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2398-3305 (Sorumlu Yazar-Corresponding Author).

³ Tekstil Y. Müh., İzmir, Türkiye, busegumus90@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2137-694X.

1. GİRİŞ

Günümüzde tekstil işletmelerinin uluslararası pazarda rekabet edebilmeleri üretim süreçlerinin her aşamasında verimliliği artırmalarıyla mümkün olacaktır. Ancak bunu yaparken sürdürülebilir üretim unsurlarını da göz önünde bulundurmaları gerekmektedir. Dünya Doğayı Koruma Vakfı (WWF) Yaşayan Gezegen Raporu'nda (2020) "işlerin her zamanki gibi yürütüldüğü durumda" 2030 yılında insanlığın, yıllık talebini karşılamak için, iki gezegene ihtiyaç duyulacağı belirtilmektedir (Dünya Doğayı Koruma Vakfı, 2021).

İklim değişikliğinin etkilerini daha da belirgin yaşamaya başladığımız son yıllarda, kıt kaynakların verimli kullanılmasının önemi bir kez daha ortaya çıkmıştır (Duman Altan ve Sağbaş, 2020). Tekstil ürünlerinin ön terbiye ve boyama süreçlerinde suyun yoğun bir şekilde kullanıldığı bilinmektedir (Orhon ve diğerleri, 2006). Son yıllarda süper kritik karbondioksit ile susuz boyama üzerine çalışmalar ağırlık kazanmıştır (Odabaşoğlu ve diğerleri, 2013). Hemen hemen bütün uluslararası hazır giyim markaları internet sayfalarında sürdürülebilirlik sekmesi altında çevreye olan duyarlılıklarını ve sürdürülebilirliğe yaptıkları katkıları paylaşmaktadır. Kullanılmayan kıyafetlerin geri dönüştürülmek üzere toplanması, kıyafetlerin satın alınmayıp kiralanması yöntemi çevre duyarlılığına örnek olarak verilebilir (Hennes ve Mauritz, 2021; Inditex, 2021). Türkiye'deki tekstil hazır giyim üreticileri de üretimlerini Küresel Geri Dönüşüm Standardı (Global Recycle Standard-GRS), Organik İçerik Standardı (Organic Content Standard-OCS), Küresel Organik Tekstil Standardı (Global Organic Textile Standard-GOTS) vb. belgelendirme standartlarını sağlayacak şekilde yapılandırmaktadır (Control Union, 2021). Belgelendirme süreçleri ekolojik açıdan sürdürülebilirliğe katkı sağlarken, artan enerji maliyetleri işletmelerin enerji yönetimi ilkeleri belirlemesini (Palamutcu, 2010) ve verimliliklerini artırmaya yönelik çalışmalar yapmasını (Çalık, 2021) zorunlu hale getirmiştir.

Verimlilik, genel anlamıyla üretim araçlarının ekonomik etkinliklerinin bir bütün olarak ölçülmesi olarak tanımlanabilir (Güner ve Yücel, 2014). Dolayısıyla üretim sürecinde yapılacak her türlü iyileştirme verimliliğe olumlu yönde katkı sağlayacaktır (Güner, 2005). Hazır giyim sektöründe ürün maliyetinin yarısına yakını kumaş maliyeti oluşturmaktadır. Bu nedenle kumaş ve diğer ham maddelerin kullanımı verimliliği doğrudan etkilemektedir (Baykal ve Göçer, 2012). Numune üretiminde, kaynak kullanımının en aza indirilerek üretimde yüksek verim oranını sağlamak öncelikli amaç olmalıdır. Düşük adetlerde ve farklı varyasyonlarda yapılan numunelerde kullanılmak üzere gerekli olan kumaş ve aksesuarlar mevcut stoktan kullanılabilirdiği gibi çoğunlukla yeniden üretilme gereksinimini gündeme getirmektedir. Hazırlanan kumaş ve yan ürünler sadece numuneye özgü olup olası fire ve kayıplar için sipariş miktarından daha fazla miktarda yapılması gerekebilmektedir. Bu durum verimlilik ve sürdürülebilirlik açısından işletmeyi olumsuz etkilemektedir.

Teknolojik gelişmelerle birlikte bir diğer seçenek olan dijital numune; avatar (sanal manken), 2D kalıplar, tekstil malzemeleri ve yan ürünlerinin 3D moda tasarım programında bir araya getirilmesi ile oluşmaktadır. Sanal dikim ve giydirmeye çalışması sonrası render ve animasyon işlemleri yapılmaktadır (Makryniotis, 2015: 8). Dijital numunede kullanılan kalıplar ve malzemeler geleneksel numune üretim yönteminde kullanılanlar ile aynıdır. Ayrıca dijital numunede manken ölçüleri ürün ölçü tablosuna göre tanımlandığı için üretilen numune geleneksel numune ile birebir uyum sağlamaktadır. Günümüzde dijital numune üretimi yaygınlaşmaktadır. Ortaya çıkan atık, hesaplanan birim maliyetler fiziksel numune ile dijital numune arasında verimlilik ve sürdürülebilirlik açısından ciddi farklılıklar olduğunu düşündürmektedir. Piyasada dijital numune üretimi için çeşitli yazılımlar bulunmaktadır. Çalışmada dijital numune üretimi Browzwear- VStitcher yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada dört ayrı ürün için dijital ortamda hazırlanan sanal numunelerin; süre ve maliyet bakımından verimlilik karşılaştırması yapılmış; ayrıca numune hazırlık süreçleri atık oluşmaması yönüyle de karşılaştırılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Balkan (2019), çalışmada konfeksiyon sektöründe faaliyet gösteren bir firmanın kapasite düşüş nedenlerini verimlilik parametreleri üzerinden incelemiş, mali verileri değerlendirerek sorunun çözümüne ulaşmayı amaçlamıştır. Yöntem olarak RAMSAY verimlilik modelleme sisteminin kullanıldığı çalışmada, işletmenin mali verileri kullanılarak, dönemsel verimlilik, toplam faktör verimliliği, sermaye verimliliği gibi analizler yapılmıştır.

Subhashini ve Varghese (2021) uygulamalı çalışmalarında konfeksiyon sektöründe iş ve zaman etüdünün etkin kullanılması ve çalışanların teşvik primleriyle motive edilmesi ile verimliliğin arttığını saptamışlardır. Slović ve diğerleri (2016) bir Sırp konfeksiyon işletmesinde 5 yıl süren çalışmalarında, firmanın çalışanlara üretim kârından pay vermesi ve bu durumu sürekli iyileştirmelerle desteklemesi halinde üretimin istatistiki olarak arttığını ortaya koymuşlardır. Gambhir ve Sharma (2015) Hindistan'daki 160 adet büyük ve küçük ölçekli tekstil işletmelerinin verimlilik yeterliliğini incelemişlerdir. Malmquist verimlilik indeksi

hesaplamasının kullanıldığı makalede; teknolojinin değişimi ve ölçek verimliliği, firmaların verimliliğini etkileyen iki temel unsur olarak belirtilmiştir. Rehman ve diğerleri (2019) üretimde aksaklıklar yaşayan bir konfeksiyon işletmesinde iş kıyafeti üretimi sürecinde dengeli malzeme akışı ve iş-zaman etüdünü uygulayarak hazır giyim üretiminde verimliliği artırmaya yönelik bir çalışma yapmışlardır.

Küçük ve Güner (2015), çalışmalarında ihracat yapan bir hazır giyim işletmesinin ürün siparişinden, ürünün dikilip paketlenmesine kadar olan tüm süreçleri zaman bazında incelemiştir. Çalışmada siparişe yönelik Ağ Planı-CPM (Critical Path Method) oluşturulmuş ve sayısal olarak değerlendirilmiştir. Verimlilik kaybını önlemek, diğer bir deyişle verimi artırmak için; numune kalıplarının bilgisayar ortamında oluşturulması, üretimin günlük ve haftalık olarak sürekli takip edilmesi ve hat dengelemelerinin yapılması önerilmiştir. Morshed ve Palash (2014) araştırmalarında konfeksiyon üretim sürecinde katma değeri olmayan operasyonları çıkartarak hat dengeleme yöntemiyle iş yükünün tüm üretim bandına eşit dağıtılması ve verimliliğin artırılması yönünde çalışmışlardır. Benzer şekilde Bappy ve diğerleri (2019), hat dengeleme yöntemi ile üretim bandı verimliliğini ve iş gücü verimliliğini artırmayı amaçlayan bir çalışma yapmışlardır. Shumon ve diğerleri (2010), bir hazır giyim işletmesinde seri üretimde bant sisteminde geleneksel ve dengeli yerleşim modelinin uygulandığı bant sistemlerinde üretimde verimlilik iyileştirme üzerine çalışmışlardır. Paşayev (2010), konfeksiyon ürünlerinde maliyetlerin neredeyse %50'sini kumaş giderlerinin oluşturduğunu, kumaş giderlerinin de yaklaşık %25'ini kumaş kayıplarının oluşturduğunu belirtmiştir. Bu doğrultuda optimum pastal yerleşim planının oluşturulması konusunda uygulamalı çalışma yapmıştır.

Bilgiç ve Baykal (2017), yaptıkları çalışmada örme konfeksiyonu için hazırlanmış birbirinden farklı sayı ve şekilde 6 model kalıbı, 3 farklı endeki 4 farklı kumaş türüne uygulanmıştır. Pastal kesim yerleşimi için Gemini NestEXPERT programının kullanıldığı çalışmada pastal çiziminin fire miktarını etkileyebilecek parametreler belirlenmeye çalışılmıştır. Araştırmada ikinci kalite ürün maliyeti bağımlı değişken olarak belirlenmişken model, kumaş en ve kumaş türleri bağımsız değişkenler olarak belirlenmiş ve aralarındaki ilişki istatistiksel olarak analiz edilerek yorumlanmıştır. Baykal ve Göçer (2012), çalışmalarında konfeksiyonda maliyetlerinin yarısının kumaş maliyetleri olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmada, farklı kumaş türleri ile farklı modellerin çalışılması sırasında verimlilik ve kalite oranları değerlendirilmiştir. Mridha ve diğerleri (2020), Bangladeş'te faaliyet gösteren bir hazır giyim üreticisinde 5S modelini uygulayarak en fazla verimlilik ve en az kayıp ile üretimde iyileştirme süreci ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Kapuria ve diğerleri (2017), çalışmalarında, Bangladeş'teki bir hazır giyim sektöründe verimlilik artışını sağlamak amacıyla; dikiş kusurlarının temel nedenlerini belirlemiş ve Kaizen (Sürekli iyileştirme) sistemi aracılığıyla kusurları azaltarak sürekli iyileştirme yapmışlardır. Güner ve Yücel (2014), bir hazır giyim işletmesinde, bir kadın elbisesinin üretiminde verimliliği artırıcı metotlar belirlenmiş, uygulanan metotların ardından elde edilen sonuçlar analiz edilerek yorumlanmıştır.

Tanvir ve Ahmed (2013), Bangladeş'te hazır giyim sektörünü incelemişlerdir. İş etüdünün hazır giyim üretiminde verimliliği artırmada önemli bir etken olduğunu vurgulamışlar, çalışmalarında bu alandaki literatürden derleme yapmışlardır. Kanat ve Güner (2007) çalışmalarında tekstil ve hazır giyim işletmelerinde uygulanmakta olan verimlilik ölçüm yöntemlerini sunmuşlardır. Lin ve diğerleri (1994) konfeksiyon sektöründe verimlilik ve üretim konulu derleme çalışma yapmıştır.

Hazır giyim sektöründe sürdürülebilirliğe ilişkin çalışmalar incelendiğinde; Tanvir ve Ahmed (2013), hazır giyim üretimi yapan bir işletmede, ilk seferde uygun kalitede üreterek, süreç performansını iyileştirme, kaynakların doğru kullanımı, varyasyonları azaltma ve süreç çıktısının tutarlı kalitesini koruyarak verimliliği artırma, atıkları azaltma yönünde araştırma yapmışlardır. Eser ve diğerleri (2016), tekstil ve hazır giyim sektöründe sürdürülebilirlik üzerine incelemeler yapmışlar, sektörde geri dönüşüm ve atık yönetimi konusunda dünya genelinden örneklemeler yapmışlardır. Mothilal ve Prakash (2018), çalışmalarında konfeksiyon sektöründe, yalın üretim yöntemini uygulayarak atık oranını ve üretim süresini azaltmayı ve üretimde kalite ile verimliliği artırmayı sağlamayı hedeflemişlerdir.

Literatürde verimlilik modelleme sistemi çalışmaları, verimlilik indeksi hesaplamaları, iş ve zaman etütleri, yalın üretim teknikleri, hat dengelemeleri, konfeksiyonda pastal fire hesaplamaları, geri dönüşüm ve atık yönetimi gibi çalışmaların yapıldığı görülmektedir. Ayrıca, dijital iş akışı ile ilgili daha çok ölçülendirme ve gerçekliğe uygunluk yönünden çalışmalar mevcut olup dijital numune üretim süreci ile geleneksel numune üretim süreçlerinin üretim süresi, işçilik, kumaş ve sarf malzeme maliyetleri açısından karşılaştırıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Araştırmanın bu yönüyle literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

3. YÖNTEM

Çalışma Ege Bölgesi'nde faaliyet gösteren yıllık 20 milyon parça üretim kapasitesi olan büyük ölçekli bir hazır giyim işletmesinde gerçekleştirilmiştir. Firma müşteri taleplerine göre; geleneksel hazır giyim

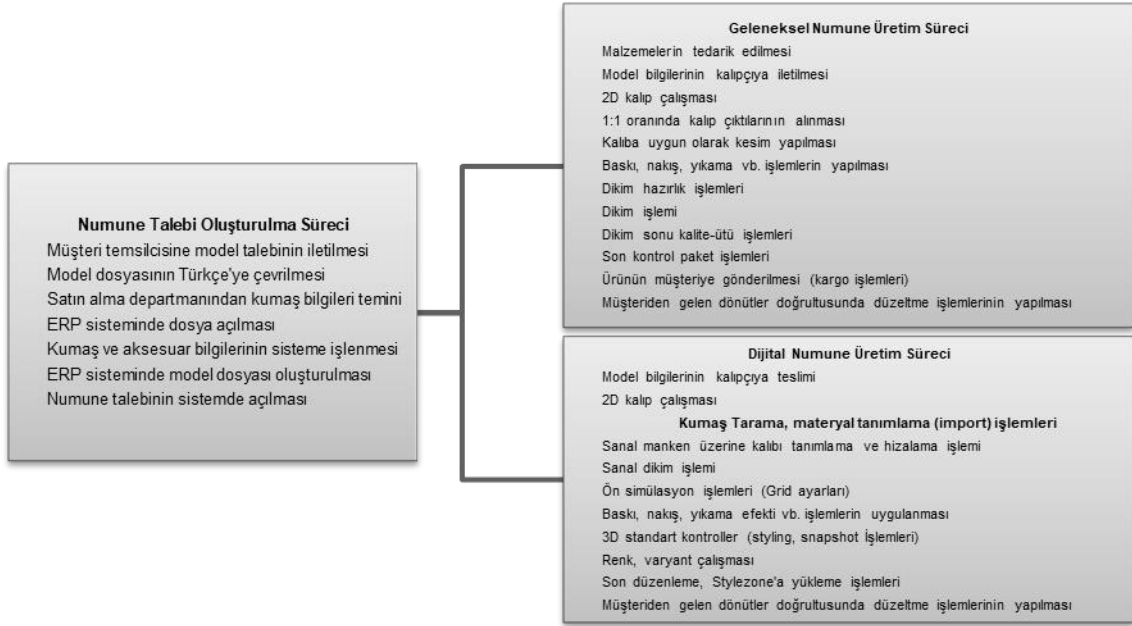
üretim tekniklerinin yanı sıra son yıllarda adını sıkça duymaya başladığımız dijital numune hazırlama tekniklerini eş zamanlı kullanabilmektedir. Geleneksel numune ve dijital numuneler için hazırlanan model kalıpları aynı süreçte oluşturulmaktadır. Süreçler bu aşamadan sonra ikiye ayrılmaktadır (Şekil 1). Model kalıpları dijital ortamda hazırlandıktan sonra geleneksel numune üretiminde kullanılacak olan tüm ana ve yardımcı malzemeler için tedarik süreci başlatılmıştır. Ardından model teknik detaylarına uyularak kesim ve dikim işlemleri gerçekleştirilmiş ve bu aşamalar esnasında harcanan süreler etüt yöntemi kullanılarak kayıt altına alınmıştır. Ayrıca modeller için kullanılan tüm ana ve yardımcı malzeme miktarları ve maliyetleri belirlenmiştir.

Dijital numune üretim aşamasında ise model kalıpları hazırlandıktan sonra, kullanılacak olan ana ve yardımcı malzemelerin yazılıma aktarım işlemi gerçekleştirilmiştir. Modellerin sanal dikim işlemi gerçekleştirildikten sonra sanal manken üzerinde giydirme ve düzenleme işlemleri yapılmıştır. Bu aşamalar esnasında harcanan süreler etüt yöntemi kullanılarak kayıt altına alınmıştır. Ayrıca kumaşların sisteme aktarılması için kullanılan tüm ana ve yardımcı malzeme miktarları ve maliyetleri belirlenmiştir.

Geleneksel ve dijital numune üretim süreçlerinde görev alan personel sayıları ve birim işçilik maliyetleri karşılaştırılmıştır. Benzer şekilde geleneksel ve dijital numune üretim süreçlerinde harcanan üretim süreleri ve malzeme maliyetleri de karşılaştırılmıştır.

İşletmede uygulanmakta olan numune hazırlama iş akış süreçleri Şekil 1’de görülmektedir. Müşteri temsilcisine model talebinin iletilmesi ile başlayan süreç her iki yöntem için de ortak olup talebin iş takip sisteminde açılması ve model kalıplarının hazırlanmasından sonra geleneksel ve dijital olarak ikiye ayrılmaktadır.

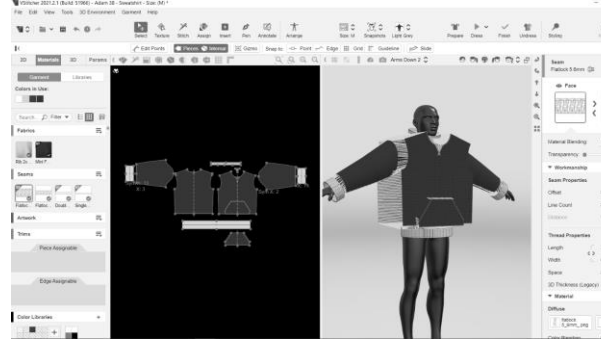
Geleneksel üretim süreci ve dijital üretim sürecine ait görseller Şekil 2’de yer almaktadır.



Şekil 1. Geleneksel ve dijital numune üretim süreçleri



a) Geleneksel üretim



b) Dijital numune üretimi

Şekil 2. Geleneksel üretim ve dijital numune üretim görselleri

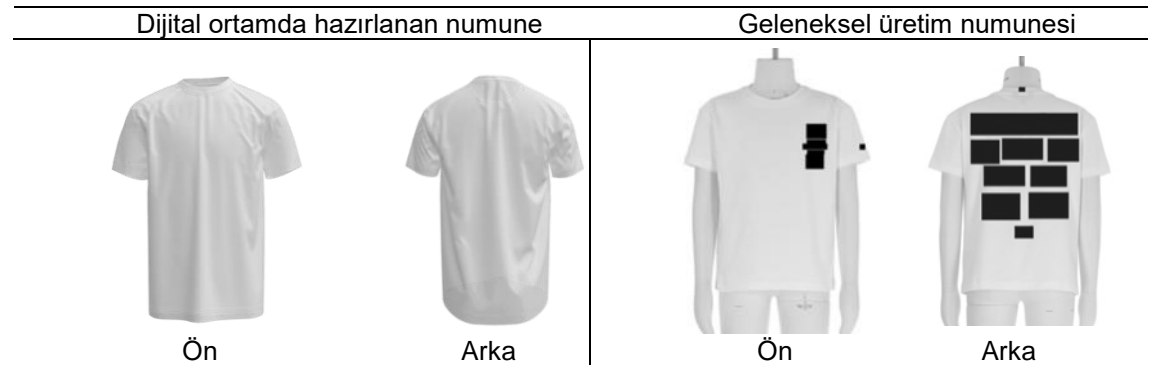
3.1. Modeller

Çalışma için belirlenen dört model; kumaş eni, kumaş gramajı, örgü türü, ürün grubu ve kalıp açısından farklılık gösterdiği için tercih edilmiştir.



Şekil 3. Model 1 polo yaka tişört

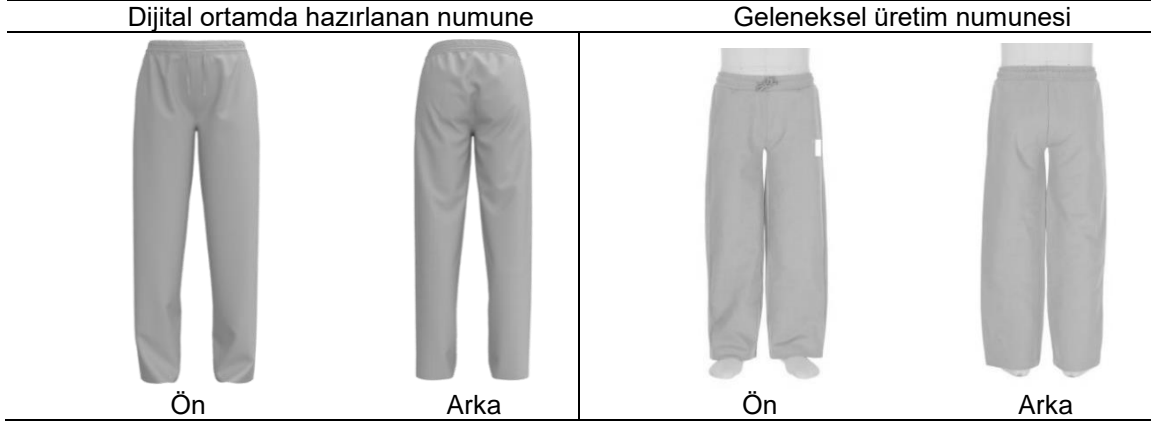
Şekil 3'te model 1: Polo yaka tişörte ait görseller bulunmaktadır. Sol tarafta (ön ve arka) dijital ortamda hazırlanan numune görseline ait fotoğraflar yer alırken, sağ tarafta geleneksel üretim numunesine ait fotoğraflar yer almaktadır. Model üzerinde baskı bulunmaktadır. Firmanın gizlilik ilkesi gereğince baskı kısımları geleneksel numune üretiminde kapatılmış, 3D tasarımda ise bu alanlar gizlenmiştir. İlgili modelden geleneksel yöntemle 4 farklı renkte ve her renkten 2'şer adet üretim yapılmıştır. Her renkten birer adet müşteriye gönderilmiş, diğer numuneler firmanın üretim politikası gereği arşivlenmiştir. Dijital ortamda ise 4 renk varyasyonu oluşturulmuştur.



Şekil 4. Model 2 çocuk tişörtü

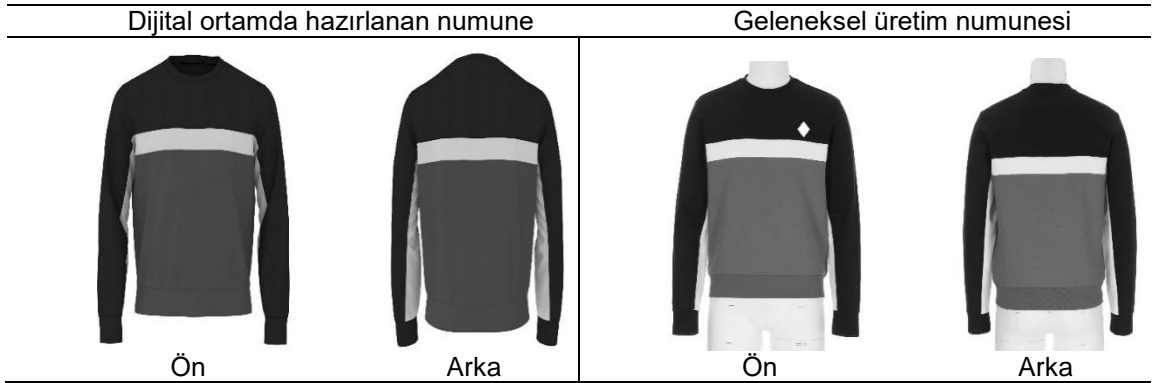
Şekil 4'te model 2 çocuk tişörtüne ait görseller bulunmaktadır. Sol tarafta (ön ve arka) dijital ortamda hazırlanan numune görseline ait fotoğraflar yer alırken, sağ tarafta geleneksel üretim numunesine ait fotoğraflar yer almaktadır. Model üzerinde baskı ve nakış bulunmaktadır. Firmanın gizlilik ilkesi gereğince baskı ve nakış kısımları geleneksel numune üretiminde kapatılmış, 3D tasarımda ise bu alanlar gizlenmiştir.

Geleneksel üretimde 3 adet numune üretilmiştir. Dijital numune ekranda oluşturulmuştur. Fiziksel numunelerin 2 tanesi müşteriye gönderilmiş diğer 1 numune firmanın üretim politikası gereği arşivlenmiştir.



Şekil 5. Model 3 çocuk pantolon

Şekil 5'te model 3 çocuk pantolonuna ait görseller yer almaktadır. Sol tarafta (ön ve arka) dijital ortamda hazırlanan numune görseline ait fotoğraflar yer alırken, sağ tarafta geleneksel üretim numunesine ait fotoğraflar yer almaktadır. Model üzerinde nakış bulunmaktadır. Firmanın gizlilik ilkesi gereğince nakış kısımları geleneksel numune üretiminde kapatılmış, 3D tasarımda ise bu alanlar gizlenmiştir. Geleneksel üretimde 3 adet numune üretilmiştir. Dijital numune ekranda oluşturulmuştur. Fiziksel numunenin 2 tanesi müşteriye gönderilmiş diğer 1 numune firmanın üretim politikası gereği arşivlenmiştir.



Şekil 6. Model 4 sweatshirt

Şekil 6'da model 4 sweatshirt görselleri yer almaktadır. Sol tarafta (ön ve arka) dijital ortamda hazırlanan numune görseline ait fotoğraflar yer alırken, sağ tarafta geleneksel üretim numunesine ait fotoğraflar yer almaktadır. Model üzerinde nakış bulunmaktadır. Firmanın gizlilik ilkesi gereğince nakış kısımları geleneksel numune üretiminde kapatılmış, 3D tasarımda ise bu alanlar gizlenmiştir. Geleneksel üretimde 7 adet numune üretilmiştir. Dijital numune ekranda oluşturulmuştur. Fiziksel numunenin 3 tanesi müşteriye gönderilmiş diğer 4 numune birden fazla ürünü düzeltme veya yeniden sipariş alma durumları göz önüne alınarak arşivlenmiştir.

3.2. Kumaş Özellikleri

Modellerin temel parçalarını oluşturan ana kumaş ve garni kumaş olarak ifade edilen yardımcı kumaşlar; içerik, kumaş cinsi, gramaj bilgisi ve kumaş renk bilgileri Tablo 1'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tablo 1. Kumaş özellikleri

<i>Kumaş Bilgileri</i>	<i>Model 1</i>	<i>Model 2</i>	<i>Model 3</i>	<i>Model 4</i>
Ana kumaş içeriği	%100 BCI pamuk ⁴	%100 Organik pamuk ⁵	%100 <i>Preconsumer</i> pamuk ⁶	Siyah %57 Polyester %43 Pamuk, Kırmızı %50 Pamuk %50 Polyester, Beyaz %57 Polyester %43 Pamuk
Kumaş cinsi	Pike (Tek toplama)	Süprem	3 İplik Futter (Astarlı jarse)	İnterlok
En-Gramaj (cm - g/m ²)	205 cm - 180 g/m ²	195 cm - 190 g/m ²	200 cm - 340 g/m ²	185 cm - 320 g/m ²
Renk	Mavi, Pembe, Sarı, Yeşil	Beyaz	Gri	Siyah, Kırmızı, Beyaz
Garni kumaş içeriği	%100 BCI Pamuk	%100 Organik Pamuk	%100 <i>Recycle</i> Pamuk ⁷	Kırmızı 2x1 Ribana %50 Pamuk %50 Polyester, Siyah 2x1 Ribana %58 Pamuk %40 Polyester %2 Elastan, Kırmızı Süprem %60 Pamuk %40 Polyester.
Kumaş cinsi	1x1 Ribana (Triko)	2x1 Ribana	Süprem	Süprem, 2x1 Ribana
En-Gramaj (cm - g/m ²)	-	125 cm - 290 g/m ²	180 cm - 180 g/m ²	Kırmızı 2x1 Ribana 190 cm - 410 g/m ² , Siyah 2x1 Ribana 195 cm - 420 g/m ² , Kırmızı Süprem 185 cm - 155 g/m ² .
Renk	Mavi, Pembe, Sarı, Yeşil	Beyaz	Gri	Siyah, Kırmızı, Beyaz

Tablo 1'e göre ana kumaş içeriklerinde sırasıyla, model 1 için %100 BCI pamuk, model 2 için %100 organik pamuk, model 3 için %100 *preconsumer* pamuk ve model 4 için çeşitli oranlarda pamuk-polyester karışımı kullanılmıştır. Model 1, model 2 ve model 3 ana kumaşı tek olan ürünlerdir. Model 4 ise farklı özellik ve renklerden oluşan kumaşlardan üretilmiştir. Yardımcı kumaş içeriklerinde ise model 1 için %100 BCI pamuk, model 2 için %100 organik pamuk, model 3 için %100 *recycle* pamuk ve model 4 için çeşitli oranlarda pamuk-polyester karışımı kullanılmıştır.

4. BULGULAR

4.1. Kalıp hazırlama

Geleneksel numune üretim süreci ile dijital numune üretim süreçleri kalıp hazırlığı aşamasında beraber ilerlemektedir. Kalıplar hazır giyim işletmelerinde 2D yazılımlarda hazırlanmaktadır.

Tablo 2'de bu süreçle ilgili veriler yer almaktadır. Ölçülen işlem süreleri tablolarda saat, dakika, saniye (saat: dakika: saniye) cinsinden belirtilmiştir. Bu aşamadan sonra geleneksel numune üretiminde pastal planı hazırlanarak çıktısı alınmaktadır. Bu nedenle pastal kâğıdı sarfiyatı oluşmakta ve bu iş için modelist yardımcısı görev almaktadır.

Tablo 2. 2D kalıp hazırlama süreci verileri

<i>Kalıp verileri</i>	<i>Model 1</i>		<i>Model 2</i>		<i>Model 3</i>		<i>Model 4</i>	
	<i>Geleneksel</i>	<i>Dijital</i>	<i>Geleneksel</i>	<i>Dijital</i>	<i>Geleneksel</i>	<i>Dijital</i>	<i>Geleneksel</i>	<i>Dijital</i>
Kalıp işlem süresi	03:00:00	03:00:00	01:30:00	01:30:00	03:00:00	03:00:00	04:00:00	04:00:00
Kullanılan kâğıt miktarı	0,13 kg	-	0,031 kg	-	0,029 kg	-	0,16 kg	-
Görev alan personel sayısı	2	1	2	1	2	1	2	1

⁴ Better Cotton Initiative (BCI): Üreticinin gerekli eğitimi almasını sağlayarak, zirai ilaç kullanımı, su kaynaklarının etkin kullanımı, toprağın sürekli iyileştirerek iyi tarım uygulamalarını sağlamayı ve çiftçinin refah seviyesini artırmayı benimseyen dünyada sürdürülebilirlik standartları belirlemiş bir kurumdur (Better Cotton, 2021).

⁵ Organik pamuk (Günaydin ve diğerleri, 2019).

⁶ Preconsumer pamuk: İşletme ortamında, henüz üretim aşamasındayken, toplanan iplik ve kumaş artıklarından elde edilen pamuğa verilen isimdir (Cotton Incorporated, 2021).

⁷ Recycle pamuk: Son kullanıcıdan toplanan kumaşların geri dönüşümüyle elde edilen pamuğa verilen isimdir.

Tablo 2'ye göre geleneksel numune sürecinde 2 personel (1 kalıpçı, 1 çıktıkları hazırlayan modelist yardımcısı) çalışırken, dijital numune üretiminde sadece kalıp hazırlama aşamasında 1 kalıpçı görev almakta, hazırlanan kalıpları 3D yazılıma göndermektedir. Dijital numune üretiminde kâğıt sarfiyatı olmamaktadır.

4.2. Geleneksel Numune Üretim Süreci

4.2.1. Kesim Süreci ve Kumaş Sarfiyatı Verileri

Geleneksel numune üretim sürecinde tedarik edilen kumaş verileri ve fire miktarları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Geleneksel üretim kesim aşaması verileri

Kesim verileri	Model-1	Model-2	Model-3	Model-4
Kesim işlem süresi	0:30:00	0:45:00	0:30:00	0:30:00
Tedarik edilen kumaş miktarı	Toplam 6 kg pike 16 adet 1x1 triko ribana	Süprem 1 kg 2x1 ribana 0,05 kg	3 iplik Futter 2 kg süprem 0,2 kg	Siyah interlok 3,2 kg, Siyah 2x1 ribana 0,35 kg, Kırmızı süprem 0,25 kg, Kırmızı interlok 2 kg, Kırmızı 2x1 ribana 0,8 kg, Beyaz interlok 2 kg
Görev alan personel sayısı	2 kesimci	1 kesimci	1 kesimci	2 kesimci
Fire	0,104 kg	0,039 kg	0,045 kg	Siyah - 0,105 kg Beyaz - 0,105 kg Kırmızı - 0,105 kg
Toplam kullanılan kumaş miktarı	2,15 kg	0,5 kg	1,75 kg	Siyah - 2,4 kg Beyaz - 0,83 kg Kırmızı - 2,04 kg

Tablo 3'e göre model 1 için 6 kg pike kumaşı, 16 adet kol ucuna 1x1 ribana triko parçası; model 2 için 1 kg süprem kumaş, 0,05 kg 2x1 ribana; model 3 için 2 kg 3 iplik Futter, 0,2 kg süprem kumaş; model 4 için üç farklı renkte 7,2 kg interlok, iki farklı renkte 1,15 kg 2x1 ribana ve 0,25 kg süprem kumaş kullanılmıştır. Model 1 ve model 4'ün kesimlerinde 2'şer kişi, model 2 ve model 3'ün kesimlerinde 1'er kişi görev almıştır. Model 1, model 3, model 4'ün kesim işlemleri 30'ar dakika, model 2'nin kesim işlemi 45 dakika sürmüştür. Toplamda tüm modellerde 17,85 kg kumaş numune için hazırlanmıştır.

Tablo 3'te ayrıca numune için hazırlanan kumaş miktarları verilmiştir. Kesim sonrasında ve dijital numune için testleri yapılanlardan artan kumaşlar, gerekli görüldüğü takdirde baskı nakış vb. denemeler için de kullanıldıktan sonra depoya geri gönderilmektedir. Böylece numune düzeltmesi istendiğinde veya gerekli görüldüğünde tekrar kullanılmaktadır.

Kalıp aşaması sonrasında hazırlanan pastal planında bulunan verimlilik değerleri doğrultusunda, her modelin kumaş kesim işlemi sonrasında aralardan çıkan, üründe kullanılmayan atık kumaşların miktarı da Tablo 3'te verilmiştir. Tablo incelendiğinde model 1'de 8 üründe toplam 0,104 kg kumaş firesi ortaya çıkmıştır. Model 1'de bir üründe 0,267 kg kumaş kullanılmış olup toplamda 8 adet üründe 2,15 kg kumaş kullanılmıştır. 2. modelde 3 üründe toplamda 0,039 kg fire verilmiş olup 0,5 kg kumaş kullanılmıştır. 3. model için toplamda üç üründe 0,045 kg fire ortaya çıkmıştır; aynı modelde her ürün için 0,585 kg kumaş kullanılmış toplamda 1,755 kg kumaş kullanılmıştır. 4. modelde 3 farklı kumaş kullanılmıştır. Toplamda yedi üründe 0,315 kg kumaş fire verilmiştir. Aynı modelde 0,342 kg siyah, 0,119 kg beyaz, 0,291 kg kırmızı kumaş bir ürün için kullanılmış, yedi üründe toplam 5,262 kg kumaş kullanılmıştır. Bu veriler doğrultusunda toplamda 0,503 kg kumaş fire oluşmuş; 9,669 kg kumaş ürüne dönüşmüştür.

4.2.2. Geleneksel Üretim Süreci Verileri

Geleneksel numune üretim süreci kalıp hazırlama aşamasından sonra 3D dijital numune sürecinden ayrı ilerlemektedir. Tablo 4 incelendiğinde model 1'e 15 dakika ve model 2'ye 30 dakika süren baskı işlemi yapılmış ve her işlemde 1 kişi görev almıştır. Model 2, model 3 ve model 4 nakışları her model için 5 dakika sürmüş ve her birinde 1 kişi görev almıştır. Dikim aşaması model 1 ve model 4'te 6 saat, model 2'de 1 saat 5 dakika ve model 3'te 2 saat 5 dakika sürmüştür. Dikimde her modelde 1 düz makineci ve 1 overlokçu olmak üzere 2'şer kişi görev almıştır.

Tablo 4. Geleneksel numune üretim süreci

<i>Geleneksel numune verileri</i>		<i>Model 1</i>	<i>Model 2</i>	<i>Model 3</i>	<i>Model 4</i>
Baskı	Baskı işlem süresi	0:15:00	0:30:00	-	-
	Görev alan personel sayısı	1	1	-	-
Nakış	Nakış işlem süresi	-	0:05:00	0:05:00	0:05:00
	Görev alan personel sayısı	-	1	1	1
Dikim	Dikim işlem süresi	06:00:00	01:05:00	02:05:00	06:00:00
	Görev alan personel sayısı	1 overlokçu, 1 düz makineci	1 overlokçu, 1 düz makineci	1 overlokçu, 1 düz makineci	1 overlokçu, 1 düz makineci
Aksesuar	1 ürün için kullanılan aksesuarlar	1 beden etiketi, 1 firma etiketi, 1 yıkama talimatı, 3 düğme (2 adet ana düğme, 1 yedek)	30 cm şerit, 1 beden etiketi, 1 firma etiketi, 1 yıkama talimatı	79 cm 1 adet kordon, 1 süs etiketi, 1 firma etiketi, 1 beden etiketi.	1 beden etiketi, 1 firma etiketi, 1 yıkama talimatı, 1 dikim talimatı kartı ⁸ .
	Yıkama	Yıkama işlem süresi	-	-	00:45:00
Kalite/Ütü	Görev alan personel sayısı	-	-	-	1 yıkamacı
	İşlem süresi	01:10:00	00:15:00	00:30:00	00:15:00
Numune son kontrol ve paket	Görev alan personel sayısı	3 (ütücü, kaliteci, ilik düğme punterizci)	2 (ütücü, kaliteci)	2 (ütücü, kaliteci)	2 (ütücü, kaliteci)
	İşlem süresi	01:00:00	00:30:00	00:30:00	00:45:00
Final	Görev alan personel sayısı	2 (paket, numune son çıkış)	1 (kalite paket)	1 (kalite paket)	2 (paket, numune son çıkış)
	Final toplam numune adeti	8 ürün	3 ürün	3 ürün	7 ürün
Final	1 ürün için kullanılan paket malzemeleri	4 pelur, 1 karton etiket, 1 etiket, 1 ip, 1 alarm, 1 alarm süngeri, 1 poşet.	1 karton etiket, 1 kılıçık, 1 etiket, 1 poşet	1 karton etiket, 1 kılıçık, 1 etiket, 1 poşet	1 ölçü tablosu (a4), 1 model bilgileri kartı ⁹ , 1 karton etiket, 1 kılıçık, 1 poşet
	Toplam süre (2D Kalıp dâhil)	11:55:00	04:40:00	06:40:00	12:20:00
	Toplam personel	12 kişi	10 kişi	9 kişi	12 kişi

Kullanılan aksesuarlar incelendiğinde; 1 ürün başına model 1 için, 1 beden etiketi, 1 firma etiketi, 1 yıkama talimatı ve biri yedek olmak üzere toplam 3 düğme kullanılmıştır. Model 2 için, 30 cm. şerit, 1 beden etiketi, 1 firma etiketi, 1 yıkama talimatı kullanılmıştır. Model 3 için, 79 cm. 1 adet kordon, 1 süs etiketi, 1 firma etiketi, 1 beden etiketi kullanılmıştır. Model 4 için, 1 beden etiketi, 1 firma etiketi, 1 yıkama talimatı, 1 dikim talimatı kartı kullanılmıştır.

Yıkama işlemi sadece model 4'e uygulanmış, 45 dakika sürmüş ve 1 kişi görev almıştır. Model 1'in kalite, ütü ve ilik-düğme, punteriz aşamalarında 3 kişi görev almış ve işlemler 1 saat 10 dakika sürmüştür. Diğer modellerde 2 kişi ütü ve kalite aşamasında görev almış, model 2 ve model 4, 15 dakika; model 3, 30 dakika işlem görmüştür.

Numune son kontrol ve paket işlemleri aşamasında, model 2 ve model 3, 30 dakika işlem görmüş birer kişi görev almıştır. Bu modellerde paketleme aşamasında 1 ürün başına 1 karton etiket, 1 kılıçık, 1 etiket, 1 poşet kullanılmıştır. Model 1'in işlem süresi 1 saat olurken, 2 kişi görev almıştır. Paketleme için, 1 ürün başına 4 pelur, 1 karton etiket, 1 etiket, 1 ip, 1 alarm, 1 alarm süngeri, 1 poşet kullanılmıştır. Model 4 işlem süresi 45 dakika sürerken bu

⁸ Dikim talimat kartı (*Sew in tag*): Müşteri isteği doğrultusunda modellerin numunesine ölçü tablosu dikilmektedir.

⁹ Model bilgileri kartı (*Hang tag*): Müşterinin isteği doğrultusunda, model bilgilerinin yazıldığı, özel kart

aşamada 2 kişi görev almıştır. Paketlemede 1 ürün başına 1 ölçü tablosu (A4), 1 model bilgileri kartı, 1 karton etiket, 1 kılıçık, 1 poşet kullanılmıştır.

4.3. Dijital Numune Üretimi Süreci

Çalışmada dijital numune üretim sürecinde *Browzwear V-Stitcher* yazılımı kullanılmıştır (Browzwear Solutions, 2021). Dijital numune hazırlama süreci geleneksel üretim sürecinden kalıp aşaması sonrasında ayrılmaktadır. Dijital numune hazırlama süreci ile ilgili veriler Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 5. Dijital numune hazırlama süreci

<i>Dijital numune verileri</i>		<i>Model-1</i>	<i>Model-2</i>	<i>Model-3</i>	<i>Model-4</i>
Kumaşların Sisteme Tanıtılması	İşlem Süresi	0:22:00	0:22:00	0:22:00	0:22:00
	Kullanılan kumaş miktarı	0.063 kg	0.066 kg	0.119 kg	0.112 kg
Görev alan personel sayısı	2	2	2	2	2
	(Kesimci+3D Tasarımcı)	(Kesimci+3D Tasarımcı)	(Kesimci+3D Tasarımcı)	(Kesimci+3D Tasarımcı)	(Kesimci+3D Tasarımcı)
Materyal import	Süre	0:24:50	0:18:31	0:21:34	0:16:09
3D kalıp düzenleme ve avatara (sanal manken) kalıpları yerleştirme	Süre	0:08:30	0:05:58	0:10:13	0:10:01
Sanal dikim işlemi	Süre	0:03:22	0:01:54	0:03:15	0:04:03
Grid ayarları ve ön simülasyon işlemi	Süre	0:02:40	0:00:41	0:01:55	0:04:11
3D kontrolleri ve styling işlemleri	Süre	0:33:10	0:09:41	0:16:34	0:08:52
Snapshot kaydetme, kalıp ve materyal isimlendirme	Süre	0:02:25	0:04:14	0:04:00	0:02:13
Renk varyant çalışması ve isimlerin düzenlenmesi	Süre	0:09:11	0:14:30	0:04:37	0:00:00
Son snapshot düzenlenmesi, dosya kaydı	Süre	0:00:22	0:00:23	0:00:21	0:00:32
3D modelin müşteriye çevrimiçi yollanması, ERP sisteminde kapanış	Süre	0:03:02	0:03:19	0:03:02	0:03:02
Final	Toplam süre (2D kalıp hariç)	1:49:32	1:21:11	1:27:31	1:11:03
	Toplam personel	2 kişi	2 kişi	2 kişi	2 kişi

Kalıplar doğrudan 3D giydirmeye yazılımına aktarılırken kullanılacak kumaşlar dışarıdan sisteme tanıtılmaktadır. Tablo 5'ten görüldüğü üzere kumaşların her birinin sisteme tanıtılması 22 dakika sürmüştür. Bu işlem test cihazı için gerekli olan kumaş parçalarının hazırlanması, testlerinin yapılması ve dijital ortamda raporlamasının tanımlanmasını kapsamaktadır. Bu aşamada 1 kişi 3D tasarımcısı ve yazılım sistemine yükleme için kumaşların hazırlığında 1 kesimci olmak üzere 2 kişi görev almıştır. Sisteme tanıtmak için model 1 için 0,063 kg, model 2 için 0,066 kg, model 3 için 0,119 kg, model 4 için 0,112 kg kumaş kullanılmıştır. Tablo 5'te verilen aşamalar incelendiğinde sırasıyla; 3D kalıp düzenleme, kalıpların avatara yerleştirilmesi, sanal dikim işlemleri, grid ayarı, ön simülasyon aşaması, kullanılacak malzemelerin yazılıma tanıtma (import) işlemi, 3D kontrolleri, styling aşaması, snapshot kaydetme, isimlendirme aşamaları toplamda model 1 için 4 saat 49 dakika 32 saniye, model 2 için 2 saat 51 dakika 11 saniye, model 3 için 4 saat 27 dakika 31 saniye, model 4 için 5 saat 11 dakika 3 saniye sürmüştür. Tablo 5'te özellikle vurgulanması gereken kısımlardan biri de varyantların hazırlanmasıdır. Bu aşama dijitalde model 1 için 9 dakika 11 saniye, model 2 için 14 dakika 30 saniye, model 3 için 4 dakika 37 saniye sürmüştür. Modellerin çevrimiçi platformuna yüklenmesi ve müşteriye gönderilmesi model 2 için 3 dakika 19 saniye, diğerleri için 3 dakika 2 saniye sürmüştür. Ürünlerin kalıp sonrası üretim süresi 3D dijital üretimde model 1 için 1 saat 49 dakika 32 saniye model 2 için 1 saat 21 dakika 11 saniye, model 3 için 1 saat 27 dakika 31 saniye, model 4 için 1 saat 11 dakika 3 saniye olarak ölçülmüştür. Dijital numune sürecinde 1 kesimci ve 1 tasarımcı olmak üzere toplamda 2 kişi görev almıştır.

4.4. Maliyet Karşılaştırması

Verimlilik oranlarını büyük ölçüde etkileyen faktörlerden biri de maliyet hesaplamalarıdır. Geleneksel numune üretim sürecinde aksesuar, kumaş, işçilik giderleri, dijital numune sürecinde de işçilik ve yazılım giderleri ön plana çıkmaktadır.

Tablo 6. Aksesuar maliyetleri

Aksesuarlar	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Toplam Maliyet (€)
Beden etiketi	0,015	0,015	0,015	0,015	0,315
Firma etiketi	0,021	0,021	0,021	0,021	0,441
Yıkama talimatı	0,051	0,051	0,051	0,051	1,071
Düğme	0,007	-	-	-	0,168
1 m Şerit	-	0,16	-	-	0,144
79 cm Kordon	-	-	0,59	-	1,770
Pelur	0,024	-	-	-	0,768
Karton etiket	0,025	0,025	0,025	0,025	0,525
Etiket	0,035	0,035	0,035	0,035	0,735
Alarm	0,140	-	-	-	0,120
Alarm süngeri	0,015	-	-	-	0,120
Poşet	0,021	0,0212	0,0212	0,0212	0,445
Pastal kâğıdı	0,211	0,050	0,047	0,26	0,568
Toplam	3,733	0,699	2,322	1,437	8,190

Tablo 6'da aksesuar maliyetleri incelendiğinde, beden etiketi, firma etiketi, yıkama talimatı, karton etiket, etiket ve poşet tüm numunelerde kullanılmıştır. Bu nedenle 21 adet kullanılmıştır. Düğme sadece model 1'de her üründe 3 adet toplamda 24 adet kullanılmıştır. Şerit model 2'de, kordon model 3'te kullanılmıştır.

İşçilik maliyeti aylık brüt 4,500 ₺'dir. Brüt gider sigorta ve maaş giderlerinin toplamını içermektedir. 30 iş günü ve günde 9 saat çalışma (540 dk/gün) hesaplandığında saatlik işçilik maliyeti 25 ₺'dir. İşçilere ait servis, yemek vb. giderler maliyete dâhil edilmemiştir.

Tablo 7 Geleneksel numune üretimi işçilik süreleri

<i>Geleneksel numune işçilik verileri</i>		<i>Model-1</i>	<i>Model-2</i>	<i>Model-3</i>	<i>Model-4</i>	<i>Toplam işlem süresi</i>
Kalıp aşaması (ardışık işlemler)	İşlem süresi	3:00:00	1:30:00	3:00:00	4:00:00	11:30:00
	Görev alan kişi sayısı	2	2	2	2	
Geleneksel numune	Kesim işlem süresi	0:30:00	0:45:00	0:30:00	0:30:00	3:15:00
	Görev alan personel sayısı	2 kesimci	1 kesimci	1 kesimci	2 kesimci	
Baskı	Baskı işlem süresi	0:15:00	0:30:00	-	-	0:45:00
	Görev alan personel sayısı	1	1	-	-	
Nakış	Nakış işlem süresi	-	0:05:00	0:05:00	0:05:00	0:15:00
	Görev alan personel sayısı	-	1	1	1	
Dikim	Dikim işlem süresi	06:00:00	01:05:00	02:05:00	06:00:00	30:20:00
	Görev alan personel sayısı	1 overlokçu, 1 düz makineci	1 overlokçu, 1 düz makineci	1 overlokçu, 1 düz makineci	1 overlokçu, 1 düz makineci	
Yıkama	Yıkama işlem süresi	-	-	-	00:45:00	00:45:00
	Görev alan personel sayısı	-	-	-	1 yıkamacı	
Kalite ve son ütü	İşlem süresi	01:10:00	00:15:00	00:30:00	00:15:00	5:30:00
	Görev alan personel sayısı	3 (ütücü, kaliteci, ilik düğme punterizci)	2 (ütücü, kaliteci)	2 (ütücü, kaliteci)	2 (ütücü, kaliteci)	
Numune son kontrol ve paket	İşlem süresi	01:00:00	00:30:00	00:30:00	00:45:00	4:30:00
	Görev alan personel sayısı	2 (paket, numune son çıkış)	1 (kalite paket)	1 (kalite paket)	2 (paket, numune son çıkış)	
Toplam işçilik süresi		21:45:00	6:00:00	9:15:00	19:50:00	56:50:00

Tablo 7'deki geleneksel üretim işçilik maliyetleri incelendiğinde, model 1'de kalıp aşamasında ardışık olarak 2 kişi 3 saatte kalıbı tamamlarken, kesimde 2 kişi, dikimde 2 kişi, kalite ve son ütüde 3 kişi, numune son kontrol ve pakette 2 kişi birlikte aynı sürede çalışmışlardır. Bu nedenle bu aşamalarda işlem süresi çalışan sayısı ile çarpılarak işçilik süresi hesaplanmıştır. Model 1 için 21 saat 35 dakika, model 2 için 6 saat, model 3 için 9 saat 15 dakika, model 4 için 19 saat 50 dakika olmak üzere tüm işçilik süreleri toplamı 56 saat 50 dakika bulunmuştur.

Tablo 8. Dijital numune üretimi işçilik hesapları

<i>Dijital numune işçilik verileri</i>		<i>Model 1</i>	<i>Model 2</i>	<i>Model 3</i>	<i>Model 4</i>	<i>Toplam işlem süresi</i>
Kalıp aşaması	İşlem süresi	3:00:00	1:30:00	3:00:00	4:00:00	11:30:00
	Görev alan kişi sayısı	1	1	1	1	
Dijital numune hazırlama	Toplam süre	1:27:32	0:59:11	1:05:31	0:49:03	4:21:17
	Görev alan kişi sayısı	1	1	1	1	
Kumaşların Sisteme Tanıtılması (işçiler ardışık çalışıyorlar)	İşlem süresi	0:22:00	0:22:00	0:22:00	0:22:00	1:28:00
Görev alan personel sayısı	2 (Kesimci + 3D Tasarımcı)	2 (Kesimci + 3D Tasarımcı)	2 (Kesimci + 3D Tasarımcı)	2 (Kesimci + 3D Tasarımcı)		
Toplam işçilik süresi		4:49:32	2:51:11	4:27:31	5:11:03	17:19:17

Farklı yazılım şirketleri ile yapılan görüşmelerde ortalama yazılım ücretlerinin, yıllık kiralama bedeli 10.000 €-13.000 € aralığında, 3 yıllık kiralama 25.000 €-30.000 € aralığında olduğu bilgisi alınmıştır. Lisans satın alımlarında ise daha farklı fiyat politikası uygulandığı bildirilmiştir. Tablo 8'e göre dijital numune üretiminde toplam işçilik 7 saat 19 dakika 17 saniye sürmüştür. Yazılımın günlük bedeli yıllık kiralamada aylık 833,33 €-1083,33 € arasında; 3 yıllık kiralamada ise aylık 694,4 €-833,33 € arasında değişmektedir. Günlük maliyeti ise yıllık kiralamada 27,78 €-90,28 €; üç yıllık kiralamada 23,15 €-27,78 € hesaplanmıştır. Uygulamalı çalışma lisansı satın alınmış yazılımda yapılmış olup yazılım maliyetinin kiralama bedelinden daha düşük maliyette olduğu belirtilmiştir. Yazılım saatlik maliyeti 3 aylık kiralama bedeli üzerinden ortalaması alınmış olup, saati 2,78 € üzerinden hesaplanmıştır.

Tablo 9. Dijital numune maliyet tablosu

<i>Dijital numune maliyet verileri</i>	<i>Model 1</i>	<i>Model 2</i>	<i>Model 3</i>	<i>Model 4</i>	<i>Toplam</i>
Dijital numune üretimi işçilik süresi	4:49:32	2:51:11	4:27:31	5:11:03	17:19:17
Dijital numune üretimi işçilik maliyeti	12,25 €	7,24 €	11,32 €	13,16 €	43,97 €
Dijital numunede kumaş maliyeti	0,62 €	0,37 €	1,18 €	0,94 €	3,11 €
Ortalama yazılım maliyeti	13,42 €	7,93 €	12,39 €	14,41 €	48,15 €
Dijital numune üretim maliyeti	26,29 €	15,54 €	24,89 €	28,51 €	95,23 €

Tablo 9 incelendiğinde dijital numune üretiminde toplam süre 17 saat 19 dakika 17 saniye sürmüştür. Dijital numune üretimi işçilik maliyeti 43,97 €, kumaş maliyeti 3,11 €, ortalama yazılım maliyeti 48,15 € olarak hesaplanmıştır. Dijital numune toplam üretim maliyeti 95,23 € olarak hesaplanmıştır.

Tablo 10. Geleneksel numune maliyet tablosu

<i>Geleneksel numune maliyet verileri</i>	<i>Model 1</i>	<i>Model 2</i>	<i>Model 3</i>	<i>Model 4</i>	<i>Toplam</i>
Geleneksel numune üretim işçilik süresi	21:45:00	6:00:00	9:15:00	19:50:00	56:50:00
Geleneksel numune üretimi işçilik maliyeti ¹⁰	55,20 €	15,23 €	23,48 €	50,34 €	144,25 €
Geleneksel üretimde kumaş maliyeti	200,9 €	5,88 €	21,78 €	65,09 €	293,65 €
Aksesuar maliyeti	3,733 €	0,699 €	2,32 €	1,44 €	8,19 €
Geleneksel numune üretim maliyeti	259,83 €	21,81 €	47,58 €	116,87 €	446,09 €

Tablo 10 incelendiğinde, geleneksel numune üretiminde toplam 35 saat 35 dakika çalışılmıştır. Bazı işlemlerde aynı anda birden fazla kişi çalıştığı için toplam işçilik süresi 56 saat 50 dakika olarak hesaplanmıştır. Geleneksel numune üretim sürecinde toplam işçilik maliyeti 144,25 €, kumaş maliyeti 293,65 €, aksesuar maliyeti 8,19 € olarak hesaplanmıştır. Geleneksel numune toplam üretim maliyeti 446,09 € hesaplanmıştır.

¹⁰ 27 Ağustos 2021 tarihli Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası döviz kuru EUR/TRY = 9,85

5. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Çalışmada, hazır giyim işletmelerinde uygulanmakta olan geleneksel numune üretim yöntemi ile dijital iş akışının kullanıldığı sanal numune üretim yönteminin kumaş, işçilik, aksesuar ve sarf malzeme maliyetleri ile üretim süresi açısından karşılaştırılması yapılmıştır. Söz konusu numune üretim yöntemlerinin ikisini de bünyesinde barındıran bir tekstil firmasında uygulamalı olarak yapılan çalışmada, farklı üretim aşaması, kumaş türü ve kalıpları barındırması açısından dört ürün grubu belirlenmiştir. Belirlenen bu dört farklı ürün grubu hem geleneksel hem de dijital numune üretim süreçleri kullanılarak eş zamanlı olarak üretilmiştir. Prototip üretim planlama ve numune üretim süreçlerinde görev alan personel sayısı, personelin yaptığı iş için harcadığı süre, kullanılan kumaş ve yardımcı malzeme miktarı, oluşan atık ve aksesuar miktarları kayıt altına alınmıştır.

Kumaş miktarı açısından değerlendirildiğinde; geleneksel numune sürecinde toplam 17,85 kg kumaş hazırlanmış olup bunlardan; 0,5 kg kumaş atığı oluşmuş; 9,67 kg kumaş nihai ürüne dönüştürülmüştür. Kalan kumaşlar ise depoya gönderilmiştir. Dijital numune sürecinde ise yazılıma tanıtım için toplamda 0,36 kg kumaş kullanılmıştır.

Çalışan personel sayısı açısından değerlendirildiğinde; geleneksel numune üretim sürecinde her modelin kalıbının hazırlanmasından müşteriye gönderilmesine kadar 12 kişi görev almış olup dijital numune sürecinde ise kumaşların sisteme tanıtımı için 1 kişi kumaşları keserken, kalan tüm aşamalarda 3D tasarımcısı tek başına süreci tamamlamıştır. İşçilik maliyeti açısından değerlendirildiğinde; geleneksel numune üretim süreci için 56 saat 50 dakika harcanmış, 144,25 €'luk işçilik maliyeti hesaplanmıştır. Dijital numune sürecinde ise 17 saat 19 dakika 17 saniye süre harcanmış, 43,7 €'luk işçilik maliyeti hesaplanmıştır.

Aksesuar maliyeti açısından değerlendirildiğinde; geleneksel numune üretim sürecince 8,19 €'luk aksesuar maliyeti hesaplanmış, dijital numune üretim sürecinde ilgili aksesuarlar yazılım kütüphanesinden alındığı için herhangi bir maliyet oluşturmamıştır. Sarf malzeme maliyeti açısından değerlendirildiğinde; geleneksel numune sürecinde kumaş kesimi için 0,35 kg pastal çıktısı alındığı kaydedilmiştir. Dijital numunede ise sanal ortamda kalıplar yazılıma aktarılmış, herhangi bir kâğıt sarfiyatı olmamıştır.

Geleneksel numune üretiminde numuneler müşteriye kargo yoluyla iletilmekte olup ilgili süre ve maliyet hesaplamaları bu çalışmaya dâhil edilmemiştir. Değişiklik, düzeltme vb. işlemler olduğunda numune geri gelmekte düzeltmeler yeniden yapılmaktadır. Dijital numune üretiminde ise çevrim içi olarak müşteriye gönderilmektedir. Düzeltme, değişiklik vb. işlemler olduğunda yine çevrim içi olarak ortamdan dönüt alınmakta, numune düzeltmesinde atık oluşmamaktadır. Dijital iş akışının kullanımının yaygınlaşmasının firmaların üretim verimliliklerini artırmalarına katkı sağlarken, sürdürülebilirlik açısından karbon ve su ayak izi etkisinin azaltılmasına katkıda bulunulacağı düşünülmektedir (Eser ve diğerleri, 2016).

Sonuç olarak dört farklı modelin geleneksel üretim sürecinde toplam 446,09 € malzeme ve işçilik maliyeti ortaya çıkarken, dijital üretim sürecinde ise 95,23 € malzeme ve işçilik maliyeti ortaya çıkmıştır. Bu yönüyle iki üretim yöntemi arasında %80 oranında fark oluştuğu görülmüştür.

Çalışmanın enerji ve lojistik maliyetleri de göz önünde bulundurularak genişletilmesinin literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

- Balkan, D. (2019). "Tekstil Sektöründe Verimlilik Ölçümü ve Bir Uygulama", *Tekstil ve Mühendis*, 26(113), 79-85.
- Bappy, M.M., Musa, A. ve Hossain, F. (2019). "Productivity Improvement through Line Balancing in Apparel Industries", *Global Scientific Journals*, 7(2), 893-902.
- Baykal Duru, P. ve Göçer, E. (2012). "Konfeksiyonda Kumaş ve Model Çeşitliliğinin Üretimde Kalite ve Verimliliğe Etkisi", *Tekstil ve Mühendis*, 19(87), 15-23.
- Better Cotton. (2021). About Better Cotton-Better Cotton Initiative, <https://bettercotton.org/about-better-cotton/>, (Erişim tarihi: 30.07.2021).
- Bilgiç, H. ve Baykal Duru, P. (2017). "Örme Konfeksiyonda Kumaş Eni ile Kumaş ve Model Türünün İkinci Kalite Maliyetine Etkisi", *Tekstil ve Mühendis*, 24(106), 78-87.
- Browzwear Solutions. (2021). VStitcher 3D Apparel Design Software, Browzwear, <https://browzwear.com/products/V-Stitcher/>, (Erişim tarihi: 28.07.2021).
- Control Union. (2021). "Tekstil-Certifications", <https://certifications.controlunion.com/tr/industries/tekstil-1>, (Erişim tarihi: 28.08.2021).
- Cotton Incorporated. (2021). Recycled Cotton, Cottonworks™, <https://www.cottonworks.com/topics/sustainability/cotton-sustainability/recycled-cotton/>, (Erişim tarihi: 28.07.2021).
- Çalık, E. (2021). "Türkiye'deki İmalat İşletmelerinin Sürdürülebilir İnovasyon Faaliyetleri", *Verimlilik Dergisi*, (3), 185-201.
- Duman Altan, A. ve Sağbaş, A. (2020). "Türkiye'nin Enerji Verimliliği ve İklim Değişikliği Performansı: Mevcut Durum ve Gelecek Projeksiyonu", *Verimlilik Dergisi*, (1), 7-26.
- Dünya Doğayı Koruma Vakfı, (WWF). (2021). Yaşayan Gezegen Raporu 2020|WWF, <https://www.wwf.org.tr/yayinlarimiz/raporlarimiz/?10241/Yasayan-Gezegen-Raporu-2020>, (Erişim tarihi: 28.07.2021).
- Eser, B., Çelik, P., Çay, A. ve Akgümüş, D. (2016). "Tekstil ve Konfeksiyon Sektöründe Sürdürülebilirlik ve Geri Dönüşüm Olanakları", *Tekstil ve Mühendis*, 23(101), 43-60.
- Gambhir, D. ve Sharma, S. (2015). "Productivity in Indian Manufacturing: Evidence from the Textile Industry", *Journal of Economic and Administrative Sciences*, 31(2), 71-85.
- Günaydın, G.K., Yavas, A., Avinc, O., Soydan, A.S., Palamutcu, S., Şimşek, M.K., Dündar, H., Demirtaş, M., Özkan, N. ve Kivılcım, M.N. (2019). "Organic Cotton and Cotton Fiber Production in Turkey, Recent Developments", *Organic Cotton, Is It a Sustainable Solution?* Editors: Gardetti, M. A. ve Muthu, S. S., Springer, Singapore, 101-125.
- Güner, G. (2005). "Konfeksiyon İşletmelerinde Personel Performansını Değerlendirmek için Analitik Hiyerarşi Yönteminin Kullanılması", *Verimlilik Dergisi*, (4), 91-113.
- Güner, M. ve Yücel, Ö. (2014). "Konfeksiyon İşletmelerinde Verimlilik Geliştirici Uygulamalar", *Tekstil ve Mühendis*, 21(95), 30-37.
- Hennes ve Mauritz. (2021). Sürdürülebilirlik|H&M, https://www2.hm.com/tr_tr/sustainability-at-hm.html, (Erişim tarihi: 28.07.2021).
- Inditex. (2021). Our Commitment to the Environment-Inditex.com, <https://www.inditex.com/en/our-Commitment-To-The-Environment>, (Erişim tarihi: 28.07.2021).
- Kanat, S. ve Güner, M. (2007). "Tekstil ve Konfeksiyon İşletmelerinde Verimlilik Ölçümü", *Tekstil ve Konfeksiyon*, 17(4), 279-283.
- Kapurja, T. K., Rahman, M. ve Haldar, S. (2017). "Root Cause Analysis and Productivity Improvement of an Apparel Industry in Bangladesh through Kaizen Implementation", *Journal of Applied Research on Industrial Engineering*, 4(4), 227-239.
- Küçük, M. ve Güner, M. (2015). "Bir Konfeksiyon İşletmesinde Süreç Analizi Yolu ile Verimlilik Artırma Çalışması", *Tekstil ve Mühendis*, 22(98), 33-41.
- Lin, S.H., Kincade, D.H. ve Warfield, C. (1994). Productivity and Production in the Apparel Industry", *International Journal of Clothing Science and Technology*, 6(1), 20-27.
- Makryniotis, T. (2015). 3D Fashion Design: Technique, Design and Visualization (1st Edition), London: Batsford.
- Morshed, M.N. ve Palash, K.S. (2014). "Assembly Line Balancing to Improve Productivity using Work Sharing Method in Apparel Industry", *Global Journal of Research In Engineering*, 14(3), 39-47.
- Mothilal, B. ve Prakash, C. (2018). "Implementation of Lean Tools in Apparel Industry to Improve Productivity and Quality", *Current Trends in Fashion Technology and Textile Engineering*, 4(1), 9-14.

- Mridha, J.H. Alam, A.R., Mahmud, T. ve Ahmed, T. (2020). "Contrivance of 5S System to Effectuate Higher Productivity in Apparel Industries", *Global Journal of Research in Engineering*, 20(1-J), 21-28.
- Odabaşoğlu, H.Y., Avinç, O.O. ve Yavaş, A. (2013). "Susuz Boyama", *Tekstil ve Mühendis*, 20(90), 63-79.
- Orhon, D., Kabdaslı, I., Babuna, F.G., Sozen, S., Dulkadiroglu, H., Dogruel, S., Karahan Gul, O. ve Insel, G. (2006). "Wastewater Reuse for the Minimization of Fresh Water Demand in Coastal Areas-Selected Cases from the Textile Finishing Industry", *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 38(8), 1641-1657.
- Palamutcu, S. (2010). "Electric Energy Consumption in the Cotton Textile Processing Stages", *Energy*, 35(7), 2945-2952.
- Paşayev, N. (2010). "Konfeksiyon Üretiminde Üretim Planlamasının Kumaş Giderlerine Etkilerinin Araştırılması", *Tekstil ve Konfeksiyon*, 20(3), 262-270.
- Shumon, M.R.H., Arif-Uz-Zaman, K. ve Rahman, A. (2010). "Productivity Improvement Through Line Balancing in Apparel Industries", *International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 100-110, Dhaka, Bangladesh.
- Slović, D., Tomašević, I. ve Radovic, M. (2016). "Improving Productivity in the Apparel Industry through Gain Sharing and Continuous Process Improvement: The Case of a Serbian Manufacturer", *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 2(116), 15-22.
- Subhashini, R. ve Varghese, N. (2021). "Methods of Improving Productivity in Apparel Industry", *International Journal of Research in Engineering, Science and Management*, 4(4), 130-141.
- Tanvir, S.I. ve Ahmed, S. (2013). "Work Study Might be the Paramount Methodology to Improve Productivity in the Apparel Industry of Bangladesh", *Industrial Engineering Letters*, 3(7), 51-59.
- Tis, D., Uddin, S., Rahman, C., Islam, M. M., Khan, A.M., Mashiur, M. ve Khan, R. (2013). "Minimization of Reworks in Quality and Productivity Improvement in the Apparel Industry", *International Journal of Engineering*, 1(4), 2305-8269.
- Ur Rehman, A., Ramzan, M.B., Shafiq, M., Rasheed, A., Naeem, M.S. ve Savino, M.M. (2019). "Productivity Improvement through Time Study Approach: A Case Study from an Apparel Manufacturing Industry of Pakistan", *Procedia Manufacturing*, 39, 1447-1454.

SANAYİ İŞLETMELERİNİN TEDARİK ZİNCİRİ FONKSİYONLARININ DİJİTAL DÖNÜŞÜMÜ

Çiler ÇALLI¹, Didem ÖZER ÇAYLAN²

ÖZET

Amaç: Bu çalışma sanayi işletmelerinin Endüstri 4.0 unsurlarına hangi düzeyde hâkim olduğunu belirlemek, literatürde belirtilen etkilerin reel ile ilgisini anlamak ve adaptasyon sürecinde yaşananları tespit etmek amacıyla yapılmıştır.

Yöntem: 2019 Şubat ayında yapılan ön çalışma listesinde yer alan sanayi işletmeleriyle çevrim içi olarak yapılandırılmış görüşmeler yapılmıştır. Nitel araştırma yöntemlerinden fenomenoloji deseni kullanılarak içerik analizi tekniğiyle incelenen görüşme deşifreleri MAXQDA programında kodlanarak değerlendirilmiştir.

Bulgular: Büyük sanayi işletmelerinin Endüstri 4.0 unsurlarından en çok hangilerini kullandıkları, adaptasyon süreçleri, yaptıkları yatırımın geri dönüşü başlıklarda bulgulara ulaşılmıştır.

Özgünlük: Literatürde dördüncü sanayi devriminin sanayi işletmelerine, özellikle satın alma ve lojistik fonksiyonlarına etkilerine dair kaynakların sayısının yetersiz olmasına karşın bu çalışmada Endüstri 4.0 unsurlarını uygulayan sanayi işletmelerinin satın alma ve lojistik fonksiyonu yetkili/yöneticilerinin görüşlerinin yer alması bu çalışmanın özgünlüğünü sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Endüstri 4.0, Sanayi İşletmeleri, Tedarik Zinciri Yönetimi, Satın Alma ve Lojistik.

JEL Kodları: D23, L60, M10, O33.

DIGITAL TRANSFORMATION OF SUPPLY CHAIN FUNCTIONS OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

ABSTRACT

Purpose: This study was carried out in order to determine the level at which industrial enterprises dominate the elements of Industry 4.0, to understand the relevance of the effects specified in the literature with the real, and to determine what happened during the adaptation process.

Methodology: Semi-structured face-to-face interviews with the industrial enterprises which were included in the preliminary study list made in February 2019 were conducted online. The interview transcripts, which were analysed by content analysis technique using the phenomenology design as a qualitative research method, were evaluated by coding them in the MAXQDA program.

Findings: Findings such as which of the Industry 4.0 elements are most used by large industrial enterprises, adaptation processes, return on investment have been reached.

Originality: Insufficient number of resources in the literature on the effects of the fourth industrial revolution on industrial enterprises, especially on purchasing and logistics functions, and the opinions of the purchasing and logistics function officials/managers of industrial enterprises that implement Industry 4.0 elements provide the originality of this study.

Keywords: Industry 4.0, Industrial Enterprises, Supply Chain Management, Procurement and Logistics.

JEL Codes: D23, L60, M10, O33.

¹Yüksek Lisans Öğrencisi, Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, cilercalli@hotmail.com, ORCID: 0000-0002-7426-387X (Sorumlu Yazar-Corresponding Author).

²Doç. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi, Denizcilik Fakültesi, Denizcilik İşletmeleri Yönetimi Bölümü, İzmir, Türkiye, didem.ozer@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-8994-4715.

1. GİRİŞ

Her türlü işletmenin gerçekleştirdiği her türlü ekonomik faaliyet olarak değerlendirilen sanayi (Koç ve diğerleri, 2017: 16) sektör olarak 2019 verilerine göre Türkiye’de %25,3’lük istihdam yaratmıştır (TÜİK, 2020a) ve 2020 yılında gayri safi yurtiçi hâsıla içinde %25,26’lık paya sahiptir (TÜİK, 2021). En yalın şekliyle sanayi, teknolojinin ekonomik aktivite ile birleşmesidir (Günay, 2002: 11). Uygulamalı bilimin bir ürünü olan teknoloji (Günay, 2002: 10) ise “Bir sanayi dalı ile ilgili yapım yöntemlerini, kullanılan araç, gereç ve aletleri, bunların kullanım biçimlerini kapsayan uygulama bilgisi” (TDK, 2020) olarak tanımlanabilir. İlk defa 1984 yılında Perez tarafından kullanılan, “teknolojik paradigma” kavramı, yeni teknolojiler yayıldıkça gelişen ekonomideki etkilerini farklılaştırır ve sosyo-kurumsal yapıları değiştirir (Perez, 2009: 14). Teknolojik devrimle ilişkili olan tekno-ekonomik paradigma o dönemdeki hakim olan teknoloji konusundaki sağduyuyu anlatır (Börü ve Demiröz, 2019: 256). Teknolojik devrimler kendi tekno-ekonomik paradigmasını yaratır, yeni altyapıların pazarları genişletmesi ve yaygın yeni teknolojilerle birlikte tüm faaliyet ve sektörlerde verimlilikte sıçrama yaratır (Perez, 2012: 214). Perez, teknoloji devrimin başlayıp, onun tekno-ekonomik paradigmasının yayılması ile ekonominin çok ötesinde etkiler yaratan bu sürece *büyük gelişme dalgası* adını vermiştir (Börü ve Demiröz, 2019: 257). Dalgalar, her biri toplamda yaklaşık 40-60 yıl süren S eğrisi çizerek kurulma ve yayılma aşamalarından oluşan bir süreci ifade eder (Perez, 2011: 20).

Bulunan teknolojik gelişmelerin sanayide/üretimde kullanılması sonucunda ortaya çıkan sanayi devrimi kavramı olarak ilk kez Arnold Toynbee tarafından kullanılmıştır (Bezanson, 1922: 343). Buharlı motorun icadı, sömürgelerden gelen pamukların yoğun kumaş talebini karşılamasını sağlayan Edmund Cartwright’in su gücüyle çalışan ilk dokuma tezgâhını 1785’te keşfetmesini sağlar (Britanica, 2020). Bu keşif de *birinci sanayi devriminin* başlangıcı olarak kabul edilmektedir (Kagermann ve diğerleri, 2013: 13; Fırat S. ve Fırat O., 2017: 11; Genç, 2018: 237). Demiryolu ağının yayılması bu döneme bir ivme kazandırmıştır (Tutar ve diğerleri, 2018:198). Kömür, demir ve buharın yaygın kullanımı (Perez, 2009: 12) sayesinde taşımacılık mekanikleşmiştir (Çiçekli, 2018; Yılmaz ve Duman, 2019b: 192). Başlangıcı elektrikli seri üretim (Tekin, 2018: 252) ile 1870 olarak kabul edilen *ikinci sanayi devrimine* (Mokyr, 1999:1) Henry Ford tarafından kurulan montaj hattı hız kazandırmıştır. 1973 petrol krizine kadar devam eden tek tipe dayalı seri üretim (Alçın, 2016:20) sistemi, üretim maliyetlerini düşürerek verimliliği arttırmıştır (Tutar ve diğerleri, 2018:198). Elektrik, çelik, bakır, alüminyum ve petrol kaynaklarının kullanımı sayesinde demir yolları ve hava taşımacılığı artmış ve konteynır taşımacılığı başlamış olan bu dönem, yük taşımanın otomasyonu olarak adlandırılır (Çiçekli, 2018; Yılmaz ve Duman, 2019b: 192). 1969’da programlanabilir mantık kontrolü (PLC) bilgisayarların sanayide (Soylu, 2018: 44) özellikle imalat, tasarım ve planlamada (Xu ve diğerleri, 2018: 2942) kullanılması ile birlikte başlayan *üçüncü sanayi devriminde* üretim süreçleri otomasyona bağlanmıştır (Gökten, 2018: 882). Bu dönemde küresel tedarik zinciri ve yazılımlar sayesinde planlanıp kontrol edilebilen depolar, forkliftler, otomatik hatlar ya da robotlar tarafından sağlanan fabrika içi taşıma ve üretime başlamadan planlanan taşıma ve teslimat süreleriyle lojistik yönetim sistemi geliştirilmiştir (Çiçekli, 2018; Yılmaz ve Duman, 2019b: 192). Sanayi devrimlerinin teknolojinin sanayide kullanılması ile oluştuğu göz önüne alınırsa, Prof. Carlata’nın Yayılım Örüntüsü tablosuna sanayi devrimlerini yerleştirebiliriz. Aşağıda yer alan Şekil 1’de de gördüğümüz üzere genelde sanayi devrimleri teknolojik devrimlerin yayılma dönemlerinde ortaya çıkmaktadır ve bugün, içinde bulunduğumuz asır başında başlayan ve dijital devrim üzerinde yükselen dördüncü sanayi devriminin başlangıcında (Schwab, 2017: 16) ve beşinci teknoloji devriminin yayılma aşamasında bulunmaktayız (Kaya, 2017).



Şekil 1. Teknoloji ve sanayi devrimleri birleşimi (Denning, 2017 ve Sağiroğlu, 2018’deki bilgilerden birleştirilmiştir)

Bir işletmenin ana fonksiyonlarından biri olan tedarik zinciri yönetimi, Tedarik Zinciri Yönetimi Profesyoneller Birliği tarafından; satın alma, dönüştürme ve tüm lojistik yönetim aktivitelerini kapsayan bütün işlemlerin planlanması ve yönetimi (CSCMP, 2021) olarak tanımlamıştır. Mal ve servislerin satın alınmasından, üretimine ve son tüketiciye gidene kadar birbirini takip eden tüm halkaları kapsayan (Türker ve diğerleri, 2005: 461) ve hammadde satıcısından müşteriye dek uzanan bilgi ve malzeme akışının temin edildiği süreçlerden oluşan (Kağnıcıoğlu, 2007: 33) TZY'nin temeli, bilgi entegrasyonudur (Lou ve diğerleri, 2011: 1).

“Araştırıp bulma, sağlama, elde etme” (TDK, 2021) anlamına gelen tedarik yani satın alma, işletmelerde dar anlamda yalnız üretim girdisi olarak düşünülür (Türker ve diğerleri, 2005: 459). Bir işletmenin rekabet gücünün önemli bir itici gücü (Glavee-Geo, 2015: 389) olan satın alma, emniyete alınmış en uygun koşullarda işletmenin ana ve yardımcı faaliyetlerinin üretimi, tamiri ve yönetimi için gerekli bilgi, mal, servis ve kapasitenin dış kaynaklardan sağlanmasının yönetimidir (Van Weele, 2009: 8). Satın alma satılan ürün maliyetinin %68'nin üretime kadar olan süreçte oluştuğu (Şahin, 2004: 8) bilincine varıldığından beri, sanayi işletmelerinde destek işlevi olarak görülmekte, önemi artarak sürdürülebilirlik hedefleri ile birlikte yer almaktadır (Bag ve diğerleri, 2020: 11). 1950'lerden önce lojistik askeri bir terim olarak düşünülmekteyken (Ballou, 2007: 333) 1980'lere kadar bitmiş mal ve hizmetlerin fiziksel dağıtımı ve depo yönetimi olarak tanımlanmış, küreselleşen dünya ve gelişen teknoloji ile lojistik tanımı çok defa değişmiştir (Gundlach ve diğerleri, 2006: 432). Satın alma ve lojistik faaliyetlerini bütünleştirme konusunda çok az çalışma yapılmıştır (Kağnıcıoğlu, 2007: 42-56). Literatürde ilk defa 1982 yılında kullanılan (Cooper ve diğerleri, 1997: 1) tedarik zinciri ve lojistikle ilgili yazılan makalelere bakıldığında, bu konuların öneminin 2010 yılından sonra anlaşıldığı görülmektedir (Suvacı, 2016: 272). Bu çalışmada işletmelerin satın alma ve lojistik fonksiyonu yetkili/yöneticileri ile görüşülerek dördüncü sanayi devrimi unsurlarını nasıl tanımladıkları, hangi işlemlerde kullandıkları, adaptasyon süreçleri ile birlikte yaptıkları yatırımların geri dönüşünün tespiti amaçlanmıştır.

Çalışmanın bundan sonraki bölümlerinde; literatürde Endüstri 4.0 ve satın alma ile lojistik fonksiyonlarına etkileri araştırılmış, üçüncü bölümde çalışmanın amacı ve yöntemi, dördüncü bölümde bulgular ve tartışma ve son bölümünde ise sonuç yer almaktadır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

En yalın haliyle gömülü sistemlerden siber fiziksel sistemlere teknolojik dönüşüm (GTAI, 2013: 6) olarak adlandırabileceğimiz Endüstri 4.0, akıllı ürünler ve üretim süreçleri üzerine odaklanmış (Brettel ve diğerleri, 2014: 38) gelecekte başkalarıyla rekabet edebilme stratejisi (Mrugalska ve Wyrwicka, 2017: 469) olarak tanımlanmıştır. Amaç daha esnek, daha düşük maliyetli, daha hızlı, daha kaliteli ve verimli üretimin (Kılıç ve Alkan, 2018: 32) yanı sıra çalışma hızını ve güvenilirliğini arttırmak ve sürdürülebilir rekabet üstünlüğü sağlamak olarak sıralanabilir (Saatçioğlu ve diğerleri, 2018: 1679). Verimlilik artışı için üretim sisteminde; (1) bilgi teknolojilerinde küreselleşme, (2) bilginin sürekli güncel olan tek kaynaktan alınması, (3) otomasyon ve (4) işbirliği gibi ön koşullar gereklidir (Schuh ve diğerleri, 2014: 52). 2015 yılında McKinsey 122 tedarik zincirinde yaptığı araştırmaya göre dördüncü sanayi devrimi gelirde %23, verimlilikte ise %26'lık bir artış sağlayacaktır (Szozda, 2017: 406). Üretimde esnekliğin, hızın, kalitenin (Soyak, 2017: 75) verimliliğin ve birliğin artmasının (Oesterreich ve Teuteberg, 2016: 135) ve daha iyi müşteri ilişkileri kazandırmasının (Dev ve diğerleri, 2020: 2) yanı sıra işlemlerin basitleşerek, stokların iyileşmesi ve tedarik zincirinin şeffaflaşması (Özkan ve diğerleri, 2018: 10-11) maliyet (Stăncioiu, 2017: 76) ve teslimat sürelerinde düşüş ile birlikte küçük parti boyutlarıyla özelleştirme (Shafiq ve diğerleri, 2015: 1149) dördüncü sanayi devriminin getireceği fırsatlar olarak sayılabilir. Bunun yanında, Benedikt ve Osborne'nun (2013: 48) yaptığı çalışmalarda 702 meslek grubu içerisinde dördüncü sanayi devriminden en çok etkilenecek iş grubunun taşımacılık, lojistik ve üretim alanlarında kas gücü ile çalışan mavi yakalıların olduğu görülmüştür. Almanya'da yapılan bir çalışma sonucuna göre, bir işletmenin dördüncü sanayi devrimi vizyonunu gerçekleştirme ve uygulaması için gerekli sürenin 4 ila 10 yıl arasında (ortalamada yaklaşık 7 yıl) olması beklenmektedir (Glas ve Kleemann, 2016: 61). Başka bir çalışma ise birçok dördüncü sanayi devrimi unsurunun uygulama testi yapıldığı halde, tam olarak dördüncü sanayi devrimine geçiş yapılamadığı ve teknoloji hazır olsa dahi büyük işletmelerde dördüncü sanayi devrimi uygulamasının 5 ila 10 yıl gibi bir süre alacağı ortaya çıkmıştır (Patel ve diğerleri, 2019: 26). Bu çalışma ile Türkiye'de Endüstri 4.0'ı uygulayan sanayi işletmelerinin yatırımlarının geri dönüş süreleri ile birlikte literatürde henüz pek yer almayan adaptasyon süreçleri ve yaşadıkları zorluklar tespit edilmeye çalışılmıştır.

Merkezleri Almanya, Avusturya ve İsviçre'de olan, satın alma 4.0 uygulanmaya başlanan, değişik büyüklükte ve sektörde olan yirmi beş işletme ve iki üniversitenin temsilcileriyle yapılan çalışmada (Pellengahr ve diğerleri, 2016: 10) tüm katılımcılar dijitalleşme ve dördüncü sanayi devrimi ile birlikte satın almanın tamamen değişeceğini düşünmekle (Pellengahr ve diğerleri, 2016: 18) birlikte, katılımcıların %72'si dördüncü sanayi devriminin uygulamasında aktif bir rol oynadığını, %28'i ise itici güç olduğunu açıklamıştır (Pellengahr ve diğerleri, 2016: 22). Dördüncü sanayi devrimi farklı tedarik zinciri kaynaklarından aldığı

gerçek zamanlı zengin bilgiyi etkili tedarik zinciri tasarım kararları için kullanılabilir hale getirerek (Kamble ve diğerleri, 2018: 421) satın alma verimliliğini artırıp maliyeti düşüren tam satın alma kontrol sistemi sağlayabilir (Xie ve diğerleri, 2020: 712). Yeni sistemler sayesinde satın alma ve dağıtım artan bir şekilde kişiselleşecektir (Lasi ve diğerleri, 2014: 240).

Dördüncü sanayi devrimi unsurlarının lojistikte kullanılmalarının esas gayeleri; maliyetlerin ve çevreye yapılan olumsuz etkinin düşürülmesi, yeni iş örneklerinin planlaması ve izlenebilirliğin artırılmasıdır (Saatçioğlu ve diğerleri, 2018: 1690). “Akıllı lojistik” olarak da bilinen “Lojistik 4.0”ı, esnekliğin ve piyasa değişkenlerine uyumun arttığı, maliyetlerin düştüğü ve müşteri gereksinimlerinin optimum miktar ve hızda cevaplandığı yeni bir lojistik düzen olarak da tanımlanabilir (Bakan ve Şekkeli, 2018: 19). 1980’lerden beri kullanılan RFID sisteminde görüntü olmadığı için bazı karışıklıklar olabilir. Gelişen teknoloji ile birlikte artırılmış gerçeklik, RFID sistemi ile birleşerek okutulan malın görüntüsünü de görmemizi sağlayan bir sisteme dönüşmüştür (Ginters ve Martin-Gutierrez, 2013: 4-9). Nesnelerin interneti ve büyük veri teknolojileri de lojistik sektöründe ağırlıklı olarak kullanılmaktadır (Saatçioğlu ve diğerleri, 2018: 1692). Endüstri 4.0 unsurlarının satın alma ve lojistik fonksiyonlarına etkileri şu şekilde özetlenmiştir.

Akıllı/Özerk Robotlar: Robotlar bir işletmede ek masrafları olmayan sınırsız iş gücü yaratma potansiyeline sahiptir (Merlino ve Spröge, 2017: 314) ve robot kullanımı ürün stok kontrolünü geliştirerek sipariş doğruluğunu artırır (Keow ve Nee, 2018: 28). Robot kullanımının satın alma uzmanlarının iş yüklerini azaltarak onların katma değeri yüksek işlere odaklanmasını sağlarken işten çıkarmalara ise “mutlaka” yol açmayacağı yer almaktadır (Viale ve Zouari, 2020: 193)

Simülasyon: Simülasyon, alternatiflerin karşılaştırmalı analizi ve değerlendirilmesi için bize etkili bir yaklaşım sunar (Okada ve diğerleri, 2016: 373) makine kurulum sürelerini düşürür ve kaliteyi artırır (Kamble ve diğerleri, 2018: 417; Soylu, 2018: 48) zaman, malzeme, enerji ve finansal tasarruf sağlar (Straka ve diğerleri, 2020: 28) ancak simülasyon bir optimizasyon tekniği olmadığı için en iyi neticeyi vereceği ve alınanların da aynen olacağına güvenmesi yoldur (Yavuz, 2005: 4).

Yatay ve Dikey Entegrasyon: Yatay entegrasyonda, malzemeden ürün çıkana kadar ki döngünün lojistiğine kadar değer yaratma bölümleriyle entegre edilirken; dikey entegrasyonda ise değer yaratma ve üretim sistemlerinin farklı toplama seviyeleriyle birlikte ürün, ekipman ve insan ihtiyaçlarını bütünleştirir (Lu, 2017: 7).

Nesnelerin İnterneti (IoT): Sensör ağlar yardımı ile toplanan gerçek zamanlı bilgiler sayesinde; ulaşım yönetiminde iyileşme, çevresel etkilerin aza indirilmesi ve tarafların ulaştırma hizmetinden sağladıkları faydayı maksimum kılmak amaçlanmaktadır (Özdemir ve Özgüner, 2018: 44). Nesnelerin interneti insanlarla birlikte (Betti ve diğerleri, 2020: 142) tedarik zinciri için bilgi paylaşımını ve güvenliği artırır (Wamba ve Queiroz, 2020: 1).

Siber Güvenlik: Modern üretim tekniklerinden kaynaklanan siber fiziksel güvenlik sorunlarının üstesinden gelerek, kritik verileri doğrudan makinelere merkezileştirmiş bir kimlik doğrulama ve yetkilendirme süreciyle direkt makineye iletir (Wegner ve diğerleri, 2017: 69). Siber güvenliğin bilgi işlem tedarik sürecine katılımı 2016 yılından bu yana kayda değer bir gelişme göstermiştir (Maurer ve diğerleri, 2021: 29).

Bulut Bilişim: Bulut bilişim TZY’indeki tüm halkalar arasında eş zamanlı iletişim yaratarak, işletmelerce oluşacak talepler için üretim işletmelerin stok düzeylerinde düşüş yaratabilecektir (Öztürk ve diğerleri, 2018: 350). Bulut bilişim, lojistikte manuel işlemlerin otomasyonu ile beraber zaman ve maliyeti düşürmüş verimliliği arttırmıştır (Yılmaz ve Duman, 2019b: 196).

3 Boyutlu (3D) Yazıcılar: Yedek parçanın depolanması ve buna sermaye bağlanmasına gerek kalmayarak (Yılmaz ve Duman, 2019b: 197) tedarik riskini azaltacaktır (Ivanov ve diğerleri, 2018: 833). Ayrıca TZY’nin müşteri odaklılık, uyum, hızlı yanıt, verimlilik gibi belli başlı birçok kavramını doğrudan destekler özelliğindedir (Akyüz, 2019: 124).

Arttırılmış Gerçeklik: Deponun ve aracın doğru ve optimum kapasite ile yerleşim planı yapılmasını sağlayabilir (Yılmaz ve Duman, 2019a: 3-4)

Büyük Veri: Tedarik zinciri maliyetlerinde azalma, değişen ortamda daha hızlı yanıt verme, verimlilik elde etme, operasyon planlama ve satış becerilerini geliştirerek daha güçlü tedarikçi ilişkileri sağlamaya yardımcı olan büyük verinin (Gunasekaran ve diğerleri, 2017: 311) analizleri işletme performansını artırıcı etkiye sahiptir (Ji-fan Ren ve diğerleri, 2017: 5021). Pellengahr ve diğerlerinin (2016: 25) yaptığı çalışma sonuçlarında büyük verinin satın alma için kilit rol oynadığı ve özetlenen verilerin karar verme sürecinin temelini oluşturduğu görülmüştür. Büyük veri sayesinde tedarik maliyetinin düşürülmesi için yeni fırsatlar keşfedilebilir ve satın alma randımanı %10’dan %30’a arttırılabilir (Khuan ve Swee, 2018: 54).

Siber Fiziksel Sistemler (CPS): Üretimin her seviyesini birbirine özerk ve işbirlikçi unsurlar ve alt sistemlerle bağlar (Monostori ve diğerleri, 2016: 624). Lojistik sistemler, siber fiziksel sistemlerin kullanımı için bilgi ve mal akışı, temel fonksiyonların karmaşasını çözmek ve süreç adaptasyonu bakımından iyi alanlar sağlamaktadır (Prasse ve diğerleri, 2014: 55).

Akıllı Fabrikalar: Akıllı fabrikalarda siber fiziksel sistemler ana destek olup tüm ekipman, insan, mal ve ürün, operasyon ve süreçlerin olduğu eş zamanlı çalışan, biri fiziksel diğeri sanal olan iki takım sistem vardır (Davies ve diğerleri, 2017: 1289; Zhang ve diğerleri, 2017: 141). Akıllı üretim, tedarik zincirine; etkinliği ve kaliteyi artırma, belirgin maliyet düşüşü, esneklik, genişletilmiş sorumluluk gibi faydalar sağlamaktadır (Menon ve diğerleri, 2018: 181).

Blok zincir (Blockchain): Blok zincir teknolojisi ile tek bir kuruluş tarafından yönetilmeyen, paylaşılan ve güvenilir bir bilgi sistemi olduğundan bu veriler her adımda herkes tarafından kullanılabilir ve dolayısıyla hem işletmeler hem de tüketiciler için şeffaflığı artırır (Betti ve diğerleri, 2020: 140). Blok zincir özellikli akıllı sözleşmelerin kullanılması sayesinde satın alma süreçlerindeki yolsuzluk azalacaktır (Akaba ve diğerleri, 2020: 9).

Küpper ve diğerleri (2016) üretim yöneticileri ile Pellengahr ve diğerleri (2016: 25) satın alma yöneticileri ile endüstri 4.0 üzerine nicel çalışma, Viale ve Zouari (2020: 193) ise vaka analizi kullanarak nitel çalışma yapmışlardır. Yarı yapılandırılmış birebir satın alma ve lojistik yöneticileri ile görüşüldüğü bu çalışma nitel araştırma yöntemlerinden fenomenolojiyi kullanarak alanındaki bir boşluğu doldurmuştur.

3. YÖNTEM

Bu çalışmanın yapıma amacı, dördüncü sanayi devrimi unsurlarını adapte eden işletmeler dördüncü sanayi devrimini nasıl tanımlıyorlar, adaptasyon süreci ve yaşanan zorluklar nelerdir sorularına yanıt aramaktır.

Sosyal bilimcilerin ilk kullanımlarının 1960'lara uzandığı nitel araştırma yöntemi (Tanyaş, 2014: 25) yorumlayıcı ve natüralist bir yaklaşım içermesi (Denzin ve Lincoln, 2008: 4), insan deneyimlerinin derinlemesine incelenmesini sağlaması (Kıral, 2020: 172), tanımlayıcı olması ve sonuçtan çok süreçle ilgilenmesi (Bogdan ve Bilken, 1992: 5-6) nedenleriyle kullanılmış ve araştırma deseni olarak fenomenoloji seçilmiştir. Araştırma konusunu deneyimlemiş kişilerle yarı yapılandırılmış görüşmeler ZOOM iletişim programı aracılığı ile internet üzerinden yüz yüze yapılarak toplanan veri MAXQDA programında analiz edilmiştir.

Katılımcılar yaşları itibarıyla; ikisi X kuşağına, kalanı Y kuşağına mensuptur, katılımcıların arasında Z kuşağından bir yetkili/yönetici bulunmamaktadır. Katılımcıların ikisi 5 sene ve altında; üçü 5-10 sene arasında; kalan dördü de 10 sene ve üstünde aynı işletmede çalışmaktadır. Katılımcıların pozisyonları; 1 grup tedarik zinciri müdürü, 2 tedarik zinciri müdürü, 2 lojistik müdürü, 1 tedarikçi müdürü, 1 tedarikçi performans geliştirme sorumlusu, 1 tedarik kalite mühendisi ve 1 satın alma uzmanı şeklindedir. Çalışan sayısı bakımından büyük işletme statüsüne giren işletmelerin beşi çok uluslu, biri yabancı ortaklı ve üçü de yerli sermayeye sahiptir. İşletmelerin 5'i yaşları bakımından 50 ve üzeri, geri kalanı da 40 yıl altıdır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Araştırmanın amacına istinaden hazırlanan araştırma soruları doğrultusunda yapılan görüşmelerin analizi sonucunda ulaşılan beş temadan sadece satın alma ve lojistik ile ilgili olanlar detaylandırılacaktır.

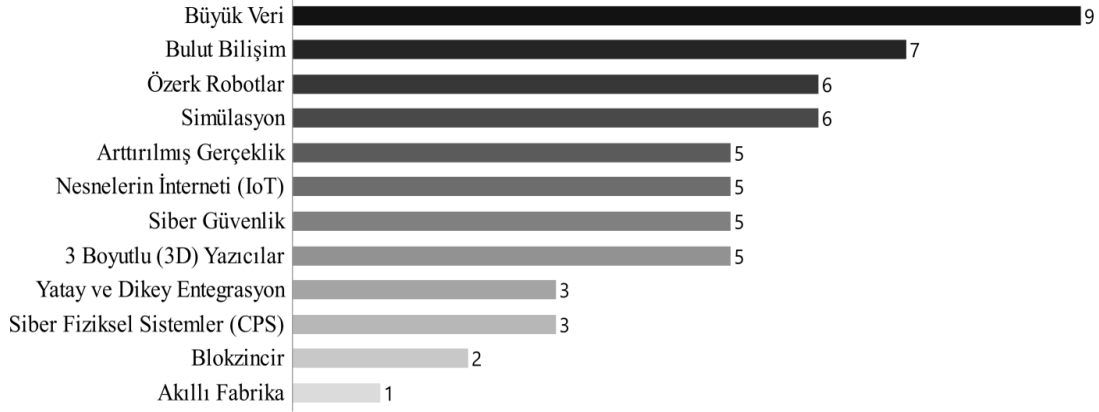
4.1. Dördüncü Sanayi Devriminin Tanımına İlişkin Bulgular

Yapılan görüşmelerde katılımcılar dördüncü sanayi devrimi için "*sürekli gelişmeye devam eden süreç*", "*dijitalleşme*", "*ileri teknoloji*" veya "*teknolojik gelişim*" gibi kavramlar kullanılmıştır. Katılımcılar dördüncü sanayi devrimi demek yerine *endüstri 4.0* demeyi tercih etmişler ve görüşmelerde katılımcılar tarafından toplamda 54 kez *endüstri 4.0*, 3 kez de *dördüncü sanayi devrimi* kelime öbeği kullanılmıştır. Dördüncü sanayi devriminin "*tam anlaşılmadığını*" düşünenlerin yanı sıra "*en yüksek teknolojiyi en iyi şekilde kullanma*" olarak da tanımlamış, "*iyileştirme*" olarak gören katılımcı devrim yerine "*değişiklik*" demenin daha doğru olacağını düşündüğünü iletmiştir. Dördüncü sanayi devrimini "*teknoloji kullanımı*" olarak gören katılımcılardan çok uluslu bir işletmede 18 yıldır çalışan şu an da tedarik zinciri müdürlüğü görevini yürüten Katılımcı-9 dördüncü sanayi devrimini "*dijital dönüşümden platforma giden yolculuk*" olarak tanımlamıştır. Dijital dönüşüm yıkıcı veya artımlı bir değişim sürecidir, dijital teknolojilerin benimsenip kullanılmasıyla başlar ve organizasyonun bütünsel dönüşümüne yol açar (Henriette ve diğerleri, 2016: 3).

4.2. Dördüncü Sanayi Devriminin Unsurlarına İlişkin Bulgular

TÜSİAD'ın BCG (2016: 25) ile birlikte hazırladığı "Türkiye'nin Küresel Rekabetçiliği için Bir Gereklilik Olarak Sanayi 4.0" isimli raporunda belirttiği dördüncü sanayi devrimin unsurlarından hangilerinin satın

alma ve lojistik fonksiyonlarında kullanıldığının sorulduğu soruya verilen yanıtlarda bu dokuz unsura ilaveten literatürde de isimleri geçen “siber fiziksel sistemler (CPS)”, “blok zincir (blockchain)” ve “akıllı fabrikalar (smartfactory)” unsurları da katılımcılar tarafından dile getirilmiştir. Şekil-3’de dördüncü sanayi devrimi unsurlarından bahseden katılımcı sayıları bulunmaktadır.



Şekil 3. Dördüncü Sanayi Devrimi unsurlarının katılımcılar tarafından kullanım sıklığı

Büyük veri için tüm katılımcılar işletmelerinin satın alma ve lojistik fonksiyonlarında kullanıldığını belirtmişlerdir. 1985 yılından beri faaliyet gösteren %100 yerli sermayeye sahip işletmede grup tedarik zinciri müdürü olarak çalışan Katılımcı-4 on sene önce kurdukları OLAP küpleri ile veriyi özetleyerek kullandıklarını belirtmiştir. İlk defa Dr. Codd tarafından kullanılan OLAP küpleri özet veri sayesinde karar verme sürecine katkı sağlamaktadır (Çubukçu, 2020: 65). Büyük veri kullanımı, özellikle satın almanın anlamlı bilgi yaratmak ve gerçek zamanlı cevap verebilmek için dijitalleşmesini desteklemektedir (Pellengahr ve diğerleri, 2016: 8).

Dijital dönüşüm sürecinde büyük veriden sonra en çok kullanılan unsur **bulut bilişim**dir. 6 katılımcı hâlihazırda kullandıklarını 1 katılımcı da ileride kullanmayı planladıklarını belirtmiştir. Bulut bilişim kullanan işletmelerden ikisi Microsoft Azure ile birlikte çalıştıklarını belirtmiştir. Bulut bilişimin, tedarikçi ile bilgi paylaşımı ve herhangi bir yerden işletme bilgilerine ulaşabilme gibi birçok nedenle katılımcılar tarafından kullanıldığı ve çeşitli zamanlarda yedeklerinin aldırıldığı belirtilmiştir. Microsoft Azure seçilen araç ve kapsamda birden fazla bulutta, işletme içinde ve uçta çalıştırılabilir (Microsoft, 2021).

Özerk robotlar için 6 katılımcı etiketlemeden paletlemeye, stok sayımından depo-üretim hattı arasında ürün taşımaya kadar birçok alanda kullandıklarını belirtmiştir. %100 yerli sermayeye sahip ve Güneydoğu Anadolu bölgesinde faaliyet gösteren 15 senelik bir işletmede tedarik zinciri müdürü olarak çalışan Katılımcı-1 “Ürünlerimizi şu an dünyada en büyük robotlama, paletleme teknolojisi ile yapar bir hale geldik. Robot teknolojisini kullanarak bu alanda çok hızlı, çok daha hijyen bir şekilde bir paletleme ve sevkiyat sistemi kurduk” diye belirtmiştir. Krug ve diğerleri (2016: 546) tedarik zincirinde özellikle lojistik fonksiyonunda çalışanlarda hem zihinsel hem de fiziksel rahatsızlıklara yol açabilecek sıkıcı ve yorucu işlerin otomasyonu için kısmi çözümler sağlayan otonom/özerk robotları bir adım ileri götürerek basit sipariş toplamayı insan güvenliğine uygun bir şekilde kendi kendine yapabilen robot sistemi oluşturmuşlardır.

Katılımcı-2 simülasyonu şu an için üretimde kullandıklarını, Katılımcı-4 henüz kullanmaya başlamama nedeni olarak lisanslama maliyetlerinin yüksekliğini göstermiştir. Aktif olarak kullanan dört katılımcıdan detaylı bilgi veren yabancı ortaklı işletmede tedarikçi performans geliştirme sorumlusu olarak çalışan Katılımcı-7 “...tedarikçilerimizle biz çok sıkı çalışmak durumundayız parçaların kalitesi,...,ile ilgili bir sürü test yapılması gerekiyor ki parça kabul alabilsin...bunlar için artık gitmeden uzaktan testler de yapabiliyoruz, veya tedarikçilerimiz bu testleri bizimle beraber aynı anda simülasyon üzerinden yapabiliyor...” diyerek tedarik zincirinde simülasyon kullanımının farklı bir yönü ile birlikte hammadde tedarikinde sorun olduğunda üretim hattında üretilen ürünü değiştirme işleminin şu an tecrübeli çalışanlar ve fazla stok tutulmasından kaynaklı çözümünü simülasyon yardımı ile yapılabileceğini de belirtmiştir. “Dijital ikiz” konusuna değinen iki katılımcıdan (Katılımcı-5 ve Katılımcı-4) daha detaylı bilgi veren Katılımcı-4 aynı sektörde olmadıkları bir Türk işletmesi için “...çok katma değerli bir şey yapmış üretim tarafında kullanmış simülasyon modelini, bunu da canlıya taşımış. Digital twin dediğimiz dijital ikiz yaratmış simülasyon tarafında, ben veri tarafında dijital ikiz yaratmış oldum...” sözlerini dile getirmiştir. Baghci ve diğerleri (1998: 1387) çalışmalarında, tedarik zincirinde stratejik kararlar almadan önce IBM Tedarik Zinciri

Simülatörü'nün kullanımının onlarca/yüzlerce milyon dolarlık tasarruf sağladığını tecrübe ettiklerini belirtmişlerdir.

Arttırılmış gerçeklikle ilgili “üretim tesisleri için teknolojinin efektif çalışması konusunda aksaklıklar var” diyerek teknolojinin biraz daha gelişmesini bekleyen Katılımcı-9'un yanı sıra Katılımcı-8 önümüzdeki dönemde depoda kullanacaklarını belirtmiştir. Eğitimlerde kullandıklarını belirten Katılımcı-7 ve Katılımcı-2'den daha detaylı bilgi veren Katılımcı-7 “...iş başında özellikle Covid-19 pandemisi döneminde bir ustabaşı ile siz birebir çalışamayacağınız mesafeden dolayı, bunu önce arttırılmış gerçeklikle sanal bir ortamda birebir uyguluyoruz” demiş ve verdikleri eğitimler için “taktıkları VR gözlükler ve eldivenlerle beraber bir parçayı istenen tork ile sıkıyorlarmış, istenen yere taşıyorlarmış gibi birebir arttırılmış gerçekliği kullanıyoruz” diye eklemiştir. Müşterilerin daha fazlasını istediği modern tedarik zincirinde arttırılmış gerçeklik belirleyici güçlerden biri olacaktır. Örneğin depodan mal toplanması için ilgilinin doğru ürünü bulup yükleme alanına teslim etmesi gerekir arttırılmış gerçeklik sayesinde ürünün tam olarak nerede olduğu görülebileceği için bu işlem çok daha hızlanabilir (Merlino ve Sproge, 2017: 311).

Katılımcılardan biri henüz aktif olarak kullanmaya başlamadıklarını, ikisi pilot uygulamalar yapıldığını, diğer ikisi ise aktif olarak nesnelerin internetini (IoT) kullandıklarını belirtmişlerdir. Katılımcı-4 “...el terminallerinden üretilen aynı zamanda “beacon”lar (işaretleyici) vardır, beaconlar bluetoothlarla haberleşen şeylerin cihazların envanter yönetimi tarafında ve kaynakların görünürlülüğü tarafında kullanılıyor” demiş ve sevkiyatta otomatik iş emirleriyle bastıkları çıkış sevkiyat listelerini istenen yerden, ilgili paletin alınıp karma palet yapılıp yapılmadığını, doğru bölünüp bölünmediğini forkliftlere kurdurdukları beaconlar sayesinde konum bilgisi olarak kontrol edebildikleri belirtmiştir. Nesnelerin birbirleriyle bağlanmasını sağlayan ve 2013 yılında tasarlanan beacon nesnelerin interneti (IoT) unsurunun en güncel teknolojisi olmuştur (Dong ve diğerleri, 2019: 4251). Depo duvarlarına yerleştirilmiş işaretleyicilerden gelen bilgiyi alabilen anten dizisiyle donatılmış forklift, depodaki konumunu belirleyebilir (da Costa Soares, 2021: 1).

Siber güvenlik için “olmazsa olmazımız” diyen Katılımcı-7 2017 yılında Renault Bursa fabrikasının 2,5 vardiya üretimi durdurmasına yol açan siber saldırıyı (Cumhuriyet, 2017) hatırlatarak “...siber güvenlik bizim de tüm sektörlerin de en öncelikli maddesi haline geldi..” demiştir. İki katılımcı siber güvenlik için ayrı birimleri olduğunun altını çizmiştir. Dijital dönüşümde en büyük çekincelerden biri olan siber güvenlik için işletmelerin önlem almakla birlikte ayrı bir birim kurmakta ne kadar haklı olduklarını IBM raporu göstermektedir. IBM (2020: 29) raporuna göre 2019 senesinde en çok siber saldırıya uğrayan sektörler arasında imalat sektörü beşincilikten sekizinciliğe düşmüştü ancak aynı raporun son sayısına göre imalat sektörü en çok siber saldırıya uğrayan ikinci sektör olmuştur (IBM, 2021).

3 Boyutlu (3D) yazıcılar katılımcılar tarafından yeni ürün kalıpları için kullanıldığı belirtilmiş ve Katılımcı-1 “...üç boyutlu yazıcılarla modellemesini yapıp, görüp sonrasında satın alma yapabiliyoruz..” diye açıklamıştır. Çok uluslu büyük bir işletmede 3,5 yıldır çalışan ve şu anda tedarikçi müdürlüğü görevini yürüten Katılımcı-2 üç boyutlu yazıcıyı işletmelerinde nasıl kullandıklarını “..teknik dayanım olarak beklentimizi karşılamayabilir, mesela 10 bekliyorsam 6-7 karşılıyor ama ben alıyorum üç boyutlu yazıcıdan çıkan parçayı bir montaj denemesi yapabiliyorum, çok çok büyük avantajlar sağlıyor..” sözleriyle belirtmiştir. Attaran'a (2017: 681) göre, üç boyutlu yazıcılarla yapılan üretimin geleneksel üretime göre hız, maliyet kalite gibi temel avantajları bulunmaktadır. Bunun aksine Taşkın ve Çallı'ya (2015: 7) göre ölçek ekonomisine göre daha maliyetli ve yavaş olmalarının yanı sıra şu an için üretimde kullanılabilecek malzeme sayısının limitli olması üç boyutlu yazıcıların zayıf yönlerini oluşturmaktadır.

Yatay ve dikey entegrasyon ile ilgili Katılımcı-4 “..yatay ve dikey entegrasyonda zaten yatay katmanda tedarik zincirinde görünürlük kontrol kulesi yaklaşımından yola çıkarak ERP, WMS, TMS bir de bizim bu araç takip sistemlerinin tüm yazılımı ile insan kaynakları yazılımını birbirine entegre ettik...” demiştir. Katılımcı-7 ise dikey entegrasyonla ilgili şunları dile getirmiştir;

..yaklaşık olarak 3 yıldır yapmış olduğumuz çevik dönüşüm çalışmasının bilimsel olarak maddelenmiş hali, burada ne yapıyoruz? ..hiyerarşik düzen dediğimiz düzen bizde kırılıyor, artık bizde unvanlar ortadan kalkıyor ekip lideri yönetici, müdür değil roller yer alıyor....ben ekip lideri değilim ben Katılımcı-7'yim bu bu işlerde yetkinim...bir rolüm ve yaptığım işlerden beslenen bir yetkinlik grubum oluşuyor.

Kontrol kulesi tedarik zinciri boyunca tedarikçiler, sözleşmeli üreticiler, nakliyeciler ve üçüncü taraf lojistik satıcılarının malların çıkış noktasından varış noktasına hareketlerini gerçek zamanlı izlemeleri için uçtan uça bütüncül görünüm sağlar (Liotine, 2019: 57). İnsanlar, ürünler, ekipman gibi değer unsurlarının üretim hattı veya işletme içiyle entegrasyonu olan dikey entegrasyon bu etkileşime ek olarak pazarlama, satış ve satın alma gibi görevlerin de entegre edilmesini içerir (Tung, 2018: 72).

Siber fiziksel sistemlerin kullanımı için çok uluslu bir işletmede tedarik kalite mühendisi olarak çalışan Katılımcı-3 “..yanlışlıkla bir forkliftin arkasına ya da treylerin içine yanlış malzeme yükleyip onu farklı bir

üretim holüne taşıdığımızda uyarı veriyor ve bu sayede siz kayıpları engelliyorsunuz” diye belirtmiştir. Katılımcı-4 ise “...insanların hangi raftan, hangi depo lokasyonundan ürünlerini toplayacağına arka tarafta algoritmaların çalışıp sizin bizim sezgisel yaptığımız işlere kendilerinin karar vermesi ve uygulayıcılara, operatörlere otomatik iş emirlerinin iletilmesi ,..., arka tarafta bir tool kullanıyoruz burada, karar destek sislerini kullanıyoruz...” sözleriyle dile getirmiştir. Siber fiziksel sistemler gerçek zamanlı bilgi izleme gerektirir (Lee ve diğerleri, 2018: 2756). Bilişim teknolojileri ile siber fiziksel sistemlerin lojistiğe entegre edilmesi görünürlüğü ve yönetebilirliği belirgin bir şekilde iyileştirerek daha verimli hale getirebilir. Bu alandan gelen bilgiler de daha yüksek düzeyde teknolojik ilerleme için kritik girdi oluşturabilir (Ramingwong ve diğerleri, 2021: 204).

Blokcincirin satın alma fonksiyonunda güvenlik amaçlı kullanımını Katılımcı-7 şöyle anlatmıştır;

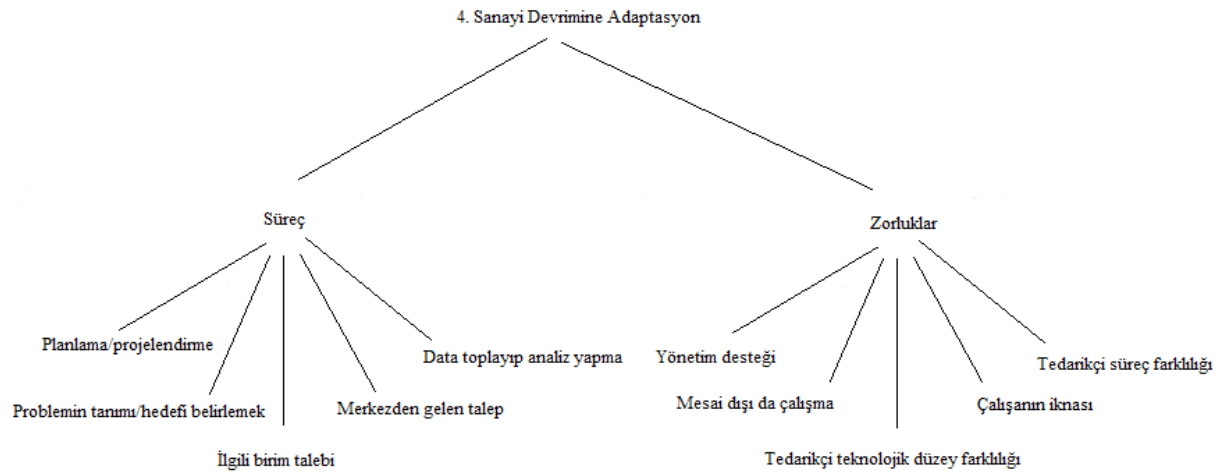
...şu an bir parçanın menşei kriptolanmış olarak bize Endüstri 4.0 kapsamında iletiliyor, hem bize hem tüm paydaşlarına. Böylece (dış ticarete bir terim vardır GTİP denilen) parçanın menşeiini belirten %10 İtalyan, %80 Fransız, %5 Türk gibi, bunun şeffaf bir şekilde takibi ve değiştirilmesinin engellenmesinin etkisini yine Endüstri 4.0 ile tedarik zincirinde görüyoruz.

Blok zincir, bilgilerin saklanabileceği merkezi olmayan bir veri tabanı olarak görülebilir (Perboli ve diğerleri, 2018: 62019). İşletmeler müşterilerine tedarik zinciri boyunca neler olup bittiğini tanımlama ve izleme ile desteklenen tamamen özelleştirilmiş hizmetler sunabilirler (Sauer ve diğerleri, 2021: 327).

Akıllı fabrikaların satın alma ve lojistik kullanımları konusunda Katılımcı-4’ün kurduğu tam otomatik depo ile ilgili şunları söylemiştir: “...şu an otomatik depomu kendi bilgisayarımın yönetebiliyorum. İlgili bu siparişleri buradan indir, buradaki dinamik rafa yolla, bu araca yüklensin, ilgili araca yüklendikten sonra da otomatik ETA bilgisini aktarabiliyorum. Dijitalleşme bence budur.” Akıllı fabrikalarda işlemlerin sorunsuz yürütülebilmesi için malların açıkça tanımlanabilmesi gerekmektedir ve bu tanımlamada RFID çipler kullanılabilir. Örneğin; bir kamyon akıllı fabrikaya yaklaştığında tahmini varış süresi hesaplanan süre ile karşılaştırılır, bir gecikme algılanırsa atanan zaman aralığı serbest bırakılır ve yaklaşan başka bir kamyonun kullanımına sunulur (Zander ve diğerleri , 2020: 471).

4.3. Dördüncü Sanayi Devrimi Adaptasyonuna İlişkin Bulgular

Görüşmeler esnasında adaptasyon süreçlerinin nasıl geliştiği ve yeni adaptasyon yapacak işletmelere önerileri nelerdir şeklindeki sorulardan oluşturulan adaptasyon teması iki kategoriye ayrılmaktadır. (1) Süreç ve (2) Zorlukları aşmaya yönelik öneriler temaları ve en sık dile getirilen beş kod aşağıdaki Şekil-4’de gösterilmiştir.



Şekil 4. Dördüncü Sanayi Devrimi adaptasyonu

Süreç kategorisinde kodlar en sık dile getirilmesine göre değil süreç akışına göre sıralanacaktır.

Adaptasyon süreci merkezden ya da ilgili birimden (ki bu birim yenilikler için oluşturulmuş bir birim de olabilir, satın alma pazarlama gibi bir birim de olabilir) gelen talep ile başlamaktadır. Bu talepleri, Katılımcı-

3 "...merkezi bölümlerden (divizyonlar) departmanlar tarafından yönlendiriliyor ve talep ediliyor, ...bizim merkezimizden gelen direktifler neticesinde çalışmalar başlıyor..." ve Katılımcı-7 "...ilgili ekipler bu konuda böyle bir teknoloji olduğunu böyle bir duyum aldıklarını söylüyor..." şeklinde dile getirmiştir. Böyle bir birime sahip olmayanlar için de Katılımcı-9 "...ama burada bir yol arkadaşı bence (kendi bünyesinde böyle bir yapılanma yoksa) şart. Önce neredeyim tanımı yapılması lazım..." ve Katılımcı-5 "...ilk önce hedefini belirle, amacı belirle..." sözleriyle problemin tanımının ve hedefin belirlenmesi gerektiğini vurgulamışlardır.

Problem tanımlanıp hedef belirlendikten ya da merkez/ilgili birimden gelen talep alındıktan sonra planlama projelendirme aşamasına geçiliyor, bununla ilgili Katılımcı-8 "...bizim merkezimizden gelen direktifler neticesinde çalışmalar başlıyor ve bunlar projelendiriliyor..." şeklinde dile getirirken planlama projelendirme sürecini Katılımcı-8

...biz zaten bunun bir simülasyonunu yapıyoruz, yani şöyle yapıyoruz bilhassa manuel olarak tabii bu çok yerde dönebilir. Kendimi bir düzeltiyim orda. Biz tabii adam saat bazında ne kadar bir tasarruf yapacağımızı daha projeye başlarken öngörüyoruz. Biraz o yeşil ışık yakalım yakmayalım bu projeye cevabı da oradan çıkıyor aslında. Adam saat olarak ciddi bir katma değer görüyorsak zaten hiç beklemiyoruz. Ama bunun dışında özellikle satın alma tarafında kalan işlerde bu yapacağımız gelişmeler ilk etapta kısa vadede bir dönüş sağlamayabilir bunun da farkındayız ama ilerleyen dönemde baktığınız zaman bize bir katma değer yaratabiliriz. Bunların hepsini aslında bir faktör olarak düşünüp günün sonunda bir matris üzerinden çalışarak biz bu işin dönüşünü kaç yılda görürüz bir plana oturtuyoruz.

şeklinde detaylı vermiştir. Sonraki aşama olan proje takımlarının kurulmasını Katılımcı-3

...bunun için ayrı özel bir departman kurulmuyor fakat her departmandan bu tarz faaliyetleri dijitalizasyon çatısı altında toplayıp belli sürelerde belli çıktılar alınması isteniyor. Genelde işte bölüm ya da divizyon yöneticilerinin seçtiği, atadığı ve konuda çalışmak isteyen arkadaşların oluşturduğu proje takımlarıyla yapılıyor bu iş...

şeklinde belirtmiştir. Katılımcı-9 ise

...supplychaine özel özellikle dönüşüm stratejisi ile beraber supply chain innovators diye bir ekip kurduk. Tamamen gönüllülerden oluşuyor. Teknolojiye ilgili, bu konuda araştırma yapmak isteyen, bundan heyecan duyan, sürecin içerisindeki arkadaşlar bunlar. Onlar düzenli olarak markette available, farklı sektörlerde kullanılan teknolojileri araştırıp bulup ekiple paylaşım bir esinlenme yarattılar. Ve bu ekibin amacı hem herkesin bu konuda bilgi düzeyini hizalamak ve kendi alanı ile düşünmesini, fırsatlar bulmasını sağlamak hem de ekibin kendisinin şirket içerisinde supplychain içerisinde süreçlerinde yapılabilecek olan çalışmalar ve bunu nasıl implemente edilebilir konusunda proje geliştirmesiydi. Biz adaptasyonu böyle gerçekleştirdik.

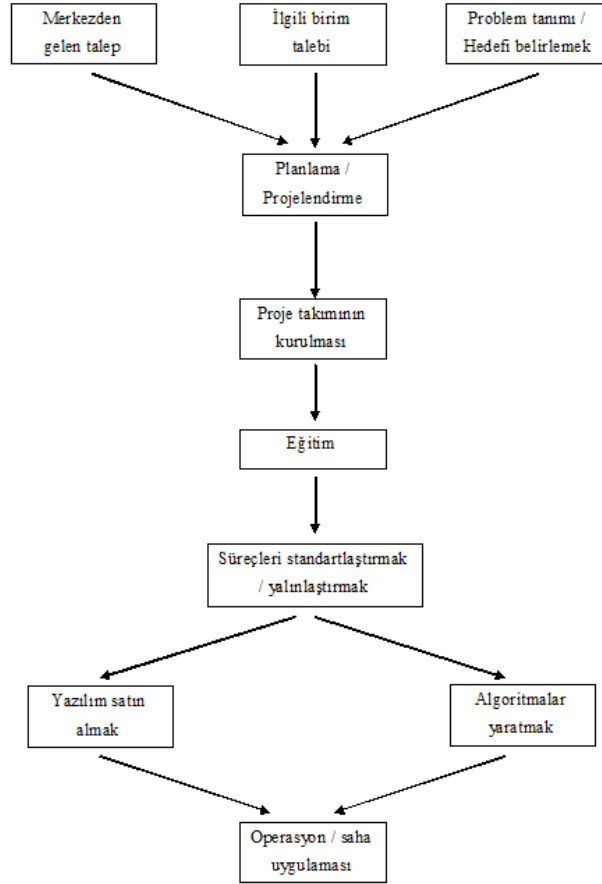
diyerek proje takımlarının oluşturulma süreç ve görevlerini anlatmışlardır. Proje takımı kurulduktan sonra ekibin eğitim alma aşamasını Katılımcı-8

...ilgili iş biriminden destek verecek arkadaşlarımızın da bir six sigma eğitimi görmesi gerekiyor öncesinde. Yani süreci nasıl yalınlaştırabiliriz, nasıl daha sistematik bir hale getirebiliriz. Bunun A'sını B'sini C'sini bir öğrenelim ki ondan sonra aslında bu iş birimine derdimizi ifade edelim ve devamında beraberce ortaya bir sonuç çıksın diye bir ilerleyiş var bizde...

sözleriyle anlatmış eğitimin devamında süreçlerin yalınlaştırılması ve standartlaştırılması aşaması geldiğini de belirtmiştir. Katılımcı-1 "...yazılım satın alması gerekiyorsa yazılım satın alması yapıyoruz..." diyerek ve Katılımcı-4 "...verilerin iletişimi manasında kendimiz algoritmalar yazdık..." şeklindeki söylemleriyle içerde algoritmaların yazılımını ve eğer yazılım ihtiyacı doğarsa dışarıdan tedarik edilmesi gerekliliğini vurgulamışlardır.

Katılımcı-4 bundan sonraki aşamayı, operasyon yani saha uygulama aşaması olarak tanımlamış ve uygulamalarla sürecin test edildiğini anlatmıştır. Bu aşamada Katılımcı-3'ün anlattıklarına göre eğer süreçlerin izin vermesi bağlamında sadece data toplanabilir ya da toplanan bu datalardan analiz de yapılabilir.

Şekil-5'de katılımcıların adaptasyon sürecinde geçirdikleri aşamalar bir bütün olarak verilmiştir.



Şekil 5. Dördüncü Sanayi Devrimi adaptasyon süreç modeli

Adaptasyon süreci sırasında yaşanan zorluklar da gözden kaçırılmaması gereken bir husustur. Bu kategoride beş adet kod oluşturulmuştur, bunlardan ikisi çalışanla yani uygulayıcılarla ilgilidir. İşletmeye yeni bir uygulama bir proje geldiği zaman mesai dışı çalışmak gerektiğini Katılımcı-4 "...zaman meyvumu olmayacak. Herkes çünkü haftanın 185 saati çalışıyor. 185 saatin haricinde bizim yaptığımız gibi Cumartesi ve Pazar günleri çalışacaklar, çalışmadan olmuyor biz 4-5 senede bu noktalara geldik..." sözleri ile dile getirmiş, çalışanın ikna olması gerektiğini Katılımcı-9 "...hepsinin ötesinde de bu işi insanla yapıyorsunuz. Yani herkesi dâhil edip insanları gerçekten bu konuya ikna etmelisiniz. Tepeden inme olacak bir iş değil. Herkesi ikna ederek dâhil ederek başlamanız lazım..." diyerek vurgulamıştır.

Kalan üç kategoriden ikisi tedarikçilerle ilgilidir. Katılımcı-3 tedarikçi teknolojik düzey ve süreç farklılığını

...şimdi çalıştığımız endüstri nedeniyle bizim tedarikçilerimizin teknolojik seviyeleri çok farklılık gösterebiliyor. Basit bir vida tedarikçisi ile işte kompleks bir mekatronik parçayı tedarik eden tedarikçiler arasında çok farklılık olabiliyor. Gerek işletme tarzında, gerek işte kendi proseslerinde ya da algılarında çok farklılık oluşuyor...

sözleriyle dile getirmiştir. Katılımcı-4 projenin başarısı için "...üst yönetimin öncülüğü olmayan hiçbir proje anlamlı olmuyor. Üst yönetimin arkadan gelip, ben arkadan geliyorum sizi destekliyorum demesi ile değil, üst yönetimin önde koşmuş olduğu sizin de ardından onun heyecanı ile, hızlı tempoyla beraber hareket ettiğiniz süreçler oluyor..." sözleriyle üst yönetimin öncülüğünün ve/veya desteğinin zorlukları aşmada ne kadar önemli olduğunu vurgulamıştır.

Oswald ve Krmar'a (Klein, 2020: 1014) göre; işletmenin iş modellerini, organizasyon yapısını ve çalışma biçimi gibi işletmenin genelini etkileyecek dijital dönüşüm süreci zorluklarla doludur. Dördüncü sanayi devrimi adaptasyonunun devamlılığı için yalın altı sigma kültürü ile uyumlu bir şekilde yapılması gerektiğini savunan Butt (2020: 16-20) stratejik dördüncü sanayi devrimi yol haritası aşamalarını; tanımlama, ölçme, değerlendirme, optimize etme, geliştirme, meşru kılma ve uygulama şeklinde sıralamıştır.

4.4. Dördüncü Sanayi Devrimi Yatırımlarının Geri Dönüşüne İlişkin Bulgular

Katılımcılara adaptasyon için yapılan harcamaların ne kadar sürede geri döneceğini düşündükleri soruya alınan yanıtlar çeşitlidir. Katılımcı-9 "...biz şöyle söyleyeyim, satın alma ile ilgili örneğin satın alınan otomasyonu ile ilgili geri dönüşü çok kısa sürede oldu..." derken, Katılımcı-1 "...yaptığımız endüstri 4.0 yatırımlarında bahsettiğim ekipmanın geri dönüş süresi gerçek anlamda 20 yıl..." demiş, ayrıca Katılımcı-3, Katılımcı-5 ve Katılımcı-7 de geri dönüş süresinin ortalama 5 yıl olacağını dile getirmişlerdir. Bu tarz objektif geri dönüş hesaplamalarının yanı sıra subjektif geri dönüşlerinin de olduğunu Katılımcı-1 şu sözleriyle açıklamıştır; "...bunu belki herkes analiz edemeyebilir hani bunun bir geri dönüş süresi yok çünkü. Kalitenin geri dönüş süresini nasıl söyleyeceksiniz... kalite açısından geri dönüşü bizim için 1 yıl oldu, müşteri beklentisini karşılama açısından 1 yıl oldu, müşterilerimize de bunu sunup, bunun getirdiği faydaları ortaya koymanın geri dönüşü bizde 1 yıl oldu diyebilirim..." demiş ve "...çünkü aynı zamanda biz personel de eğitiyoruz değil mi! Endüstri 4.0 yaptık, onunla ilgili personel onu kullanmaya başladı, ona adapte oldu. Bu da bir eğitim. Bunun geri dönüşü yok ki. O personel orada eğitildikçe siz başka alanlarda başka faydalar elde ediyorsunuz..." şeklinde hesaplanmayan ama yatırım sonrası katma değer sağlayan geri dönüşler de olabileceğini eklemiştir.

Katılımcı-5 "...keza bu endüstri 4.0 ile ilgili yapılan projelerin hayata geçme oranı ve başarılı olma oranı da düşüktür, %50'si başarılı olamaz..." derken Katılımcı-9 "...arındırılmış şekilde bunun faydasını net hesaplamak her zaman mümkün değil..." demiştir. Katılımcı-3 "...şimdiye kadar bahsettiğim unsurlar genelde monitörizasyon ve dokümantasyonu iyileştirici unsurlardır ki bunların yatırımı çok çok düşük meblağlar. Herhangi bir geri dönüşünü bile hesaplamıyoruz..." derken bu tarz maliyetlerin harcama olmadığını, yatırım olarak görüldüğünü belirtmiş ve bu söylemi Katılımcı-1 de "...geri dönüş süresine bakarak yatırım yapmadık yapmıyoruz da. Bizim için bunun teknoloji kullanımında bir fayda vereceğini gördüğümüz an biz bu yatırımları yapıp teknolojik dönüşüm adımlarını atıyoruz..." sözleriyle desteklemiştir. Katılımcı-5

...hatta firmaların genelde şöyle bir yorumu oluyor, biz genelde 500bin TL verdik bir program satın aldık ya da bir süreç satın aldık. Şimdi bu 5 olan çalışan sayısını 2'ye düşürsün. Böyle bir hayalle giriyorlar ama bu böyle olmuyor, olmayacak da, olmamalı da zaten. Amaç zaten o programı alırken o insanları azaltmak olmamalı. O insanların başına düşen ya da birim başına düşen iş hacmini arttırmak olmalı..

diyerek asıl amacın ne olması gerektiğini vurgulamıştır.

Katılımcılara satın alma ve lojistik için ayrılan yatırım payı sorulduğunda;

- Katılımcı-1 "...satın alma tarafı için %1 civarında olabilir..." derken,
- Katılımcı-8 "...toplam senelik organizasyon maliyetim içerisinde %15'i sadece buralara, hem global hem de lokal anlamda yapacağımız gelişmeler ve çözümlere ayırdığımız paradır..." demiş,
- Katılımcı-7 "...%15-%20 civarı diye tahmin edebilirim..." ve
- Katılımcı-2 "...dediğim gibi ben %30 civarı bekliyorum yani satın alma artı lojistik..." şeklinde yorum yapmıştır.

Verilen yanıtlardan dördüncü sanayi devrimi adaptasyonu için yapılan bütçeden satın alma ve lojistik fonksiyonlarına ayrılan payın minimum %1 maksimum %30 oranında olduğu söylenebilir.

5. SONUÇ

Her gün yeni bir teknolojik gelişmeye uyandıığımız günümüz koşulları, insanlar gibi kurum ve işletmeler için de zorlayıcıdır. Arz artık, müşterilerin talep ve ihtiyaçları doğrultusunda ve kişiselleştirilmiş bir şekilde sunulmaktadır. Müşteriye en hızlı ve en doğru ürünü sağlamak için hayati rol oynayan tedarik zinciri yönetimi içindeki satın alma ve lojistik fonksiyonlarının yeni teknolojilere uyumu sağlanmalıdır. Böylece rekabet edebilen işletme, varlığını daha kolay sürdürebilecektir.

Bu çalışmada; Türkiye'deki sanayi işletmelerinin dördüncü sanayi devrimine bakış açıları, uygulayan işletmeler özelinde Endüstri 4.0 unsurlarını nasıl kullandıkları, adaptasyon süreçleri ve yaşadıkları zorluklarla birlikte yaptıkları yatırımın geri dönüşünün literatürle karşılaştırması yapılmış ve çıkan bulgular değerlendirilmiştir.

Yapılan görüşmeler sonucunda katılımcıların akademisyenlerin aksine dördüncü sanayi devrimi yerine endüstri 4.0 demeyi tercih etmeleri Almanya'nın yol haritasındaki ismin daha çok benimsendiğini göstermektedir. Dijital dönüşümü yıkıcı veya artımlı bir değişim süreci olarak tanımlayan Henriette ve diğerleri (2016: 3) gibi katılımcılar da dördüncü sanayi devrimini, dijital dönüşümden platforma giden yolculuk olarak tanımlamaktadır. Katılımcıların satın alma ve lojistik fonksiyonlarında en çok kullandıkları dördüncü sanayi devrimi unsurları sırasıyla; büyük veri ve bulut bilişim olarak tespit edilmiştir. Pflaum ve

diğerlerine (2018: 3924) göre bu tür bilgi teknoloji altyapıları sayesinde kuvvetli veri odaklı tedarik zinciri servisleri oluşmaktadır. Dolayısıyla gerçek zamanlı veri sağlayarak karar verme sürecini destekleyen büyük veri ve bulut bilişim satın alma ve lojistik fonksiyonlarının daha güçlü, daha bağımsız olmalarını sağlamaktadır. Dördüncü sanayi devrimi adaptasyonunun devamlılığı için yalın altı sigma kültürü ile uyumlu bir şekilde yapılması gerektiğini savunan Butt (2020: 16-20) stratejik dördüncü sanayi devrimi yol haritası aşamalarını; tanımlama, ölçme, değerlendirme, optimize etme, geliştirme, meşru kılma ve uygulama şeklinde sıralamıştır. Bununla bağlantılı olarak bu süreç işletme yapısına göre değişiklik gösterse de genel itibarıyla katılımcılar tarafından problemin tanımlanıp hedefin belirlenerek planlama/projelendirme yapılması, takımlar oluşturularak gerekli eğitimler ve yazılımlar alındıktan sonra uygulamaya başlanması şeklinde sıralanmıştır. Adaptasyon zorlu bir süreç olduğu için yönetim desteği hatta öncülüğü, mesai dışı çalışma ve kullanıcıların ikna edilmesi gerekmektedir. Ancak bu şekilde başarılı bir adaptasyon süreci geçirilebilir. Adaptasyon sonucunda yapılan yatırımların geri dönüş süresi işletme yapısına göre değişse de ortalama 5 sene olarak belirtilmiştir. KOBİ'lerin dördüncü sanayi devrimi unsurlarının faydalarına ikna olmamalarının nedenlerinden biri de teknolojinin yüksek yatırım maliyetleri ve geri dönüş oranı sorusudur (Pech ve Vrchota, 2020: 3). Ancak büyük işletmeler; geri dönüşü kolay hesaplanamayan bu bütçeleri harcama değil yatırım olarak gördükleri için adaptasyon sürecine daha hızlı girmektedirler.

Araştırmanın kısıtları: Nitel araştırma yöntemlerinden fenomenoloji seçilen bu çalışmada dijital dönüşüme başlayan sanayi işletmelerinde dijital dönüşüm takımlarında olan ve satın alma ve lojistik fonksiyonlarına hâkim yönetici ve yetkililerle görüşmelerin yapılması bu çalışmanın en büyük kısıtını oluşturmuştur. Covid-19 salgını ve sonrasında dışarı çıkma yasakları nedeniyle görüşmeler çevrimiçi yapılmış ve katılımcıların yoğunluğu nedeniyle ortalama 25 dakika süren görüşmeler üzerinden kodlama yapılabilmektedir. Salgın nedeniyle evden çalışan, hasta olduğu için karantinada olan katılımcı adayları ile görüşme sağlanamamış olması diğer bir kısıt olmuştur. Çalışmanın güçlü yanı ise, literatüre kapsamlı bir araştırma değerlendirmesi sunmasıdır.

Görüşmelerde satın alma ve lojistik dışında değinilen insan kaynakları, pazarlama gibi fonksiyonlarda dördüncü sanayi devrimi adaptasyonu ve devrimin etkilerinin incelenmesi gelecekte araştırılması mümkün konulardandır. Bu konuya ilgi duyan işletmeler içinde piyasayı, akademiyi ve rakiplerini takip ederek yenilikleri, teknolojik gelişmeleri araştırmak ve olumlu etkilerini işletmeye adapte etmek için bir birim oluşturulabilir. Ayrıca işletmeler insan kaynakları kuruluşları, danışmanlıklar ve eğitim kurumlarıyla işbirliği yaparak konu hakkında hem çalışanlarına eğitim verilmesini hem de ileride potansiyel çalışanı olacak yeni nesile staj ya da bilgilendirme toplantıları aracılığı ile ulaşmayı sağlayabilirler.

Çalışmanın sonucunda görülen o ki; Covid-19 pandemisi gibi ani gelişen ve öngörü yapılamayan bir dönemde bile büyük veri ve bulut bilişimle istenen raporlara ulaşılabilir, yatay dikey entegrasyon ve nesnelerin interneti (IoT) ile ürün takibi yapılabilir ve herhangi bir sorunda yeni aksiyon alınabilir, simülasyon ve artırılmış gerçeklik ile planlama yapılabilir, üç boyutlu yazıcı ile kritik parçalar üretilebilir, akıllı robotlar ile insanların çalışmadığı durumlar telafi edilebilir ve siber güvenlik ile işletmenin güvenliği sağlanabilir.

KAYNAKÇA

- Akaba T.I., Norta A., Udokwu C. ve Draheim D. (2020). "A Framework for the Adoption of Blockchain-Based e-Procurement Systems in the Public Sector", *Responsible Design, Implementation and Use of Information and Communication Technology* (I3E 2020), 3-14.
- Akyüz, A.G. (2019). "Tedarik Zinciri Yönetiminde Üç Boyutlu Baskı Teknolojisi: Potansiyel Etkiler, Fırsatlar ve Zorluklar", *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 20(2), 119-134.
- Alçın, S. (2016). "A New Theme for Production: Industry 4.0", *Journal of Life Economics*, 3(2), 19-30.
- Attaran, M. (2017). "The Rise of 3-D Printing: The Advantages of Additive Manufacturing Over Traditional Manufacturing", *Business Horizons*, 60(5), 677-688.
- Bag, S. Wood, L.C., Mangla, S.K. ve Luthra, S. (2020). "Procurement 4.0 and Its Implications on Business Process Performance in A Circular Economy", *Resources, Conservation and Recycling*, 152, 1-14.
- Baghçi, S., Buckley, S.J., Ettl, M. ve Lin, G.Y. (1998). "Experience Using The IBM Supply Chain Simulator", *Proceedings of The 1998 Winter Simulation Conference*, 1387-1394.
- Bakan İ. ve Şekeli Z. (2018). "Endüstri 4.0'ın Etkisiyle Lojistik 4.0", *Journal of Life Economics*, 5(2), 17-36.
- Ballou, R.H. (2007). "The Evolution and Future of Logistics and Supply Chain Management", *European Business Review*, 19(4), 332-348.
- Benedikt, C. ve Osborne, M. (2013). "The Future of Employment: How Susceptible are Jobs to Computerisation?", *Oxford Martin Programme on Technology and Employment*, 114, 1-77.
- Betti, Q. Montreuil, B., Khoury, R. ve Hallé, S. (2020). "Smart Contracts-Enabled Simulation for Hyperconnected Logistics", *Decentralised Internet of Things: A Blockchain Perspective*, Editörler: Khan, M.A., Quasim, M.T., Algarni, F., Abdullah A., 109-149.
- Bezanson, A. (1922). "The Early Use of the Term Industrial Revolution", *The Quarterly Journal of WEconomics*, 36(2), 343-349.
- Bogdan, B. ve Bilken, S.K. (1992). "Foundations of Qualitative Research in Education, Quality Research for Education: An Introduction to Theories and Methods, Allyn and Bacon, Boston.
- Börü, F. ve Demiröz, D.M. (2019). "Beşinci ve Altıncı Kondratieff Dalgalarının Teknolojik ve Sosyoekonomik Etkileri", *Istanbul İktisat Dergisi*, 69(2), 247-283.
- Brettel, M., Friederichsen, N., Keller, M. ve Rosenberg, M. (2014). "How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective", *International Journal of Information and Communication Engineering*, 8(1), 37-44.
- Britannica T. Editors of Encyclopaedia (2020). "Edmund Cartwright", Britannica, <https://www.britannica.com/biography/Edmund-Cartwright> (Erişim Tarihi: 31.01.2020).
- Butt, J. (2020). "A Strategic Roadmap for The Manufacturing Industry to Implement Industry 4.0", *Designs*, 4(2), 1-31.
- Cooper, M., Lambert, D. M. ve Pagh, J.D. (1997). "Supply Chain Management: More Than a New Name for Logistics", *The International Journal of Logistics Management*, 8(1), 1-14.
- CSCMP, (2021). "Supply Chain Management Definitions and Glossary", https://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx, (Erişim Tarihi: 06.03. 2021).
- Cumhuriyet, (2017), "Siber saldırı, Oyak Renault Bursa fabrikasında da üretimi durdurdu", <https://www.cumhuriyet.com.tr/haber/siber-saldiri-oyak-renault-bursa-fabrikasinda-da-uretimi-durdurdu-740429>, (Erişim Tarihi: 08.07.2021).
- Çallı, Ç. (2021), "Dördüncü Sanayi Devriminin Etkisindeki Sanayi İşletmelerinin Satın Alma ve Lojistik Fonksiyonlarına Yönelik Bir Araştırma", Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir.
- Çiçekli, S. (2018). "Sanayi 4.0'ın Lojistik Sektörüne Etkileri, Kalkınmada Anahtar Verimlilik", <https://anahtar.sanayi.gov.tr/tr/news/sanayi-4-0in-lojistik-sektorune-etkileri/9635>, (Erişim Tarihi: 15.02.2020).
- Çubukçu, M. (2020). "İşletmelerde Bilgi Yönetiminin Stratejik Önemi ve Uygulamada OLAP Modelleri", *SSAD Stratejik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 4(1), 57-89.
- Da Costa Soares, T.F. (2021). "Vehicle Tracking in Warehouses via Bluetooth Beacon Angle-of-Arrival, Yüksek Lisans Tezi, Universidade do Porto Faculdade de Engenharia, Porto.
- Davies, R., Coole, T. ve Smith, A. (2017). "Review of Socio-Technical Considerations to Ensure Successful Implementation of Industry 4.0", *Procedia Manufacturing*, 11, 1288-1295.

- Denning, S. (2017). "From a Casino Economy to a New Golden Age: Carlota Pérez At Drucker Forum 2017", *Forbes*, <https://www.forbes.com/sites/stevedenning/2017/11/25/from-a-casino-economy-to-a-new-golden-age-carlota-perez-at-drucker-forum-2017/?sh=5d90c673b4ed>. (Erişim tarihi: 05.02.2020).
- Denzin, N.K. ve Lincoln, Y.S. (2008). "The Landscape of Qualitative Research", Sage Publications, California.
- Dev, N.K., Shankar, R. ve Qaiser, F.H. (2020). "Industry 4.0 and Circular Economy: Operational Excellence for Sustainable Reverse Supply Chain Performance", *Resources, Conservation and Recycling*, 153 (Ocak 2019), 1-15.
- Dong, H.J., Abdulla, R., Selvaperumal, S.K., Duraikannan, S., Lakshmanan, R. ve Abbas, M.K. (2019). "Interactive on Smart Classroom System Using Beacon Technology", *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 9(5), 4250-4257.
- Fırat, S.U. ve Fırat, O.Z. (2017). "Endüstri 4.0 Yolculuğunda Trendler ve Robotlar", *İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi*, 46(2), 211-223.
- Genç, S. (2018). "Sanayi 4.0 Yolunda Türkiye", *Sosyoekonomi*, 26(36), 235-243.
- Ginters, E. ve Martin-Gutierrez, J. (2013). "Low Cost Augmented Reality and RFID Application for Logistics Items Visualization", *Procedia Computer Science*, 26, 3-13.
- Glas, A.H. ve Kleemann, F.C. (2016). "The Impact of Industry 4.0 on Procurement and Supply Management: A Conceptual and Qualitative Analysis", *International Journal of Business and Management Invention*, 5(6), 55-66.
- Glavee-Geo, R. (2015). "The History and Development of Purchasing Management and Its Theoretical Framework A Review of Transaction Cost Economics", *Handbook of Research on Global Supply Chain Management* (ss 379-401), Business Science Reference, Hershey, PA.
- Gökten, D.P.O. (2018). "Karanlıkta Üretim: Yeni Çağda Maliyetin Kapsamı", *Muhasebe Bilim Dünyası Dergisi*, 20(4), 880-897.
- GTAI (2013). "Industrie 4.0 Smart Manufacturing for The Future", <https://www.gtai.de/gtai-en/invest/industries/industrie-4-0>, (Erişim Tarihi: 18.02.2020).
- Gunasekaran, A., Papadopoulos, T., Dubey, R., Wamba, S.F., Childe, S.J., Hazen, B. ve Akter, S. (2017). "Big Data and Predictive Analytics for Supply Chain and Organizational Performance", *Journal of Business Research*, 70, 308-317.
- Gundlach, G.T., Bolumole, Y.A., Eltantawy, R.A. ve Frankel, R. (2006). "The Changing Landscape of Supply Chain Management, Marketing Channels of Distribution, Logistics and Purchasing", *Journal of Business and Industrial Marketing*, 21(7), 428-438.
- Günay, D. (2002). "Sanayi ve Sanayi Tarihi", *Mimar ve Mühendis Dergisi*, 31, 8-14.
- Henriette, E., Feki, M. ve Boughzala, I. (2016). "Digital Transformation Challenges", *Tenth Mediterranean Conference on Information Systems (MCIS)*, 1-7.
- IBM (2020). "X-Force Tehdit İstihbaratı Endeksi", <https://www.ibm.com/downloads/cas/A4L7A60P>, (Erişim tarihi:12.05.2021).
- IBM (2021). "IBM X-Force Threat Intelligence Index", <https://www.ibm.com/tr-tr/security/data-breach/threat-intelligence>, (Erişim tarihi:12.05.2021).
- Ivanov, D., Dolgui, A. ve Sokolov, B. (2018). "The impact of Digital Technology and Industry 4.0 on the Ripple Effect and Supply Chain Risk Analytics", *International Journal of Production Research*, 57(3), 829-846.
- Ji-Fan Ren, S., Fosso Wamba, S., Akter, S., Dubey, R. ve Childe, S.J. (2017). "Modelling Quality Dynamics, Business Value and Firm Performance in a Big Data Analytics Environment", *International Journal of Production Research*, 55(17), 5011-5026.
- Kagermann, H., Wahlster, W. ve Helbig, J. (2013). "Securing The Future of German Manufacturing Industry: Recommendations for Implementing The Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0", *Final Report of the Industrie 4.0 Working Group.4(0)*.
- Kağınçoğlu, C.H. (2007). "Tedarik Zinciri Yönetiminde Tedarikçi Seçimi", T.C. Anadolu Üniversitesi Yayınları, Eskişehir.
- Kamble, S.S., Gunasekaran, A. ve Gawankar, S. A. (2018). "Sustainable Industry 4.0 Framework: A Systematic Literature Review Identifying The Current Trends and Future Perspectives", *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 408-425.
- Kaya, Ş. (2017). "Aşamalı Devrimler Teorisi", *Hürriyet Gazetesi*, <https://www.hurriyet.com.tr/yazarlar/sahver-kaya/asamali-devrimler-teorisi-40550313>, (Erişim tarihi: 04.02.2020).
- Keow, A.K.S. ve Nee, A.Y.H. (2018). "Robotics in Supply Chain. Emerging Technologies for Supply Chain Management", WouPress, California.

- Khuan, L.S. ve Swee, F.S.H. (2018). "Technologies for Procurement: Current Trends and Emerging Trends, Important Emerging Technologies for Supply Chain Management", WOU Press, Penang.
- Kılıç, S. ve Alkan, R.M. (2018). "Dördüncü Sanayi Devrimi Endüstri 4.0: Dünya ve Türkiye Değerlendirmeleri", *Girişimcilik İnovasyon ve Pazarlama Araştırmaları Dergisi*, 2(3), 29-49.
- Kıral, B. (2020). "Nitel Bir Veri Analizi Yöntemi Olarak Doküman Analizi". *Siirt Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*. 8(15), 170-189.
- Klein, M. (2020). "İşletmelerin Dijital Dönüşüm Senaryoları- Kavramsal Bir Model Önerisi", *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*, 194(7), 997-1019.
- Koç, E., Kaya, K. ve Şenel, M.C. (2017). "Türkiye'de Sanayi Sektörü ve Temel Sanayi Göstergeleri – Ekonomik Güven Endeksi", *Engineer and Machinery* 58(688), 15-37.
- Krug, R., Stoyanov, T., Tincani, V., Andreasson, H., Mosberger, R., Fantoni, G. ve Lilienthal, A.J. (2016). "The Next Step in Robot Commissioning: Autonomous Picking and Palletizing", *IEEE Robotics and Automation Letters*, 1(1): 546-553.
- Küpper, D., Kuhlmann, K., Köcher, S., Dauner, T. ve Burggraaff, P. (2016). "TheFactory of Future", BCG. <https://www.bcg.com/publications/2016/learning-manufacturing-operations-factory-of-future> (Erişim tarihi:10.03.2021).
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.G., Feld, T. ve Hoffmann, M. (2014). "Industry 4.0.", *Business and Information Systems Engineering*, 6(4), 239–242.
- Lee, C., Lv, Y., Ng, K.H., Ho, W. ve Choy, K.L. (2018). "Design and Application of Internet of Things Based Warehouse Management System for Smart Logistics", *International Journal of Production Research*, 56(8), 2753-2768.
- Liotine, M. (2019). "Shaping the Next Generation Pharmaceutical Supply Chain Control Tower with Autonomous Intelligence", *Journal of Autonomous Intelligence*, 2(1), 56-71.
- Lou, P., Liu, Q., Zhou, Z. ve Wang, H. (2011). "Agile Supply Chain Management Over The Internet of Things", *International Conference on Management and Service Science*.
- Lu, Y. (2017). "Industry 4.0: A Survey on Technologies, Applications and Open Research Issues", *Journal of Industrial Information Integration*, 6, 1-10.
- Maurer, C., Kim, K., Kim, D. ve Kappelman, L.A. (2021). "Cybersecurity: Is It Worse Than We Think?", *Communications of the ACM*, 64(2), 28-30.
- Menon, S., Shah, S. ve Coutroubis, A. (2018). "Competitive and Digital Global Supply Chains", *2018 IEEE International Conference on Technology Management, Operations and Decisions (ICTMOD)*, 178-183.
- Merlino, M. ve Sproge, I. (2017). "The Augmented Supply Chain", *Procedia Engineering*, 178, 308-318.
- Microsoft (2021). "What is azure?", <https://azure.microsoft.com/tr-tr/overview/what-is-azure/> (Erişim tarihi:17.07.2021).
- Mokyr, J. (1999). "The Second Industrial Revolution, 1870-1914", *Storiadell'economia Mondiale*, 219-245.
- Monostori, L., Kádár, B., Bauernhansl, T., Kondoh, S., Kumara, S., Reinhart, G., Sauer, O., Schuh, G., Sihn, W. ve Ueda, K. (2016). "Cyber-Physical Systems in Manufacturing", *CIRP Annals*, 65(2), 621-641.
- Mrugalska, B. ve Wyrwicka, M.K. (2017). "Towards Lean Production in Industry 4.0", *Procedia Engineering*, 182, 466-473.
- Oesterreich, T.D. ve Teuteberg, F.R. (2016). "Understanding The Implications of Digitisation and Automation in The Context of Industry 4.0: A Triangulation Approach and Elements of A Research Agenda for The Construction Industry", *Computers in Industry*, 83, 121-139.
- Okada, T., Sato, H. ve Namatame, A. (2016). "An Agent-Based Model of Smart Supply Chain Networks", *Intelligent and Evolutionary Systems*, 5, 373-384.
- Özdemir, A. ve Özgüner, M. (2018). "Endüstri 4.0 ve Lojistik Sektörüne Etkileri: Lojistik 4.0", *İşletme ve İktisat Çalışmaları Dergisi*, 6(4), 39-47.
- Özkan, M., Al, A. ve Yavuz, S. (2018). "Uluslararası Politik Ekonomi Açısından Dördüncü Sanayi-Endüstri Devrimi'nin Etkileri ve Türkiye", *Siyasal Bilimler Dergisi*, 6(2)1-30.
- Öztürk, M.G., Köseoglu, A. M. ve Zorlu, G. H. (2018). "Inventory Control Methods in Companiesby Using Industry 4.0", *Pressademia*, 7(1), 348-351.
- Patel, B.D., Chauhan, A., Mishra, S. ve Jain, S. (2019). "Procurement Optimization In I4.0 Environment- A Review", *Pramana Research Journal*, 9(1), 21-27.
- Pech, M. ve Vrchota, J. (2020). "Classification of Small and Medium Sized Enterprises Based on the Level of Industry 4.0 Implementation", *Applied Sciences*, 10(15), 5150.

- Pellengahr, K., Schulte, A.T., Richard, J. ve Berg, M. (2016). "Pilot Study on Procurement 4.0 – *The Digitalisation of Procurement*", https://www.iml.fraunhofer.de/de/abteilungen/b2/einkauf_finanzen_supply_chain_management/dienstleistungen/procurement-engineering/einkauf-4-0.html, (Erişim tarihi:21.08.2019).
- Perboli, G., Musso, S. ve Rosano, M. (2018). "Blockchain in Logistics and Supply Chain: A Lean Approach for Designing Real-World Use Cases", *IEEE Access*, 6, 62018-62028.
- Perez, C. (2009). "Technological Revolutions and Techno-Economic Paradigms", *Governance An International Journal Of PolicyAnd Administration*, 20, 1-26.
- Perez, C. (2011). "Finance and Technical Change: A Long-TermView", *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*, 3(1), 10-35.
- Perez, C. (2012). "Technological Revolutions and The Role of Government in Unleashing Golden Ages", *Journal of Globalization Studies*, 3(2), 211-218.
- Pflaum, A., Prockl, G., Bodendorf, F. ve Chen, H. (2018). "The Digital Supply Chain of the Future: From Drivers to Technologies and Applications. Minitrack Introduction", *Proceedings of the 51st Hawaii International Conference on System Sciences 2018*. 3924-3925.
- Prasse, C., Nettstraeter, A. ve Hompel, M.T. (2014). "How IoT Will Change The Design and Operation of Logistics Systems", *2014 International Conference on The Internet of Things, IOT 2014*, 55-60.
- Ramingwong, S., Ramingwong, L., Thaiupathump, T. ve Chompu-Inwai, R. (2021). "Readiness Model for Integration of ICT and CPS for SMEs Smart Logistics", *Implementing Industry 4.0 in SMEs*, PalgraveMacmillan UK, Londra, 187-209.
- Saatçioğlu, Ö.Y., Kök, G. ve Özispa, N. (2018). "Endüstri 4.0 ve Lojistik Sektörüne Yansımalarının Örnek Olay Kapsamında Değerlendirilmesi", *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 23, 1675-1696.
- Sağıroğlu, C. (2018). "Üretimde Dijital Dönüşüm", *Bilim, Teknoloji ve Yenilik Politikaları Daire Başkanlığı*, <https://dijitalakademi.bilgem.tubitak.gov.tr/wp-content/uploads/2018/01/EPID-BS-UretimdeDijitalDonusum.pdf>. (Erişim tarihi: 22.03.2021).
- Sauer, P.C., Orzes, G. ve Davi, L. (2021). "Toward SME 4.0: TheImpact of Industry 4.0 Technologies on SMEs' Business Models", *Implementing Industry 4.0 in SMEs*, PalgraveMacmillan UK, Londra, 293-343.
- Schuh, G., Potente, T., Wesch-Potente, C., Weber, A.R. ve Prote, J.P. (2014). "Collaboration Mechanisms to Increase Productivity in The Context of Industrie 4.0", *Procedia CIRP*. 19(C), 51-56.
- Schwab, K. (2017). "Dördüncü Sanayi Devrimi", Çev. Zülfü Dicleli, Optimist, İstanbul.
- Shafiq, S.I., Sanin, C., Szczerbicki, E. ve Toro, C. (2015). "Virtual Engineering Object / Virtual Engineering Process: A specialized Form of Cyber Physical System for Industrie 4.0", *Procedia -Procedia Computer Science*. 60, 1146-1155.
- Soyak, A. (2017). "Teknolojiye Dayalı Sanayileşme: Sanayi 4.0 ve Türkiye Üzerine Düşünceler", *Marmara Sosyal Araştırma Dergisi*, 11(Ağustos), 68-83.
- Soylu, A. (2018). "Endüstri 4.0 ve Girişimcilikte Yeni Yaklaşımlar", *Pamukkale University Journal of Social Sciences Institute*, 32, 43-57.
- Stăncioiu, A. (2017). "The Fourth Industrial Revolution Industry 4.0", *Fiabilitateşi Durabilitate*, 1(19), 74-78.
- Straka, M., Khouri, S., Lenort, R. ve Besta, P. (2020). "Improvement of Logistics In Manufacturing System By The Use Of Simulation Modelling: A Real Industrial Case Study", *Advances in Production Engineering and Management*, 15(1), 18-30.
- Suvacı, B. (2016). "Sosyal Bilimler Veri Tabanında Yayımlanan Lojistik ve Tedarik Zinciri Makalelerinin Bibliyometrik Profili", *Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 3(25), 263-281.
- Szozda, N. (2017). "Industry 4.0 and Its Impact on The Functioning of Supply Chains", *Scientific Journal of Logistics*, 13(4), 401-414.
- Şahin, S. (2004). "Satın Alma ve Risk Yönetiminin Tedarik Zinciri Yönetimindeki Yeri", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tanyaş, B. (2014). "Nitel Araştırma Yöntemlerine Giriş: Genel İlkeler ve Psikolojideki Uygulamaları", *Eleştirel Psikoloji Bülteni*, 5, 25-38.
- Taşkın, K. ve Çallı, L. (2015). "3D Yazıcı Endüstrisinin Oluşturacağı Yeni Pazarlar ve Pazarlama Uygulamaları", *ICEB 2015*: 1-12.
- TDK (2020). Güncel Sözlük, <https://sozluk.gov.tr/>. (Erişim tarihi: 08.02.2020).
- TDK (2021). Güncel Sözlük. <https://sozluk.gov.tr/>. (Erişim tarihi: 13.03. 2021).

- Tekin, Z. (2018). "The Examination of Applications of Industry 4.0 in Enterprises by Content Analysis Method", *Pressacademia*, 7(44), 251-255.
- Tung, C.M. (2018). "Vertical Integration for Smart Manufacturing – The Dynamic Capability Perspective", *Journal of Advances in Technology and Engineering Research*, 4(2), 70-78.
- Tutar, H., Terzi, D. ve Tınmaz, G. (2018). "Türkiye'nin Vizyon 2023 Stratejisi ile Almanya'nın "2025" Strateji Hedeflerinin Endüstri 4.0 Göstergeler İtibarıyla Karşılaştırılması", *International Journal of Entrepreneurship and Management Inquiries*, 2(3), 195-212.
- TÜİK (2020a). "Cinsiyete ve Ekonomik Faaliyetlere Göre İstihdamın Yüzde Dağılımı, 2014-2019", <https://data.tuik.gov.tr/Search/Search?text=istihdam>, (Erişim tarihi:10.02.2020).
- TÜİK (2021). "Gayri Safi Yurtiçi Hasıla", <https://www.sbb.gov.tr/temel-ekonomik-gostergeler/#1594716589132-d3a64e97-2238>, (Erişim tarihi:15.03.2021).
- Türker, M., Balyemez, F. ve Biçer, A. A. (2005). "Üretim Sürecinde Tedarik Zincirinin Önemi ve Maliyet Yönetimi", *V. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu*, 459-465.
- TÜSİAD ve BCG (2016). "Türkiye'nin Küresel Rekabetçiliği için Bir Gereklik Olarak Sanayi 4.0", <http://www.tusiad.org/indir/2016/sanayi-40.pdf> (Erişim tarihi:30.01.2020).
- Van Weele, A. J. (2009). "Purchasing and Supply Chain Management: Analysis, Strategy", *Planning and Practice*, Cengage Learning EMEA, Hampshire.
- Viale, L. ve Zouari, D. (2020). "Impact of Digitalization on Procurement: The Case of Robotic Process Automation", *Supply Chain Forum*, 21(3), 185-195.
- Wamba, S. F. ve Queiroz, M. M. (2020). "Industry 4.0 and The Supply Chain Digitalisation: A Blockchain Diffusion Perspective", *Production Planning & Control*, 0(0), 1-18.
- Wegner, A., Graham, J. ve Ribble, E. (2017). "A New Approach to Cyber Physical Security in Industry 4.0", *Cyber Security for Industry 4.0*, Editörler: Thames L., Schaefer D., Springer Cham., 59-72.
- Xie, Y., Yin, Y., Xue, W., Shi, H. ve Chong, D. (2020). "Intelligent Supply Chain Performance Measurement in Industry 4.0." *Systems Research and Behavioral Science*. 37(4), 711-718.
- Xu, L. Da Xu, E.L. ve Li, L. (2018). "Industry 4.0: State of The Art and Future Trends", *International Journal of Production Research*, 56(8), 2941-2962.
- Yavuz, A. (2005). "Tedarik Zinciri Yönetiminde Simülasyon Kullanımı", *Mustafa Kemal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 2(3), 1-9.
- Yılmaz, Ü. ve Duman, B. (2019a). "Artırılmış Gerçeklik Teknolojisinin Lojistik Faaliyetleri Üzerine Olan Etkilerinin İncelenmesi", *International Journal of Human Studies*, 2(3), 1-7.
- Yılmaz, Ü. ve Duman, B. (2019b). "Lojistik 4.0 Kavramına Genel Bir Bakış: Geçmişten Bugüne Gelişim ve Değişimi", *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 4(1), 186-200.
- Zander, B., Lange, K. ve Haasis, H. (2020). "Impacts of a Smart Factory on Procurement Logistics", *Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics*, 459-485.
- Zhang, Z. Li, X., Wang, X. ve Cheng, H. (2017). "Decentralized Cyber-Physical Systems: A Paradigm for Cloud-Based Smart Factory of Industry 4.0. Cyber Security for Industry 4.0 Analysis for Design and Manufacturing", Springer International Publishing AG., Birmingham, 127-172.

İŞLETMELER İÇİN YENİ BİR VERİMLİLİK TEKNOLOJİSİ: DİJİTAL İKİZ

Meral ÇALIŞ DUMAN¹

ÖZET

Amaç: Bu makalenin amacı, Endüstri 4.0 ile önemi artan dijital ikiz kavramının yeri, önemi, verimliliği ve gelecekteki potansiyelini anlamak, diğer çalışmalar için temel oluşturmak adına literatüre katkı sağlamaktır.

Yöntem: Bu çalışmanın yöntemi literatür taramasıdır. Dijital ikiz ve işletmelerde kullanımı ile ilgili en güncel makaleler, bildiriler, gazete ve internet haberlerine dair örnek uygulamalar incelenerek, konu ile ilgili derinlemesine bir derleme makale çalışması yapılmıştır.

Bulgular: Değerlendirme sonuçlarına göre, dijital ikiz teknolojisi işletmeler için bir çözüm yoludur. Dijital ikiz teknolojisinin katkısı ile siber fiziksel sistemler ve nesnelerin interneti başta olmak üzere Endüstri 4.0 teknolojileri daha etkin kullanılabilir. Dijital ikiz, esnek, daha hızlı, kaliteli ve kişiselleştirilmiş ürünler elde edilmesine yardımcı olmaktadır. İşletmelerin tahmin etme, güvenlik, teşhis etme ve mevcut durumu sorgulamasında önemli avantaj sağlayan dijital ikizler, karar vermede isabet gücünü, ürün ve hizmetlerde kaliteyi, operasyonel faaliyetlerde hızı artırarak, toplamda işletme verimliliğini ve örgütsel performansı iyileştirip işletmelerin rekabet gücünü artırmaktadır.

Özgünlük: Dijital ikiz kavramının yeni ortaya çıkmasına bağlı olarak literatürde önemli bir boşluk bulunmaktadır. Bu nedenle makale, dijital ikiz hakkında bilgi veren, üretimde faydaları ve uygulamaları üzerine odaklanan ilk yerli çalışmalar arasındadır.

Anahtar Kelimeler: Dijital İkiz, Endüstri 4.0, Nesnelerin İnterneti, Simülasyon, Verimlilik.

JEL Kodları: M10, M11, M21, L25.

A NEW PRODUCTIVITY TECHNOLOGY FOR BUSINESS: DIGITAL TWIN

ABSTRACT

Purpose: The aim of this article, to understand the place, importance, efficiency and future potential of the digital twin concept, which has increased in importance with Industry 4.0, and to contribute to the literature in order to form the basis for other studies.

Methodology: The method of this study is literature review. An in-depth review article study was conducted by examining the latest articles, proceedings, sample applications of newspaper and internet news about the digital twin and its use in businesses.

Findings: According to the evaluation results, digital twin technology is a solution for businesses. With the contribution of digital twin technology, Industry 4.0 technologies, especially cyber physical systems and internet of things, can be used more effectively. Digital twin helps to obtain flexible, faster, quality and personalized products. Digital twins, which provide significant advantages in forecasting, security, diagnosis and questioning of the current situation, increase the power of accuracy in decision making, quality in products and services, speed in operational activities, improving overall operational efficiency and organizational performance and increasing the competitiveness of enterprises.

Originality: There is an important gap in the literature due to the new emergence of the digital twin concept. For this reason, the article is among the first domestic studies that provide information about the digital twin and focus on its benefits and applications in production.

Keywords: Digital Twin, Industry 4.0, Internet of Things, Simulation, Efficiency.

JEL Codes: M10, M11, M21, L25.

¹ Dr. Öğretim Üyesi, Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Akçadağ Meslek Yüksekokulu, Yönetim ve Organizasyon Bölümü, Malatya, Türkiye, meral.duman@ozal.edu.tr, ORCID: 0000-0002-8283-5188.

1. GİRİŞ

Son zamanlarda büyük veri, yapay zekâ, blok zinciri, nesnelerin interneti, dijital ikiz gibi yeni teknolojiler hızla gelişirken, akıllı işletmeler, kripto paralar, otonom araçlar ve sürdürülebilirlik gibi yeni kavramlara da ilgi artmaktadır (Deng ve diğerleri, 2021) ve tüm dünya Endüstri 4.0 vizyonu ile büyük bir dönüşüme girmektedir. Bu dönüşüme ayak uydurmak için eğitim, savunma ve üretim gibi alanlarda önemli değişimler yaşanmaktadır. Özellikle sanayi ve üretim sektörü en çok değişen ve dönüşen sektörler arasındadır. Nitekim Endüstri 4.0, sanayinin akıllı hale dönüşmesi (Faller ve Feldmüller, 2015) veya üretimde bilgi ve iletişim teknolojilerinin entegrasyonunun artması (Basl, 2016) şeklinde tanımlanmaktadır.

Üretim sektörü, Endüstri 4.0 olarak bilinen dördüncü sanayi devriminin çatısı altında hızla dönüşmektedir. İşletmeler bu dönüşümü yakalayabilmek için Endüstri 4.0 teknolojilerini kullanmaya başlamaktadır. Bu teknolojilerden elde edilen veriler sayesinde gerçek zamanlı izleme, tahmin, karar verme ve adaptasyon gibi stratejik kararlar alınmaktadır. Bu sayede işletmeler için kısa ürün geliştirme süresi, talebe göre ürün bireyselleştirme, üretim hattının esnekliğinin artırılması, ademi merkezîyetçilik ve kaynak verimliliği gibi sonuçlar elde etmektedir. Yaşanan bu gelişmeler ile üretim sektörü tüketicilerin beklentileri ve sorunları için bir çözüm sağlayıcı haline dönüşmektedir (Zhu ve diğerleri, 2021). Değişen üretim anlayışı işletmeleri önceden olduğu gibi sadece yalın olmaya değil hem yalın hem de çevik olmaya itmektir. Verinin ve bilginin petrol değerinde olduğu günümüzde, verilerden anlamlı bilgiler elde etmek ve bunu yaparken de hızlı ve verimli olmak gerekmektedir. Verilerin anlamlı hale dönüştürülmesi, karar süreçlerinde ve üretim süreçlerinde bu bilgilerden faydalanılması daha kaliteli bir üretim sürecini ortaya çıkararak işletmeler için önemli bir rekabet unsuru olmuştur (Apillioğulları, 2019: 27). Bu açıdan dijital ikiz ve siber-fiziksel sistemler (SFS) akıllı üretimde ürün tasarımı, bilgi odaklı üretim, isteğe bağlı hizmetler ve iş uygulamaları üzerinde gelecek vaat eden, katma değer sağlayan ve gittikçe kullanma eğilimi artan iki teknolojidir (Lee ve diğerleri, 2021: 87). Hatta dijital ikiz Deng ve diğerlerine (2021) göre dijital dönüşümün kaçınılmaz hedefidir.

Dijital ikiz, akıllı üretim ve Endüstri 4.0'ı gerçekleştirmek için en umut verici teknolojilerden biridir. Bu teknoloji bazen geleneksel modelleme ve simülasyon ile karıştırılabilmektedir. Bu noktada denilebilir ki dijital ikiz, diğer teknolojilerden farklı olarak fiziksel ve sanal entegrasyonu yüksek, gerçek zamanlı veriler ile etkileşim kuran süreç ve hizmetlerin dinamik sanal bir modeldir. Literatürde henüz dijital ikizin yüksek kaliteli bir uygulaması bulunmamaktadır (Singh ve diğerleri, 2021). Çünkü Zheng ve diğerleri (2019) dijital ikiz teknolojisinin kullanımının zor olduğunu, yüksek hassasiyetli simülasyon modellerine sahip olunması gerektiğini ve uygulamalar için sanal test modellerinin ve model belirsizlik hesaplamasının yetersiz olduğunu, karmaşık sistemlerin tahmin hassasiyetinin düşük olduğunu ve son olarak veri toplama ve işlemenin karmaşık olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan araştırmalara bakıldığında, dijital ikiz uygulaması bağlamında, araştırmacılar sıklıkla SFS, büyük veri veya nesnelerin interneti (Nİ) kullanımını araştırmışlardır (Tao ve diğerleri, 2019; Singh ve diğerleri, 2021). Halbuki Endüstri 4.0 içinde barındırdığı teknolojik bileşenlerin toplamından oluşmaktadır. Tam anlamıyla Endüstri 4.0'a geçiş birçok teknolojinin kullanılması ve teknolojilerin işletme süreçlerine entegre edilmesi ile mümkündür (Meissner ve diğerleri, 2017). Özellikle siber fiziksel sistemler, nesnelerin interneti, büyük veri, dijital ikiz gibi teknolojiler Endüstri 4.0 için vazgeçilmezdir (Schwab, 2016: 76).

İşletmeler açısından uygulamalara bakıldığında bu teknolojilerin ayrı ayrı veya birkaçının bir arada değerlendirilmesi ve uygulanmasından dolayı (Faller ve Feldmüller, 2015) dijital ikizin tam manası ile uygulanmadığı görülmektedir. Bu konuda özellikle işletmelerin karar destek sistemlerine ve yapay zekâ uygulamalarına fazla önem vermemesi de dijital ikizin uygulanamamasına neden olabilmektedir. Yöneticilerin karar verme aşamasında karara esas teşkil edecek bilgilere ulaşımı büyük önem arz etmektedir. Bu noktada yöneticilere ilk önce bilginin organize edilmesi ve sonuçların modellenmesi konusunda destek olan bilgisayar tabanlı bir sistem olan karar destek sistemlerinin (Dönerçark ve Tecim, 2020) uygulanması tavsiye edilebilir.

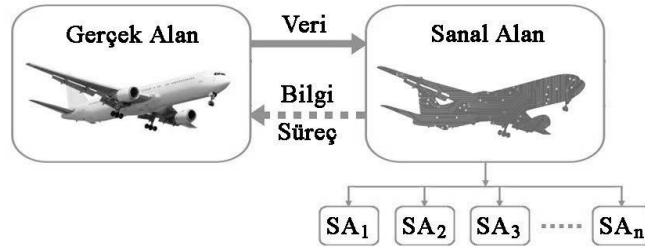
Bu bağlamda, işletmelerin gerçek zamanlı verilerinin elde edilmesi ve kullanılması, üretimde önemli bir avantajdır. Elde edilen gerçek zamanlı veriler dijital ikizlerin ortaya çıkmasının ilk koşuludur. Bu kısımda en iyi sonuçların elde edilmesi için fiziksel ve sanal dünya entegrasyonunun gerçek zamanlı, senkronize ve tutarlı olması gerekmektedir. Ancak işletmelere bakıldığında temel süreç verileri genellikle yanlış, eksik, tutarlı ve gerçek zamanlı değildir. Üretim süreçleri genellikle fazladan sipariş ekleme, görev değişimleri, zamanlama ayarları ve araç gereç arızaları nedeniyle tutarlılık göstermemektedir. Düzenli ve çevik bir üretim oluşturmak için mevcut tüm bilgileri organize etmek ve kullanmak büyük bir zorluktur (Zhang ve diğerleri, 2021). Çünkü veriler doğru ve tutarlı bir şekilde elde edilmediğinde dijital ikizi kullanmak zordur. Bu nedenle uygulamada dijital ikiz sonuçlarını görmek halen oldukça kısıtlıdır ve yerli literatürde dijital ikizle ilgili önemli bir boşluk bulunmaktadır. Ülkemizde verimlilik ve dijital ikiz ilişkisine odaklanan veriye dayalı herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Kapsamlı bir literatür araştırmasına dayanan bu çalışma, dijital ikiz

kavramının teorik altyapısı, dijital ikiz teknolojisinin uygulanması, işletmelerde dijital ikiz uygulamaları ve bu uygulamalara bağlı olarak elde edilen verimlilik ve faydalara dair özgün bir çalışma sunmaktadır. Çalışma özellikle dijital ikizin anlaşılması, daha doğru kullanımı ve verimlilikle olan ilişkisi adına araştırmacılara önemli bir kaynak oluşturmaktadır. İşletmelerin dijital ikiz teknolojisini kullanarak verimliliklerini artırmaya çalışmaları teorik kanıtlar sunan bu araştırmanın, araştırmacıların ve uygulayıcıların dijital ikizi anlaması ve benimsemesi açısından önem taşıdığı düşünülmektedir. Bu doğrultuda çalışmanın amacı, dijital ikiz ile ilgili farklı katkıların sınıflandırılmasıyla birlikte bir literatür taramasıdır. Buna göre çalışma içerisinde, ilk önce dijital ikiz kavramı ve genel çerçevesi üzerinde durulacak, daha sonra dijital ikiz teknolojisi ve üretim sektöründe kullanımı üzerine bilgi verilecektir. Özellikle işletmelerin verimliliğini artırma noktasında önemli bir avantaj sağlayan bu teknolojiye dair farkındalığı artırmak hem akademik hem de sanayide diğer araştırmaları teşvik etmek ise bu çalışmanın hedefidir.

2. DİJİTAL İKİZ KAVRAMI

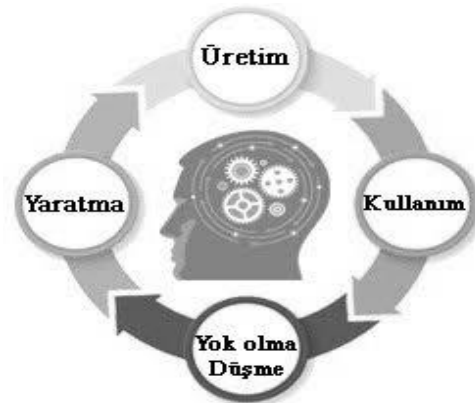
İkiz, ilk olarak 2003 yılında ürün yaşam döngüsü yönetimi konseptinin bir parçası olarak Grieves tarafından ortaya atılmıştır (Grieves, 2014). Bu kavram, ürün yaşam döngüsü yönetimi için bir “kavramsal ideal”i temsil etmiştir. Daha sonra Grieves, 2006 yılında “Bilgi Yansıtma Modeli” terimini denedikten sonra 2010 yılında “Dijital İkiz” terimini kullanmıştır. Sonunda dijital ikiz konsepti, bir ürün yaşam döngüsü yönetim aracı olmaktan çıkıp dijital bir platforma dönüşmüştür (Kahlen ve diğerleri, 2017). Bu evrimsel yol, kavramın iki ana özelliğiyle sonuçlanmıştır. Birincisi tam ürün yaşam döngüsü entegrasyonu, ikincisi ise bilişsel teknolojiler aracılığıyla güncel dinamik veri üretimi ve yönetimidir (Öztürk, 2021). Grieves'a (2019) göre, Şekil 1'de görüldüğü üzere, dijital ikizin kavramsal modeli üç ana bölümden oluşmaktadır (Shengli, 2021);

- Fiziksel dünyada fiziksel ürün;
- Siber dünyada fiziksel ürünün sanal karşılığı;
- Fiziksel alan ve siber alan arasındaki veri ve bilgi etkileşimi.



Şekil 1. Ürün Yaşam döngüsü yönetimi (ÜYDY) için kavramsal ideal (Grieves ve Vickers, 2017: 93, yazar tarafından geliştirilmiştir)

Kavramsal idealde, Grieves (2016) iki sistemin tüm yaşam döngüsü boyunca birbirine bağlanacağını belirtmiştir. Buna göre ürün yaşam döngüsü Şekil 2'de görüldüğü üzere, sistemin yaratılması dâhil olmak üzere, üretim, operasyon/kullanım ve yok olma üzere dört aşamadan geçerken sanal ve gerçek sistemler birbirine bağlı olacaktır. Dijital ikizlerin başarılı olabilmesi için bu sistem ve cihazların kullanıcıları için değer yaratması gerekecektir. “Kullanım durumları” olarak tanımlanan bu değer, değer yaratan belirli bir kullanımın ana hatlarını çizmektedir (Grieves, 2019).



Şekil 2. Ürün yaşam döngüsünün 4 aşaması (Grieves, 2019, yazar tarafından geliştirilmiştir)

ÜYDY, üretim sürecinin planlama aşamasından yok olma aşamasına kadar geçen süredeki etkili bir yönetme faaliyetidir. ÜYDY, tüm üretim sürecinde uygulama, insan, veri, iş metodları ve süreçleri bütünleştirerek, süreçlerin yönetilebileceği işbirlikçi bir ortam yaratır, önceden aynı ürün için ayrı ve bağımsız olarak çalışan süreçleri, disiplinleri, fonksiyonları ve uygulamaları birleştirir (Sayer ve Ülker, 2014). Burada dijital ikiz kendi başına bir varlıktır ve fiziksel bir sistem hakkında dijital bilgilendirici bir yapı olarak karşımıza çıkmaktadır (Kritzinger ve diğerleri, 2018). Dijital ikiz kavramının ilk bilimsel kullanımı ile ilgili çalışmalardan birisi de 2010 yılında NASA tarafından yapılmıştır (Glaessgen ve Stargel, 2012). NASA tarafından dijital ikiz, bir veya daha fazla fiziksel sistemi en iyi şekilde yansıtan fiziksel modelleri, sensör verilerini ve geçmiş verileri kullanan gerçekçi, yüksek ölçeklemeli bir simülasyon olarak tanımlanmıştır. Bu simülasyonda ilgili veriler, sistemin tüm yaşam döngüsü boyunca toplanır ve elde edilen gerçek zamanlı bilgiler dijital ikize aktarılır. Ana boyutlar ise zaman ve ayrıntı düzeyi olarak karşımıza çıkmaktadır (Kunath ve Winkler, 2018). NASA'ya göre dijital ikizin dört ana işlevi şu şekilde özetlenmiştir;

- Tahmin; dijital ikiz, fiziksel ürünün gelecekteki durumu ve performansını tahmin etmek için kullanılmaktadır (Grieves, 2016). Tahmin edilebilirlik işletmelerin belirsizliklerini azaltır. Örneğin, Uber taksinin varış saatinin belirsizliğini ortadan kaldırarak müşterilerin tatminini arttırmaktadır. Yine Singapur Kara Trafik Kurumu'nda geçmiş trafik verileri ve gerçek zamanlı anlık veriler kullanılarak yöneticiler trafik akışlarını kolaylıkla tahmin etmektedir. Tahminlerin kesinliği ise %85'in üzerindedir. Bu sayede yöneticiler trafik tıkanıklığını önleyebilmekte, toplu taşıma araçlarını uzaktan izleyebilmekte ve araçların doluluk oranını görüp, paydaşları ile verileri paylaşabilmektedir (Parmar ve diğerleri, 2020).
- Güvenlik; dijital ikiz teknolojisi ile sistemin sürekli olarak izlenmesi, güvenilirliği de arttırmaktadır. Dijital ikiz teknolojisi, ürün yaşam döngüsü boyunca farklı işlemleri optimize etmek ve iyileştirmek için olağanüstü bir potansiyel sunmaktadır (Zhu ve diğerleri, 2021).
- Teşhis; dijital ikiz, yaşam döngüsü boyunca fiziksel varlık hakkında bilgi edinme ve tüm proje süreçlerini sürekli olarak izleme fırsatı sunar. Bu nedenle dijital ikiz, olası arızaları doğru bir şekilde tahmin edebilir, bilgileri sisteme geri besleyebilir ve uyarıcı bilgilere göre tepki verebilir (Öztürk, 2021).
- Sorgulama; dijital ikiz mevcut ve geçmiş veriler için sorgulanabilir. Fiziksel bir ürüne dair başka işletmelerde olan benzer süreçler ve örnekler sorgulanabilir ve kıyaslanabilir. Örneğin, ürünün içindekileri, ürünün yapısı ve standartları gibi (Grieves, 2016).

NASA ve ABD hava kuvvetleri araçları için ilk kez kullanılan dijital ikizler, güvenlik veya güvenilirlikle ilgili olası sorunları belirlemek için aracın yerleşik sisteminden, bakım geçmişinden ve mevcut tüm geçmiş ve filo verilerine ilişkin verileri kullanarak ultra yüksek doğrulukta simülasyona olanak tanımıştır. O zamandan beri, dijital ikizler ürünün kullanım ömrü boyunca farklı aşamalarda sanal ve fiziksel alan arasındaki boşluğu kapatılabildikleri için farklı üretim süreçlerine dahil edilmiştir (Tao ve diğerleri, 2018). Bu nedenle dijital ikiz, tasarımın uygulanabilir, güvenli, verimli ve güvenilir olmasını sağlamak için ürünün tasarım sürecinin tüm aşamalarında test edilmesini sağlamaya çalışmaktadır.

Dijital ikiz kavramı tanımlanacak olursa, eşsiz bir fiziksel üretimin sanal bir temsili olarak tanımlanabilir (Rosar ve diğerleri, 2021). Yine, dijital ikiz farklı modellerin, verilerin ve bilgilerin bir kombinasyonudur. Schroeder ve diğerleri (2016) ise dijital ikizi, bir ürünün tüm yaşam döngüsü boyunca yürütülen verilerden ve farklı türde modellerden oluşan bir model olarak tanımlamaktadır. Deng ve diğerlerine (2021) göre dijital ikiz kavramı aşağıdaki özellikleri kapsamaktadır, dijital ikiz;

- Fiziksel nesnelerin mikro düzeyden makro düzeye tüm verilerini birleştirir.
- Yaşam döngüsü boyunca fiziksel üründe var olur, gelişir ve sürekli bilgi biriktirir.
- Fiziksel nesnelerin tanımlanması ve optimize edilmesini sağlar.

Bu özellikler çerçevesinde dijital ikiz, dijital temsiller oluşturmak için üç boyutlu modelleme ve sensörler kullanan varlıkların dijital kopyaları olarak ifade edilebilir (Parmar ve diğerleri, 2020). Üretim sektörü açısından dijital ikiz tanımlanacak olursa, dijital ikizi, fiziksel bir ürünün daha kaliteli, daha ekonomik, daha esnek ve daha inovatif olarak tasarlanması, üretilmesi, müşterilerin beklentilerine ve rekabet koşullarına en uygun hale getirilmesi için sanal sistemde ikizinin oluşturulmasına dair bir teknoloji olarak tanımlayabiliriz.

Dijital ikiz yeni bir kavram değildir. Otuz yılı aşkın bir süredir modelleme ve simülasyon yöntemleri olarak kullanılmaktadır. Fakat son yıllarda Endüstri 4.0 teknolojileri olan Nİ, büyük veri ve gerçek zamanlı verilerin artan kullanılabilirliği, yeni nesil dijital ikizleri mümkün kılmış ve bilinirliğini artırmıştır (Parmar ve diğerleri, 2020). Dijital ikiz, en küçük parçasından en büyük parçasına kadar fiziksel olarak üretilmiş bir ürünü temsil etmekte (Grieves ve Vickers, 2017), sanal varlıkları zenginleştirmek ve iyileştirmek için donanım, yazılım ve Nİ teknolojilerini derinden bütünleştirmektedir. Buna göre, dijital ikizler üç önemli bölümden oluşmaktadır: Fiziksel ürünler, sanal ürünler ve bunları birbirine bağlayan bağlantılar (Lu ve diğerleri, 2020;

VanDerHorn ve Mahadevan, 2021). Dijital ikizin bu bölümlerine ait tanımlamalar Tablo 1'deki gibi özetlenmiştir.

Tablo 1. Dijital ikiz bileşenlerinin özet tanımlamaları

<i>Bileşen</i>	<i>Tanımı</i>
<i>Fiziksel Gerçeklik</i>	
Fiziksel sistem	Dijital ikizi kurulması için seçilen fiziksel gerçekliğin parçası.
Fiziksel çevre	Seçilen fiziksel sistemin dışındaki her şeyin bu sistemi etkileyen yönleri.
Fiziksel süreç	Fiziksel sistemin üretim süreci ve sistemde durum değişikliğine neden olan işlevler.
<i>Sanal Temsil</i>	
Sanal sistem	Fiziksel sistemin verileri ve hesaplama modelleri.
Sanal çevre	Fiziksel sistem için fiziksel ortamın sanal temsilinin oluşturulması.
Sanal süreç	Fiziksel süreçlerin fiziksel ortamı nasıl etkileyeceğine dair simülasyonların kullanılması, hedeflenen sonuçlar için tahminlerin elde edilmesi.
<i>Bilgi Bağlantısı</i>	
Fizikselden sanal bağlantıya	Fiziksel sistemden gelen tüm bilgilerin elde edildiği, analiz edildiği, anlamlandırıldığı ve sanal temsile yansıtıldığı araçlardır.
Sanaldan fiziksel bağlantıya	Sanal sistemden gelen tahmin ve teşhislerin fiziksel sistemi etkileyecek eylemlere ve kararlara dönüştürülmesine dair araçlardır.

Kaynak: VanDerHorn ve Mahadevan, 2021.

Günümüzde dijital ikiz yönteminin en yaygın kullanımı fiziksel nesnelere ve süreçleri gerçek zamanlı ve sanal ortamda izlemektir. Örneğin akıllı bir konveyör, sanal temsili sayesinde, sistemin gerçek durumlarını anlamayı ve normalde ölçülmesi zor olan değişkenleri tahmin etmeyi mümkün kılmaktadır (Fedorko ve diğerleri, 2021). Bu doğrultuda sanal temsil, ürün yaşam döngüsü boyunca çeşitli kaynaklardan gelen geniş bilgileri tutar. Veriler, karar verme sürecini iyileştirmek için gelecekteki ve mevcut koşulları, yani operasyonel ve tasarım ortamlarını belirlemek için çeşitli şekillerde sürekli olarak güncellenir ve görselleştirilir (Mathupriya ve diğerleri, 2020).

Denilebilir ki, dijital ikiz simülasyonun bir sonraki/ileriki seviyesidir (Boschert ve Rosen, 2016). Birçok endüstriyel alanda büyük potansiyele sahip bu simülasyon tabanlı planlama ve optimizasyon kavramlarından biri de dijital ikizdir. Bir dijital ikiz, çeşitli amaçlar için simüle etmek için kullanılabilir, alan seviyesinden kaynaklanan algılanan verilerin gerçek zamanlı senkronizasyonundan yararlanır ve tüm üretim sistemini düzenlemeye ve yürütmeye odaklanan bir dizi eylem arasında karar verebilir (Tablo 2). Bu sonuçlar ise üretimde daha yüksek verimlilik, doğruluk ve ekonomik kazançlar sağlamaktadır (Kritzinger ve diğerleri, 2018).

Tablo 2. Dijital ikiz kavramsal mimarisi

<i>Oluşturma</i>		<i>İletişim</i>	<i>Toplama</i>	<i>Analiz</i>
<i>Fiziksel İşlem Alanı</i>		<i>İletişim Araçları</i>	<i>Dijital İkiz</i>	<i>Erişim Cihazları</i>
Bağlamsal Veriler (Hava, sıcaklık vb.)	ERP Sistemi & CAD Modelleri & Üretim Yürütme Yazılımı	Duyargalar (Sensör) ve Fiziksel Cihaz Yönetim Donanımları	Makine Öğrenmesi, Yapay Zekâ, İdrak ve Karar Verme ile İlgili Sistemler, Melez Sistemler	Uyarı Sistemleri Görüntüleme Sistemleri Arayüzler
İşlem Yapma				Anlamlandırma ve Karar Verme

Kaynak: Yükçü ve Aydın (2020: 569).

Tablo 2'ye göre üst kısımda yer alan oluşturma, iletişim, toplama, analiz işlem adımları, fiziksel işlem alanından dijital ortama doğru işlem aşamalarını göstermektedir. Altta yer alan anlamlandırma ve kavrama ile işlem yapma adımları ise dijital ikiz tarafından fiziksel ortama doğru gerçekleşen işlem adımlarıdır (Yükçü ve Aydın, 2020). Scime ve diğerlerine göre (2021) bu adımlar ile dijital ikizi uygulamak için dijital platforma ulaşılabilir. Dijital platform, üretim ekipmanı, veri depolama sistemleri ve hesaplama yeteneklerinden oluşan bir ağıdır. Bu ağ ile dijital ikiz için tasarım, simülasyon, baskı sonrası işleme ve karakterizasyon dâhil tüm üretim sürecinin yakalanması gerekir. Bu nedenle dijital iş akışı fiziksel üretim süreci, teknisyenler ve mühendisler ile dijital platform arasındaki etkileşim olarak karşımıza çıkmaktadır.

3. DİJİTAL İKİZ UYGULAMALARI

Dijital ikizler, siber-fiziksel ile ilgili sistemler için gerekli olan akıllı nesnelerin ortaya çıkmasına katkıda bulunmuştur (Li ve diğerleri, 2021). Bu katkı, fiziksel nesnede planlanan herhangi bir değişikliği, uygulamadan önce sanal ortamda test edebilme imkânını vermiştir (Grieves, 2016). Bu avantaj sadece üretim sektörünün değil, birçok farklı sektörün dikkatini çekmiştir. Bu bağlamda her sektörde dijital ikiz teknolojisini görmek mümkündür.

Dijital ikiz, sorunları ortaya çıkmadan önce öngörebilmek, arızalanma ve zaman kaybını önlemek, hatta simülasyonları kullanarak geleceği planlamak için verilerin analizine ve sistemlerin izlenmesine izin veren bir teknolojidir. Bu nedenle en fazla üretim sektöründe kullanılmakla birlikte, dijital ikiz eğitim, sağlık, akıllı şehirler gibi diğer çalışma ve iş alanları içinde yeni potansiyel kullanımlar bulmaya başlamıştır (Mashaly, 2021). Örneğin, akıllı şehirler tarafından üretilen verilerle dijital ikizler, kentsel planlama ve politika kararlarını modellemek için kullanılabilir. Dijital ikiz, şehirlerin gerçek zamanlı uzaktan izlemeyi gerçekleştirmesine yardımcı olmakta ve daha etkili karar almaya olanak tanımaktadır (Deng ve diğerleri, 2021). Ayrıca akıllı bir şehrin fiziksel değişim kararlarında dijital ikizleri ile geri bildirimler sağlanabilmektedir (White ve diğerleri, 2021). Yine farklı bir sektörden örnekle, sağlık alanında dijital ikiz iki farklı şekilde karşımıza çıkmaktadır. İlki hastanelerin tasarlanmasında, ikincisi ise hastaların bakımındadır. Akıllı ve giyilebilir teknolojiler sayesinde insanlardan sağlık verilerini alan sensörler insanların veya diğer medikal sistemlerin simülasyonu ile dijital ikizleri oluşturulabilmektedir (Shaw ve Fruhlinger, 2019). Anlık olarak izlenebilen bu verilerle önleyici sağlık hizmetleri mümkün olmaktadır. Dijital ikizler, ilk yardım operatörlerine ve bakımçılarına ek sistem farkındalığı sağlayarak bu güvenilirliği kolaylaştırıp sağlamlığı artırmaktadır (Kutzke ve diğerleri, 2021). Eğitim sektöründen bir örnekle, Göçen (2020) çalışmasında dijital ikizin açık ve uzaktan öğrenmede kullanılabileceğini, özellikle kişiselleştirilmiş uyarlanabilir öğretim tasarım süreçlerinde, öğrenenlere ilişkin veri kaynağı oluşturarak sistemden ayrılmalara ilişkin anlık uyarı sistemleri tasarlamada, öğrenci destek hizmetlerinde ve sanal sınıfların oluşturulmasında dijital ikizden yararlanılabileceğini belirtmiştir.

Dijital ikiz uygulamaları, hayal bile edilemeyen disiplinlerde de bulunabilir. Bu tür disiplinler, örneğin, düşük enerjili binaların tasarımında ve geliştirilmesinde dijital ikiz yönteminin kullanıldığı inşaat endüstrisi olabilir (Kaewunruen ve diğerleri, 2019). Örneğin, Ceylan (2019) dijital ikizlerin inşaat sektörü için yapı bilgi modelleme süreçlerinde kullanılabileceğini, yapı bilgi modelleme ile dijital ikizlerin birbirlerine destekçi iki teknoloji olarak kullanılırsa önemli faydalar sağlayacağını belirtmiştir. Özen ve Gürel (2020) çalışmalarında kamu denetiminde dijital ikiz teknolojisinin üzerinde durmuş, dijital ikizin sunduğu sürekli modern denetim ile bilgi teknolojilerinin ve verilerin güvenliğinin sağlanması yoluyla denetim kalitesine önemli katkılar sunduğunu belirtmişlerdir. Buna göre dijital ikiz teknolojisinin sağladığı sürekli denetim ile teknolojik imkânlardan faydalanılarak yapılan, risk odaklı ve önleyici bir sürekli denetimle her aşamada değerlendirme sağlanacak ve sürekli izleme, kontrol ve raporlama ile güvenilir, eş zamanlı, verimli denetim faaliyetleri gerçekleştirilebilecektir. Dijital denetim konusunda Erturan ve Ergin (2018) yaptığı çalışmada, dijital ikiz ile denetçilerin denetlediği işletme ile ilgili verilere gerçek zamanlı olarak ulaşacağını ve oluşan hataları tam zamanlı olarak düzeltebileceğini ifade etmişlerdir. Böylece dijital ikizin denetim maliyetlerini düşürebileceğine, iş yükünü azaltabileceğine ve denetim kalitesinin artmasına yardımcı olabileceğini belirtmişlerdir. Yükçü, Aydın ve Koçakoğlu (2020) bağımsız denetimde dijital ikiz uygulamasının iki şekilde kullanıldığını belirtmişlerdir. Birincisi bağımsız denetim şirketinin kendi içinde dijital ikiz uygulaması ile kendi yaptığı bağımsız denetimin denetimini yapmasıdır. İkincisi ise Kamu Gözetim Kurumunun kendisine gönderilen sözleşmelerin denetimini dijital ikiz ortamında yapması şeklinde olduğunu belirtmişlerdir. Yine mimari, mühendislik, inşaat, işletme ve tesis yönetimi gibi birçok farklı alanda dijital ikiz kullanılmakta olup Şekil 3'te görüldüğü üzere, dijital ikizin literatürde birçok farklı değişken ile ilişkileri araştırılmaktadır. Bu değişkenler arasında, risk değerlendirme, varlık yönetimi, tamir ve bakım, bilgi yönetimi, mimari tasarım, gömülü sistemler, proje yönetimi, yaratıcılık, dijital dönüşüm, akıllı şehirler ve otomasyon gibi konular bulunmaktadır (Öztürk, 2021).



Şekil 4. Dijital ikiz uygulama örnekleri (Semeraro ve diğerleri, 2021, yazar tarafından geliştirilmiştir.)

Tablo 3. Bazı dijital ikiz uygulamaları

İşletme/Kurum	Ana Dijital İkiz Değeri	Ana Ürün/Hizmet
ANSYS	Daha iyi tahmin yapmak için analitikle birleştirilmiş simülasyon.	Analiz yazılımı.
Dassault Systemes	Sanal bir fabrikanın tasarımı ve simülasyonu.	3D tasarım ve ürün yaşam döngüsü yönetimi yazılımında uzmanlaşma.
Bosch	Nİ cihazları için dijital ikizlerin envanter yönetimi ve üretim süreçlerinin analiz edilmesi.	Otomotiv parçaları, elektrikli el aletleri, güvenlik sistemleri, ev aletleri, mühendislik, elektronik, bulut.
GE	Performans iyileştirme ve tahmin.	Aletler, güç, yenilenebilir enerji, havacılık ve sağlık.
IBM	Ekipman arızasının tahmin edilmesi; bakım programlarının optimize edilmesi.	Bulut bilişim, AI, Nİ, veri analitiği, dijital çalışma alanı.
Microsoft	İnsanlar, yerler ve cihazlar arasındaki etkileşimlerin modellenmesi.	Bilgisayar yazılımı, tüketici elektroniği, kişisel bilgisayarlar.
PTC	Üretim esnekliği ve rekabet gücünün artırılması.	Nİ ve AR içeren bilgisayar yazılım ve hizmetleri.
Siemens	Plan, tasarım ve üretim sistemleri için dijital ikiz.	Enerji üretimi, iletim, telekomünikasyon, tıbbi teşhis, kontrol sistemleri.
Tesla	Her araç kimlik numarası ile fabrika arasındaki senkronize veriler.	Temiz enerji ve elektrikli araç.
Dassault Systèmes ABD Gıda ve İlaç Dairesi (FDA)	İnsan kalbinin simüle edilerek dijital ikizin oluşturulması.	Yaşayan kalp projesi.
Myontec	İnsan kaslarındaki aktiviteyi ve egzersizlere karşı verdiği tepkileri vücudun genel sağlık durumuna göre analiz edip dijital bir ortama aktararak bu verilerin ışığında daha etkili egzersizlere karar verme.	Giyilebilir teknolojiler ve dijital ikiz entegrasyonu.
Mater Özel Hastaneleri	MPH ve Siemens Healthineers, MPH radyoloji bölümü iş birliği.	Radyoloji departmanının 3D bilgisayar modeli, nicel raporlar, farklı operasyonel senaryolar deneyebilme ve yeni düzenekleri test edebilmek için dijital ikiz.
University College London, Empirica İletişim ve Teknoloji Araştırma Şirketi Sheffield Üniversitesi, Rizzoli Ortopedi Enstitüsü ve Pompeu Fabra Üniversitesi	İnsan vücudunun dijital ikizinin yaratılması, özellikle sağlık alanında dijital hastaların oluşturularak, tıbbi kararları desteklemek için hastaya özel yapılan modelleme.	Dijital Hasta Yol Haritası Projesi.
Türkiye Çevre ve Şehircilik Bakanlığı	Akıllı şehir uygulamaları.	Akıllı binalar, akıllı hastaneler, akıllı belediyeler
Türkiye Cumhurbaşkanlığı Dijital Dönüşüm Ofisi Başkanlığı ve Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı	Sanayi ve Teknoloji Bakanı ve DDO Başkanı'nın Bilge ve Bilgin adında kendi yapay zekâ karakterleri ve dijital ikizleri ile sohbeti.	Türkiye'nin İlk Ulusal Yapay Zekâ Stratejisi

Kaynak: Aynacı, 2020; Bulut, 2020; Aheleroff ve diğerleri, 2021.

Ülkemizde, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından gerçekleştirilen “Kentsel Yerleşim ve Gelişme Alanlarında 3 Boyutlu Topoğrafya ve Bina Modeli Oluşturma” Projesi ile tüm şehirlerin dijital ikizleri oluşturulmuştur. Bu ikizler sayesinde afetlere önceden önlem alınacağı ve imar barışına girmeyen yapıların tespit edileceği belirtilmiştir (CSB, 2019). Yine, Türk Havacılık ve Uzay Sanayii AŞ, Siemens PLM Software ile üretim tesisinde bütünsel bir dijital ikiz uygulaması için iş birliğine gitmiştir. Bu iş birliği ile karmaşık programların daha çabuk uygulamaya alınması fiziksel prototip süreçleri azalmasını ve ürünlerin pazara sunulma süresinin önemli ölçüde kısalması hedeflenmiştir (Yeşilyurt, 2018).

Yine Türkiye’de 2017 yılında Afyon Dinar’da dijital ikiz teknolojisi üzerine kurulan “Dijital Rüzgâr Çiftliği” bölgedeki 72 bin ailenin elektrik ihtiyacını karşılamaktadır. Sistemin en önemli özelliği tribünlerin sensörlere sahip olması, akıllı özelliği taşıması ve oluşturulan sanal bir platform aracılığı ile dijital ikizi ile konuşmasıdır. Bu sayede kendisine gelen rüzgâr koşullarına göre zorlanacağı durumları dijital ikizine söylemekte, bu rüzgâr koşullarına ve hava durumuna göre kendisinde oluşabilecek arızaları haber vermekte ve destek istemektedir. Dijital ikizi ise bu verileri ve diğer ilişkili verileri analiz ederek onun ne yapması gerektiği konusunda bir karar vermektedir (Ekren, 2020).

4. ÜRETİM SEKTÖRÜNDE DİJİTAL İKİZ UYGULAMALARI

Dijital ikiz, üretim sektörünün ilerlemesinde öncü bir rol üstlenmiştir (Fuller ve diğerleri, 2017). Üretim sisteminin uçtan uca entegrasyonun sağlanmasında aracı bir rol üstlenen dijital ikizler, derin öğrenme, Nİ, SFS gibi teknolojiler ile birleştiğinde işletmeler için bulunmaz bir fırsata dönüşmektedir (Kutzke ve diğerleri, 2021). Özellikle üretim eğilimlerinin hızlıca değiştiği rekabetçi pazarlarda dijital ikiz ve üretimde dijitalleşme işletmelerin daha yüksek verimlilik sonuçlarına ulaşmak için bir fırsat olarak görülmektedir. Bu fırsat dijital teknolojilerin akıllı üretim sistemlerine adaptasyonunu kolaylaştırmaktadır. Ayrıca bu teknolojiler fiziksel ürünün uzaktan algılanması, gerçek zamanlı izlenmesi ve kontrolüne olanak tanımaktadır (Negri ve diğerleri, 2017). Bu durum ise işletmelerde ortaya çıkabilecek sorunları çözmeye olanak tanıyan bir altyapı sağlamaktadır (Zhang ve diğerleri, 2021: 60).

Dijital ikizin bu potansiyel faydalarına sahip olmak için işletmelerin fiziksel nesnenin mühendislik verilerini ve operasyonel verilerini birleştirerek dijitalleştirilmesi gerekmektedir. Daha sonra dijitalleştirilen veya sayısallaştırılan bu veriler bir üretim ortamı bağlamında, sensörler, iletişim sistemleri ve gömülü sistemler, makinelere ve üretim sisteminin diğer öğelerine entegre edilmelidir. Bu şekilde toplanan verilerin bir ağ aracılığıyla fiziksel nesnenin bilgi dünyasındaki dijital temsiline aktarılması gerekir. Fiziksel sistemlerin sanal sistemler ile bu şekilde oluşturulan entegrasyonu sanal ve fiziksel sistemler arasında karşılıklı etkileşimi ortaya çıkarır ki, bu durum SFS teknolojisi olarak bilinir (Kunath ve Winkler, 2018). SFS teknolojisi Endüstri 4.0 için vazgeçilmez bir teknolojidir. Nitekim Endüstri 4.0’ın amacı fiziksel dünya ile sanal dünyayı birleştirmektir (Wang ve Wang, 2016). Bu amaca ulaşmak için dijital ikiz benzersiz bir yol sağlamaktadır (Qi ve diğerleri, 2021). Aralarındaki fark ise, dijital ikizler daha çok sanal modellere odaklanırken, SFS teknolojisi daha kapsamlı olarak bilgi işlem, iletişim ve kontrolü vurgular. Bu şekilde, fiziksel alan sanal alan tarafından gerçek zamanlı olarak entegre edilebilir, izlenebilir, kontrol ve koordine edilebilir ve bunun tersi de mümkündür (Semeraro ve diğerleri, 2021).

Dijital ikiz, özellikle akıllı üretim süreçleri açısından giderek kilit araştırma alanlarından biri haline gelmektedir (Fedorko ve diğerleri, 2021). Akıllı üretim, en gelişmiş üretimlerden biridir ve gelecekteki gelişme yönü sayesinde hep istenilen bir hedeftir. Akıllı üretime ulaşmanın yolu siber fiziksel sistemlerdir ve bu da ancak dijital ikizler ile mümkün olabilir. Hatta dijital ikizlerin akıllı üretim için bilgi entegrasyonunun kilit teknolojisi olduğuna ve daha önce akıllı üretime ulaşmak için önemli bir engel olarak görülen siber fiziksel entegrasyonun önünü açabileceğine inanılmaktadır (Shengli, 2021). Burada ideal olan dijital ikizin fiziksel karşılığı ile aynı olacak ve nesne/sistem hakkındaki tüm bilgilerin eksiksiz, gerçek zamanlı bir veri kümesine sahip olmasıdır (White ve diğerleri, 2021). Üretim ortamlarında, özellikle yüksek verimlilik için tasarım, montaj, işleme ve lojistik gibi aşamalarda dijital ikizden faydalanılmaktadır. Dijital ikizler doğru ve etkili bir şekilde kullanıldığında, üretim süreçlerini daha esnek, uyarlanabilir ve öngörülebilir hale getirmektedir (Lugaresi ve Matta, 2021). Araştırmacılar tarafından, üretim süreçlerinde dijital ikiz teknolojisinin kullanımına dair dört kategori tanımlanmıştır. Buna göre dijital ikiz ile işletmeler (Lee ve diğerleri, 2021: 87);

- Ürünleri modellemek, izlemek, test etmek, kontrol etmek ve hizmet vermek için ÜYDY’ne vurgu yapan ürün tasarımları gerçekleştirebilir.
- Sürekli ve tutarlı veri toplama ile üreticilere işin görünen ve görünmeyen yönleri hakkında şeffaf bilgi sağlayabilir. Bu bilgiler, üreticilerin verimliliklerini, hızlarını, kalitelerini vb. artırmalarına yardımcı olacaktır.

- Fiziksel sistemler ile sanal sistemler arasındaki boşluğu azaltan bir sistem entegrasyonu sağlanabilir. Bu entegrasyon sayesinde, üretimin farklı aşamalarında hem kullanıcılara hem de ürün sistemlerine yeni hizmetler sunulmaktadır.
- Ürün yaşam döngüsünün her aşamasında uyumlu ve tutarlı bir çalışma sağlamak için üretimin sürdürülebilirliğini, pazar payını, toplam geliri, müşteri memnuniyetini vb. izleyen ve gerektiğinde ayarlamalar yapan iş perspektifi sağlayabilir. Örneğin, fabrikalarda belirli işler için robotik sistem tasarlamak, dijital ikiz yaklaşımına dayalı olarak kurulabilir (Lee ve diğerleri, 2021: 88).

Dijital ikizlerin üretim atölyelerinde kullanılması ile akıllı üretimlerin gerçekleşmesi, işletmelere esneklik, kişiselleştirilmiş kitle üretim, sürdürülebilirlik ve kaliteli ürün üretimi gibi fırsatları sağlamaktadır. Bu açıdan günümüz koşulları işletmeleri dijital ikiz tabanlı akıllı üretime ve bireyselleştirilmiş üretime zorlamaktadır (Leng ve diğerleri, 2021). Bununla birlikte dijital ikiz teknolojisi ile robotik uygulamaların birlikte kullanılması, işletmeler için çok daha büyük fırsatları doğurmaktadır. Dijital ikiz ile tasarlanmış bir insan-robot iş birliği, üretim sistemine hızlı entegrasyon, üretim sürekliliği, üretimin yeniden yapılandırılması ve güvenlik doğrulaması sağlamaktadır. Daha da ileri düzeyde ise, çalışanların iş güvenliği, üretim süreçlerinde kısalma ve yüksek verimlilik bu iş birliği ile elde edilmektedir (Malik ve Brem, 2021). İnsan ve makine etkileşiminin altyapısına dijital ikiz önemli bir katkıda bulunmaktadır (Fan ve diğerleri, 2021). Son yapılan çalışmalarda, insan ve robotların birlikte çalıştığı esnek montaj hücrelerinin önemi vurgulanmaktadır (Shengli, 2021).

5. DİJİTAL İKİZ OLGUNLUK SÜRECİ

İşletmelerin dijital ikiz teknolojisine geçişleri için standart bir süreç bulunmamaktadır. Çünkü her işletme birbirinden farklıdır. Başka bir deyişle, her işletme benzersiz olduğundan ve kendine özgü varlıklar, süreçler ve etkileşimlerden oluştuğu için, dijital ikize geçiş için ana hatları sağlayacak tek bir standart yoktur. Bu nedenle işletmelere dijital ikiz teknolojisine geçişte, sadece dikkat edebilecekleri ilkeler olduğu söylenebilir. Buna göre dijital ikiz oluştururken Parmar ve diğerleri (2020) beş ilkenin dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir. Bunlar;

1. Mevcut kaynakların değerlendirilmesi: İşletmenin elindeki mevcut dijital teknolojileri değerlendirmesi gerekmektedir. Bunun için işletmeler kullandıkları dijital teknolojilere ilişkin kapsamlı bir araştırma yapmalıdır.
2. Verilerin serbest bırakılması: İşletmelerin verileri genelde bilgi arşivlerinde ve depolama alanlarında saklıdır. Verilerin dijital ikize entegre edilebilmesi için bilgi depolarından kurtarılması gerekir. Veriler, başka verilerle daha fazla bağlantılı hale geldikçe değerleri artacaktır ve başka verileri de kendilerine çekecektir. Böylece veriler ne kadar serbest bırakılırsa, dijital ikizin potansiyel kapsamı o kadar büyük olacaktır.
3. Dijitalleşme sınırlarının zorlanması: İşletmelerin sürekli olarak dijitalleşme fırsatlarını kollaması, işletmesini dönüştürmesi, yeni teknolojiler konusunda kendini zorlaması gerekmektedir.
4. Yeni dijital fırsatlar aranması: İşletme içinde daha fazla yapı, süreç ve etkileşim dijitalleştirildikçe ve dijital ikiz içinde temsil edildikçe, yeni dijital fırsatlar giderek daha uygulanabilir hale gelmektedir.
5. Modellerin artırılması: Son ilke, dijital ikizin ilk bilgi, bağlam ve etki modellerinden evrimini dikkate almaktadır. İşletmelerin bu aşamada dijital ikize geçişi için modellere sahip olması gereklidir. Yeni bağlantıların, yeni verilerin, yeni süreçlerin ve yeni etkileşimlerin doğru bir şekilde modellenmesini sağlamak için dijital ikizi oluşturan bilgi, bağlam ve etki modellerinin sürekli olarak güncellenmesi ve yeniden yapılandırılması gerekir. Dijitalleştirme sınırı sürekli olarak genişletildiğinden yeni sensörler, varlıklar, süreçler ve etkileşimler sayısallaştıkça bilgi modelinin güncellenmesi gerekecektir.

Bu ilkelerin doğru bir şekilde kullanılması, dijital ikizin ortaya çıkmasını ve büyümesini sağlayabilecek dinamik bir evrim süreci ile sonuçlanabilir. Dijital ikiz işletmeler için oldukça önemlidir, çünkü dijital ikiz, Endüstri 4.0 için ana destekleyici teknolojiler olarak hizmet veren akıllı üretimi mümkün kılmaktadır. Dijital ikizler, bazı kaynaklarda dijital ikizin veri entegrasyon düzeyine ve olgunluğuna göre "Dijital Model", "Dijital Gölge" olarak da karşımıza çıkmaktadır (Fan ve diğerleri, 2021). Araştırmacılar geçiş sürecine dair, dijital ikizlerin işletmelerde olgunluğunu, Tablo 4'te görüldüğü gibi, dijital ikiz öncesi, dijital ikiz, uyarlanabilir dijital ikiz ve akıllı dijital ikiz olmak üzere dört seviyeye ayrılabilirliğini belirtmişlerdir (Singh ve diğerleri, 2021).

Tablo 4 incelendiğinde şu sonuçlar çıkarılabilir; fiziksel nesne ile dijital nesne arasında tek yönlü bir veri akışı, manuel bir model geliştirme süreci varsa dijital gölge aşamasında olduğu söylenebilir. Bu seviyede fiziksel nesnenin durumundaki bir değişiklik, dijital nesnede bir durum değişikliğine yol açar, ancak bunun tersi olmaz. Bununla birlikte, fiziksel nesne ile dijital bir nesne arasındaki veri akışı her iki yönde de tamamen entegre ve otonom model/uygulamaya sahip ise bu seviyeye dijital ikiz denilebilir. Böyle bir olgunlukta, dijital nesne aynı zamanda fiziksel nesnenin kontrol örneğidir. Fiziksel nesnenin durumundaki

bir değişiklik, doğrudan dijital nesnenin durumunda bir değişikliğe yol açar ve bunun tersi de geçerlidir (Kritzinger ve diğerleri, 2018: 1017).

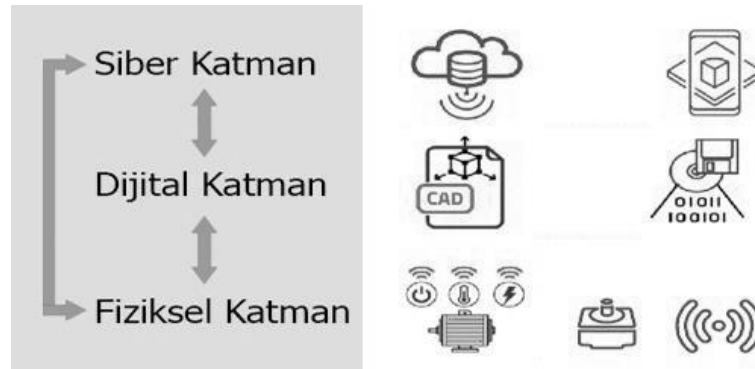
Tablo 4. Dijital ikizler için olgunluk seviyeleri

Seviye	Dijital İkiz Öncesi Dijital Gölge	Dijital İkiz Dijital Gölge	Uyarlanabilir Dijital İkiz	Zeki Dijital İkiz
Yaşam döngüsü	Tasarım	Tasarım ve kullanım	Kullanım	Kullanım ve evrim
Fiziksel ve Dijital İkiz Bağlantısı	Hiçbiri	Tek taraflı	İki taraflı	Çok taraflı
Uygulama Senaryoları	Kavramsal tasarım, risk değerlendirme	Detaylı tasarım, Fonksiyonel test	Operasyon optimizasyonu	Otonom kontrol
Model Geliştirme	Manuel	Ayrık	Sürekli	Otonom

Kaynak: Singh ve diğerleri, 2021.

Dijital ikizin işletmelerde kurulabilmesi için gereken teknolojiler seti büyük ölçüde farklılık göstermektedir. Genel olarak bakıldığında, sıklıkla kullanılan teknolojiler simülasyon yöntemlerini içermektedir. Bununla birlikte, dijital ikizler, iletişim protokollerine ve yaygın olarak Endüstri 4.0 teknoloji bileşenleri olarak tanımlanan (Duman ve Akdemir, 2020) diğer teknolojilere (nesnelerin interneti, bulut bilişim, büyük veri vb.) ihtiyaç duymaktadır (Kritzinger ve diğerleri, 2018). Bu açıdan işletmelerin neler yapması gerektiğine dair incelenen çalışmalarda şu ifadelerle rastlanmıştır: Dijital ikizler, doğru ve farklı küçük tipte sensörler gerektirir. Bu sensörleri değişen koşullarda yönetmek ve bakımını yapmak zorlu ve karmaşık bir süreçtir. Dijital ikizlerin kullanılan tüm teknolojileri ve platformları uzun ömürlü olmalıdır. Bu teknolojiler tasarım, simülasyon ve analitik yazılımlara sahip olmalıdır. Bu nedenle doğru teknolojilerin seçilmesi uzun vadede bir başarı göstergesidir. Yine önemli başarı göstergelerinden birisi de çalışanların dijital ikiz teknolojilerine göre eğitilmesidir. Dijital ikiz bir dizi beceriye ihtiyaç duymaktadır. Yine daha etkin bir dijital ikiz için veri yönetim sistemlerinin güvenliğini sağlamak hayati önem taşımaktadır. Son olarak, diğer teknolojiler gibi, bu büyük dijital dönüşümü kabul etmek için işletmelerin ve paydaşlarının kültür değişikliklerine ihtiyacı bulunmaktadır.

İşletmelerin dijital ikiz modelini kurarken teknoloji, yazılım, çalışan, örgüt yapısı ve örgüt kültürü ile birlikte ortak bir dönüşüm geçirmesi gerekmektedir. İşletmenin mevcut teknolojilerinin dönüşümü, dijital ikiz modeline geçişi aşamalı bir süreci karşımıza çıkarmaktadır. Özellikle kurulan modeller, yol haritaları ve her araştırma bu konuda uygulayıcılara yol göstermektedir. Kavramsal olarak bir dijital ikiz modeli Şekil 5'teki gibi gösterilmiştir.



Şekil 5. Kavramsal dijital ikiz referans modeli (Aheleroff ve diğerleri 2021, yazar tarafından geliştirilmiştir.)

Dijital ikiz modeli fiziksel katman, dijital katman, siber katman ve bu katmanlar arasında veri alışverişi için gerekli iletişim olmak üzere dört bölüm şeklinde kurulmaktadır. Fiziksel katmanın görevi, nesnelere, varlıklara, ürünlere, personele, ekipmana, tesislere, sistemlere, süreçlere, çevreye veya kaynaklara gibi gerçek nitelikleri temsil etmektir. Dijital katman, statik veya dinamik verilerin oluşturulmasını değiştirilmesini, analizini, optimizasyonunu veya tahminini desteklemek için verilerin bilgisayar destekli tasarım (CAD) veya bilgisayar destekli üretim (CAM) gibi ham haliyle veya farklı dosya formatlarında kaydedilmesini sağlamaktadır. Tasarlanmış ve geliştirilmiş dosyaları içerir. Siber katman, buluta işleme ve depolamayı içerir. Bu katmanda teknolojilerden elde edilen veriler kullanıma hazır bilgiye dönüştürülür. Siber katman sayesinde, büyük veri, Nİ, makine öğrenme ve blockchain ile ilişkili gelişmiş özellikler nedeniyle en karmaşık üretim

paradigmalarını elde etme becerisine sahip güçlü teknolojiler ortaya çıkabilir. Üretimde ciddi bir katma değer yaratılabilir (Aheleroff ve diğerleri, 2021). Bu nedenle Zhuang ve diğerleri (2018) işletmelere, karmaşık bir ürün montaj atölyesi için dijital ikiz tabanlı bir akıllı üretim yönetimi ve kontrol çerçevesi önermiştir. Siber katman özellikle Endüstri 4.0 ile popüler olan ve bugün müşterilerin de isteklerine en uygun olan, veri gizliliği, şeffaflık, ölçeklenebilirlik ve kişiselleştirme dâhil olmak üzere çeşitli rekabet avantajları sağlamaktadır (Aheleroff ve diğerleri, 2021). İşletmeler açısından potansiyel faydalar sağlayan bu teknolojiye dair araştırma sonuçları ise aşağıdaki gibi özetlenebilir.

6. VERİMLİLİK TEKNOLOJİSİ OLARAK DİJİTAL İKİZ

Endüstri 4.0 ile değişen üretim anlayışı tüketicilerin beklentilerini de değiştirmiş, çeşitli ve karmaşık ürünlere talebin artmasına neden olmuştur. Bu nedenle üretim sektörü, tüketicilerine en kısa sürede ve en az maliyetle ürünleri ulaştırabilmek için bir çözüm aramaktadır. Dijital ikiz teknolojisi üretim geri bildirimlerinin yanında ürün performansı hakkında gerçek zamanlı bir izleme sağlamaktadır. Bu açıdan dijital ikiz üreticilere sorunları fark etme, tahmin etme ve olası çözümler sunma veya üreticilerin daha iyi kararlar almasına yardımcı olma yeteneği vermektedir (Zhu ve diğerleri, 2021). Özellikle üretim sürecinde dijital ikiz; üretim süreci izleme ve kontrolünde karşımıza çıkarken, ürünlerin tüm yaşam döngüsünü kapsayan ve ürün/üretim hattı tasarımı, üretim süreci ve ürün/sistem işletimi ve bakımı hakkında da bilgi vermektedir (Tao ve diğerleri, 2018). Dijital ikizi başarılı bir şekilde kullanan işletmeler planladıkları veri odaklı değer yaratma amaçlarının çoğunu gerçekleştirebilir. Dijital ikiz kullanıcılarının bu teknolojiden beklediği amaçlar şunları içermektedir (Parmar ve diğerleri, 2020: 226);

- Üretim süreçlerine dair simülasyon yöntemi ile en verimli yollar belirlendiği için maliyet tasarrufu,
- Müşteri satın alma davranışları simülasyon yöntemi ile tahmin edildiği için işletmelere rekabet avantajı,
- Örgütsel performansa etki eden kararlara dair simüle yeteneği, veri tahminlerine dayalı hızlı, hatta otomatikleştirilmiş kararlar yoluyla kurumsal çeviklik,
- Yeni ürün geliştirme, müşteri davranış simülasyonları ile birlikte kullanıldığında, müşterilerin ihtiyaçlarını en iyi şekilde karşılayan ürünler olarak sıralanabilir.

Dijital ikiz, bir ürünün tasarım aşamasından satış sonrası hizmete kadar tüm aşamalarında uygulanabilir. Ürünün genel performansı izlenebilir ve bakım ihtiyacına karar verilebilir. Ayrıca üretim faaliyetlerinin planlanmasına yardımcı olabilir. Marka sadakatini geliştirmek ve müşterilerin gereksinimlerini karşılamak için müşterilerden geri bildirim alınabilir (Deepu ve Ravi, 2021). Özellikle üretim süreçleri için dijital ikiz, optimizasyon hızını ve planlamanın doğruluğunu artırır. Örneğin Sierra ve diğerleri (2018) montaj tasarım ve planlamasını aynı anda yürütmek ve üretim kaynaklarını tek bir üretim biriminde otomatik olarak koordine etmek için bir dijital ikiz önermişlerdir. Dijital ikiz tabanlı bu üretim sisteminin, çok çeşitli ürünler üretmek için minimum yeniden yapılandırma maliyetine sahip olacağını belirtmişlerdir. Yine bu konuda, Yüksekü ve Aydın (2020) çalışmalarında maliyeti düşürmek için bir yöntem olarak dijital ikizleri önermişlerdir.

Dijital ikiz tedarik zinciri sürecinde kullanıldığında; uçtan uca birbirine bağlanmış, oldukça hızlı ve engelleri görebilen bir tedarik zincirine sahip olunabilir. Veri akışı ve paylaşımı, rekabeti, iş birliğini ve şeffaflığı kolaylaştırabilir, bu ise etkili bir tedarik zinciri ile sonuçlanabilir. Bu noktada dijital ikiz üretim sistemlerinin sürekli iyileştirilmesine yardımcı olur, inovatif yenilikleri kolaylaştırır. Farklı durumlara göre farklı senaryolar geliştirebilir. Böylece, tedarik zincirindeki tüm faaliyetler, performansı artırmak için çeşitli senaryolar dikkate alınarak değiştirilebilir (Deepu ve Ravi, 2021).

Dijital ikiz teknolojisi oluşabilecek bir ekipman arızasını tahmin etmede, ekipmanların optimum performansı düştüğünde kullanıcılara uyarı vermede ve müşterilerin deneyimlerini iyileştirmede destek olabilir (Tao ve diğerleri, 2018). Bu sayede dijital ikizler yöneticilere bireysel ve örgütsel performansı daha iyi anlama, tahmin etme ve optimize etme imkânı sağlayabilir. Parmar ve diğerleri (2020) çalışmalarında, yöneticilerle yapılan son anketlerde dijital ikizin kullanımının arttığını belirtmişlerdir. Sonuçlara göre NI teknolojisi kullanan işletmelerin %13' ü hâlihazırda dijital ikizleri de kullanmaktadır ve %62'si de ya dijital ikiz kullanımı kurma sürecindedir ya da bunu yapmayı planlamaktadır.

Dijital ikizler işletmelerde yenilik ve iyileştirme olanaklarını artırmaktadır. Bu nedenle, Li ve diğerleri (2021) maliyeti azaltmak ve fiziksel, siber ve sosyal alan arasında iş birliğini sağlamak için dijital bir ikizin gerekli olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca dijital ikiz, işletmelere karar desteği sağlamaktadır (Parmar ve diğerleri, 2021). Dijital ikiz, rekabet edebilirliği, üretkenliği ve verimliliği artırmaktadır (Kritzinger ve diğerleri, 2018). Bunlara ilaveten dijital ikizler güvenilir, gerçek zamanlı, şeffaf ve dijital raporlar sağlayarak işletmeler için birçok fayda sağlamaktadır. Tüm bu faydalar şu şekilde özetlenebilir (Mashaly, 2021: 301; Qi ve diğerleri, 2021);

- Gerçek zamanlı izleme, kontrol ve veri toplama; dijital ikiz aracılığıyla, fiziksel ve sanal sistem arasındaki güncellemeler gerçek zamanlı olarak takip edilebilir, bu durum iş kararları için gerekli tüm verilerin alınmasına ve gerektiğinde fiziksel sistem üzerinde kontrolüne olanak tanır.
- Yüksek kalitede tasarımlar oluşturma; tasarım sürecine modelleme ve görselleştirme aşamasında dijital ikiz diğer teknolojiler ile birleşerek (XR gibi) yüksek kaliteli bir tasarım elde edilebilir. Bu sayede dijital ikiz müşteriler, yöneticiler gibi tüm paydaşların proje modelini adım adım takip etmesine, sorunları bulmasına ve kıyaslamasına imkân tanır (Alizadehsaleh ve Yitmen, 2021).
- Uzaktan erişim ile iş sürekliliği; dijital ikize istenilen her yerden ulaşılabilir (Alizadehsaleh ve Yitmen, 2021). İşletmede olmasalar dahi dijital ikiz, ilgili tüm tarafların sisteme dâhil edilmesini ve iş birliğini garanti eder.
- Artan verimlilik; üretim sürecinde senaryoların ve vakaların test sürecini kolaylaştırarak, zaman ve maliyet tasarrufu sağlar. Dijital ikiz ayrıca, ekipman ve varlıkların ömrünü uzatabilir. Özellikle, fiziksel prototip ihtiyacı ve hata oranını azaltarak, zamandan tasarruf edilmesini sağlamaktadır.
- Yüksek karar destek sistemi; anlık verilerin toplanması, veri analizinin yapılması ve kolayca erişilebilir olması daha hızlı, daha bilgili ve daha verimli iş kararlarının alınmasını sağlar. Dijital ikiz bilgi boşluğunu azaltır. Simülasyon araçları ve sanal gerçeklik araçları aracılığıyla dijital ikiz, operatörün karmaşık fiziksel varlıklar ve süreçler hakkındaki anlayışını derinleştirerek, sağlıklı kararlar almasına yardımcı olur.
- Önleyici bakım ve optimize edilmiş zamanlama: Dijital ikiz ile yapay zekâ ve makine öğrenme teknolojilerinin entegrasyonu ile kesintiler önceden tahmin edilebilir. Bu durum çalışanların farkındalığını artırarak, değişebilen koşullarla ilgili çalışmalarını iyileştirip, geleneksel çalışma yaklaşımlarına değer katabilir. Ayrıca, dijital ikiz arızaların ortaya çıkmadan önlenmesinde ve tespit edilmesinde, sistemin ya da ürünün uzaktan izlenmesinde, oluşan problemlerin uzaktan çözüme ulaştırılmasında ve uyarı sistemlerinin geliştirilmesinde önemli faydalar sağlayabilir (Cybermag, 2020).
- Gelişmiş risk değerlendirme; dijital ikiz, fiziksel sistemi etkilemeden problemler ortaya çıkmadan çeşitli çözümlerin sanal olarak test edilmesine olanak tanır. Duyusal veri toplama, büyük veri analitiği, yapay zekâ ve makine öğrenimi ile birlikte dijital ikiz, izleme, teşhis, prognostik ve optimizasyon için kullanılabilir.
- Dijital ikiz, çalışanların, operatörlerin, bakımçıların ve hizmet sağlayıcıların eğitimi için kullanılabilir. Bu açıdan dijital ikiz, eğitim yöntemlerini daha yaratıcı ve gerçeğe yakın hale getirebilir. Örneğin, Türkiye'nin ilk Ulusal Yapay Zekâ Stratejisi açıklanırken konuşmacıların dijital ikizleri ile sohbetine yer verilmiştir (Ekonomist, 2021).

Dijital ikiz uygulamalarının faydaları arasında azaltılmış üretim süreleri ve maliyetleri, farklı teknolojileri kullanma karmaşıklığını ortadan kaldırma, daha güvenli çalışma ortamları yaratma ve çevresel açıdan daha sürdürülebilir operasyonlar oluşturma da sayılabilir. Dijital ikizler, Siemens gibi birçok önde gelen işletme ve kuruluş tarafından bu potansiyel faydaları için kullanılmaktadır (Negri ve diğerleri, 2017).

Tabi her yenilik ve dönüşümde olduğu gibi, işletmelerin dijital ikiz teknolojisi konusunda çeşitli zorluklarla karşı karşıya olduğu açıktır. Her şeyden önce işletmeler dijital ikizi etkili bir şekilde kullanabilmek için veri yönetimi ve Nİ kullanımını kolaylaştıran bir altyapıya ihtiyaç duymaktadır. Dijital ikiz ile ilgili bir sonraki zorluk, veri gereksinimleridir. Dijital ikiz sabit, kesintisiz bir veri akışı için, veri kalitesi gerektirir. Veriler tutarsız ve eksik olduğunda, dijital ikiz risk taşıyabilir ve yanlış tahmin yapabilir. Bir diğer zorluk ise güvenlik ve gizlilik. Bu zorluğu ortadan kaldırmak için işletmeler, dijital ikiz, Nİ ve veri analitiğini kolaylaştıran teknolojilerin gizlilik ve güvenlik düzenlemeleri ile çeşitli uygulamaları ve güncellemeleri takip etmesi gerekmektedir (Mathupriya ve diğerleri, 2020). Bu konuda VanDerHorn ve Mahadevan (2021), çalışmalarında dijital ikiz uygulama zorluklarını ve fırsatlarını şu şekilde sınıflandırmış ve tavsiyede bulunmuşlardır;

- Terminoloji: İşletme içinde ve dışında daha etkili bir iletişim sağlamak ve ortak bir anlayışı kolaylaştırmak için açık ve tutarlı bir terminoloji tanımlanmalıdır. Aksi takdirde amaçlar ve yapılması gerekenler yanlış anlaşılabilir.
- Standardizasyon: Veri elde etmeden tahmin etmeye ve sonucunda karar vermeye kadar tüm teknolojilerin standartlaştırılması gerekir. Uygulamalara bakıldığında, standart geliştirme süreci genellikle yavaştır ve bu da dijital ikizlerin geniş ölçekte benimsenmesinin yavaşlamasına neden olmaktadır.
- Organizasyon kültürü: Çalışanların, ortakların ve diğer paydaşların arasında ortak bir iş birliği gereklidir. Paydaşlar arasında gerçeğe uygun değer, veri güvenliği ve fikri mülkiyet hakları sağlanmalıdır. İşletmelerde dijital dönüşümü kolaylaştıran bir kültür olmalıdır.

- Teknoloji olgunluğu: Dijital ikizler farklı teknolojilerin bir araya gelmesi ile ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle işletmelerin en ideal olgunluk için mevcut teknolojilerinin olgunluğunu göz önünde bulundurarak, verimlilik ve etkinlikte en anlamlı artışları sunan teknolojilere öncelik vermesi gerekmektedir.
- Doğrulama ve geçerlilik: Dijital ikiz, farklı teknoloji ve süreçlerin entegrasyonundan oluşur. Her işletmenin kaynakları, çalışanları ve teknolojileri birbirinden farklı olduğu için tek bir örnek, tam sistem modelini doğrulamak mümkün olmayabilir.
- Otomasyon: Dijital ikiz otomasyonu artırarak manuel emeği azaltır. Amaç yüksek otomasyondur, fakat üretim sürecindeki insana dair hala güçlü bir güven vardır.

7. SONUÇ

Akıllı işletmelerin temelinde “bağlantı” çıktısında “anlamlı veri” yatmaktadır (Apillioğulları, 2019). Bugün tüm dünyada dijital dönüşüm konusunda bir fikir birliği bulunmaktadır. Birçok işletme sorunları tespit etmek ve verimliliği ve kaliteyi artırmak amacıyla dijital dönüşümü felsefe edinmiş, dönüşüm teknolojilerine yatırım yapmaya başlamıştır. Bu teknolojilerin gelişmesine bağlı olarak, özellikle nesnelerin interneti, bulut bilişim, büyük veri ve yapay zekâ gibi yeni nesil bilgi teknolojilerinin ortaya çıkmasıyla birlikte dijital dönüşüm süreci büyük ölçüde hızlanmıştır. Üstelik bu hızlanış dijital ikizler sayesinde tüm sektörlerde inovasyon hızı da artmıştır (Qi ve diğerleri, 2021). Nitekim Thinktech’ye göre (2020) Nİ teknolojilerini kullanan yöneticilerin bir sonraki adımı dijital ikizlerdir. Dijital ikizler sahip oldukları potansiyel faydaları ile işletmeleri ve yöneticileri kendine çekmektedir ki, dijital ikizleri kullanarak yöneticilerin amacı geleceği en iyi şekilde tahmin edebilmek ve doğru planlamaları yapabilmektir. Bu açıdan dijital ikizler sadece bir görselleştirme aracı değil, doğru ve hızlı karar verme teknolojisidir. Hem üretim öncesinde hem de üretim sonrasında önleyici bir kalite aracıdır. Dolayısıyla Türkiye’nin dijital dönüşüm yolculuğunda, işletmelerin akıllı üretim sürecinde dijital ikizleri kullanması oldukça mantıklıdır. Yaratıcılığı, esnekliği, inovasyonu, çevikliği ve verimliliği artıran bu teknoloji uluslararası bir rekabet aracıdır. Dolayısıyla, dijital ikiz teknolojisi ve işlevleri verimlilik göstergeleri ile yakından ilişkilidir. Dijital ikiz sahip olduğu potansiyel faydalar ile hem çalışan emeğinin hem kullanılan ham maddelerin hem de üretim alanının verimli bir şekilde kullanılmasına katkı sağlamaktadır. Bunu sağlarken en optimal enerji ve sermaye ile en kaliteli sonuçlara ulaşmayı hedeflemektedir. Nitekim dijital ikiz toplam verimlilik ile önemli bir ilişkiye sahiptir. Bu ilişki ve ilişkinin derecesi, incelenen tüm araştırmaların sonucunda Tablo 5’teki matris şeklinde özetlenebilir.

Tablo 5. Dijital ikiz kavramı ve işlevleri ile verimlilik göstergeleri ilişki matrisi

Verimlilik Göstergeleri	Gerçek zamanlı izleme ve kontrol				Sistem entegrasyonu	Yaratıcı ve inovatif çalışma ortamı ve Risk değerlendirme		
	Uzaktan erişim ile çalışma	Karar destek sistemi	Önleyici bakım ve kestirim	Yaratıcı ve inovatif çalışma ortamı ve eğitimleri		Optimal kaynak ve zaman kullanımı		
Çalışan verimliliği	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta	Orta	Yüksek	Orta	Orta
Ham madde verimliliği	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta	Yüksek	Yüksek
Alan verimliliği	Orta	Orta	Düşük	Yüksek	Orta	Yüksek	Orta	Yüksek
Enerji verimliliği	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta	Yüksek	Yüksek
Makine verimliliği	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta	Yüksek	Yüksek
Sermaye verimliliği	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek
Toplam verimlilik	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek

Tablo 5 ile ifade edilmek istenen; çalışan, ham madde, alan, enerji, makine, sermaye verimliliği ile dijital ikiz kavramının temel özellikleri ve işlevleri arasındaki ilişkinin düzeyini belirtmektir. Örneğin, gerçek zamanlı izleme ve kontrol ile makine verimliliği arasında yüksek bir ilişkinin olduğu düşünülmektedir. Bu matris, incelenen tüm çalışmaların sonucunda yazara ait olan fikirlerin bir sonucudur. Gelecek araştırmalarda istatistiksel olarak kanıtlanmaya açıktır. Nitekim bu çalışma ile dijital ikiz konusunda hem araştırmacılara hem de işletmelere bilgi vermek ve yeni araştırmaları teşvik etmek amaçlanmıştır.

Araştırma sonucunda elde edilen tüm bu bulguların yanı sıra araştırmanın birtakım sınırlılıkları bulunmaktadır. İlk olarak dijital ikiz ile ilgili yabancı ve yerli literatürde araştırma sayısı henüz yeterli değildir. Özellikle yerli literatürde önemli bir boşluk bulunmaktadır. Bu durum Türkiye'deki dijital ikiz uygulamalarını ve sonuçlarını görmeyi kısıtlamaktadır. İkinci olarak dijital ikiz teknolojisinin kullanım düzeyi ülkemiz açısından düşüktür. Bu durum dijital ikiz teknolojisine yatırım yapma ve oluşturmanın zorluğundan kaynaklanmaktadır. Bu nedenle araştırmada herhangi bir uygulamaya yer verilememiştir. Dijital ikiz ile verimlilik arasında belirtilen ilişkinin uygulamalar ile istatistiksel olarak ispatlanması gerekmektedir. Son olarak bu çalışma sadece üretim sektöründeki işletmeleri esas alarak yorumlanmıştır. Dijital ikiz teknolojisi ve hizmet işletmelerinin verimlilikleri ile ilgili farklı çalışmalarla desteklenebilir. Lu ve diğerlerine göre (2020) uygulamada güvenilir bir dijital ikiz oluşturmanın zor olması nedeniyle araştırmaların sürekliliği önemlidir. Araştırmacılar bu konuda, dijital ikiz uygulama araştırmalarına odaklanırken, standartlar, iletişim protokolleri, zamana duyarlı veri işleme ve güvenilirlik konusundaki araştırmaların gelecek araştırmalar için öncelik taşıdığını belirtmektedir. Ayrıca, gelecek araştırmalarda dijital ikiz kullanımının yaygınlaşmasına bağlı olarak işletmelerin elde ettikleri verimlilik sonuçlarına dair çalışmalar daha teşvik edici olacaktır. Dijital ikiz konusunda rol model olan işletmelerin sayısının artması, küçük girişimlere, özellikle KOBİ'lere cesaret verecektir. Yine gelecek araştırmalarda dijital ikiz teknolojisi ile yaratıcılık, inovasyon, performans, kalite, akıllı üretim, maliyet ve eğitim gibi değişkenler ilişkilendirilerek daha farklı sonuçlara ulaşılabilir. Yapılan her araştırmanın Türkiye'nin Endüstri 4.0 yolculuğunda önemli bir katkısı olacağı açıktır. Dijital ikiz teknolojisi geleceğin en önemli teknolojilerinden birisidir ve işlenmeye, araştırılmaya ve öğretilmeye ihtiyacı bulunmaktadır.

KAYNAKÇA

- Aheleroff, S., Xu, X., Zhong, R. Y. ve Lu, Y. (2021). "Digital Twin as a Service (Dtaas) in Industry 4.0: An Architecture Reference Model", *Advanced Engineering Informatics*, 47, 101225.
- Alizadehsalehi, S. ve Yitmen, I. (2021). "Digital Twin-Based Progress Monitoring Management Model Through Reality Capture to Extended Reality Technologies (DRX)", *Smart and Sustainable Built Environment*, DOI: 10.1108/SASBE-01-2021-0016.
- Apillioğulları, L. (2019). "Dijital Dönüşüm: Akıllı Fabrikalar", *Aura Kitapları*, İstanbul.
- Aydın, Ö., ve Karaarslan, E. (2020). "Covid-19 Belirtilerinin Tespiti İçin Dijital İkiz Tabanlı Bir Sağlık Bilgi Sistemi", *Online International Conference of COVID-19 (CONCOVID)*, İstanbul.
- Aynacı, İ. (2020). "Dijital İkiz ve Sağlık Uygulamaları", *İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 3(1), 70- 82.
- Basl, J. (2016). "The Pilot Survey of The Industry 4.0 Principles Penetration in the Selected Czech and Polish Companies", *Journal of Systems Integration*, 7(4), 3-8.
- Boschert, S. ve Rosen, R. (2016). "Digital Twin-the Simulation Aspect", *Mechatronic Futures*, Springer, Cham.
- Bulut, T. (2020). "İnsanın Dijital İkizi Oluşturulabilir Mi?", <https://www.sanayigazetesi.com.tr/insanin-dijital-ikizi-olusturulabilir-mi-makale,1842.html>, (Erişim tarihi 26.08.2021).
- Ceylan, E.Z. (2019). "Dijital İkizler ve İnşaat Sektöründeki Yeri", *Yapı Bilgi Modelleme*, 1(2), 53-61.
- Cybermag (2020). "Dijital İkiz Nedir, Faydaları Nelerdir?", <https://www.cybermagonline.com/dijital-ikiz-nedir-faydalanerlerdir>, (Erişim tarihi 26.07.2021).
- Deepu, T.S. ve Ravi, V. (2021). "Exploring Critical Success Factors Influencing Adoption of Digital Twin and Physical Internet in Electronics Industry Using Grey-DEMATEL Approach", *Digital Business*, 1(2), 100009.
- Deng, T., Zhang, K. ve Shen, Z.J.M. (2021). "A Systematic Review of a Digital Twin City: A New Pattern of Urban Governance toward Smart Cities", *Journal of Management Science and Engineering*, 6(2), 125-134.
- Dönençark, M. ve Tecim, V. (2020). "Kurumsal Karar Destek Sistemlerinde Yapay Zekâ Kullanımı: Tasarım ve Uygulama", *Yönetim Bilişim Sistemleri Dergisi*, 6(2), 77-103.
- Duman, M.C. ve Akdemir, B. (2021). "A Study to Determine the Effects of Industry 4.0 Technology Components on Organizational Performance", *Technological Forecasting and Social Change*, 167, 120615.
- Ekonomist (2021). "Türkiye'nin Yapay Zekâ Stratejisi Açıklandı", <https://www.ekonomist.com.tr/ekonomist/turkiyenin-yapay-zekâ-stratejisi-aciklandi.html>, (Erişim tarihi 28.08.2021).
- Ekren, G. (2020). "Dijital İkiz (Digital Twin) Teknolojisi", <https://www.datasciencearth.com/dijital-ikiz-digital-twin-teknolojisi/>, (Erişim tarihi 29.07.2021).
- Erturan, İ. ve Ergin, E. (2018). "Dijital Denetim ve Dijital İkiz Yöntemi", *Muhasebe Bilim Dünyası Dergisi*, 20(4), 810-830.
- Faller, C. ve Feldmuller, D. (2015). "Industry 4.0 Learning Factory for Regional SMEs", *Procedia CIRP*, 32, 88-91.
- Fan, Y., Yang, J., Chen, J., Hu, P., Wang, X., XU, J. ve Zhou, B. (2021). "A Digital-Twin Visualized Architecture for Flexible Manufacturing System", *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 176-201.
- Fedorko, G., Molnár, V., Vasiľ, M. ve Salai, R. (2021). "Proposal of Digital Twin for Testing and Measuring of Transport Belts for Pipe Conveyors within the Concept Industry 4.0", *Measurement*, 174, 108978.
- Fuller, A., Fan, Z., Day, C. ve Barlow, C. (2020). "Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research", *IEEE Access*, 8, 108952-108971.
- Glaessgen, E. ve Stargel, D. (2012). "The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles", 53. *AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, Honolulu, Hawaii.
- Göçen, S. (2020). "Açık ve Uzaktan Öğrenmede Dijital İkiz Teknolojisinin Kullanımına İlişkin Bir Değerlendirme", *Açıköğretim Uygulamaları ve Araştırmaları Dergisi*, 6(4), 155-173.
- Grievess, M. (2014). "Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication", Working Paper.
- Grievess, M. (2016). "Origin of the Digital Twin Concept", *Florida Institute of Technology*, Working Paper.
- Grievess, M. (2019). "Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins", *Complex Systems Engineering: Theory and Practice*, DOI: 10.2514/5.9781624105654.0175.0200.
- Grievess, M. ve Vickers, J. (2017). "Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems", *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, Springer, Cham.

- Handan, İ., I. (2021). "2021'de Dijital İkiz Uygulamaları ile En Büyük Kazanç Sağlayacak İlk Beş Sektör", <https://dijitalis.com/blog/2021de-dijital-ikiz-uygulamaları-ile-en-buyuk-kazanc-saglayacak-ilk-bes-sektor/>, (Erişim Tarihi 26.07.2021).
- Kaewunruen, S., Rungskunroch, P. ve Welsh, J. (2019). "A Digital-Twin Evaluation of Net Zero Energy Building for Existing Buildings", *Sustainability*, 11, 159.
- Kahlen F.J., Flumerfelt S. ve Alves A. (2017). "Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches", Springer, Cham, DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7.
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J. ve Sihn, W. (2018). "Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification". *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016-1022.
- Kunath, M. ve Winkler, H. (2018). "Integrating the Digital Twin of the Manufacturing System into a Decision Support System for Improving the Order Management Process", *Procedia CIRP*, 72, 225-231.
- Kutzke, D. T., Carter, J. B. ve Hartman, B. T. (2021). "Subsystem Selection for Digital Twin Development: A Case Study on an Unmanned Underwater Vehicle", *Ocean Engineering*, 223, 108629.
- Lee, J., Azamfar, M. ve Bagheri, B. (2021). "A Unified Digital Twin Framework for Shop Floor Design in Industry 4.0 Manufacturing Systems", *Manufacturing Letters*, 27, 87-91.
- Leng, J., Wang, D., Shen, W., Li, X., Liu, Q. ve Chen, X. (2021). "Digital Twins-Based Smart Manufacturing System Design in Industry 4.0: A Review", *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 119-137.
- Li, M., Li, Z., Huang, X. ve Qu, T. (2021). "Blockchain-Based Digital Twin Sharing Platform for Reconfigurable Socialized Manufacturing Resource Integration", *International Journal of Production Economics*, 108223.
- Lu, Y., Liu C., Wang K.K., Huang H. ve Xu X. (2020). "Digital Twin-Driven Smart Manufacturing: Connotation, Reference Model, Applications and Research Issues", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61, 101837.
- Lugaresi, G., ve Matta, A. (2021). "Automated Manufacturing System Discovery and Digital Twin Generation", *Journal of Manufacturing Systems*, 59, 51-66.
- Malik, A. A. ve Brem, A. (2021). "Digital Twins for Collaborative Robots: A Case Study in Human-Robot Interaction", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 68, 102092.
- Mashaly, M. (2021). "Connecting the Twins: A Review on Digital Twin Technology & Its Networking Requirements", *Procedia Computer Science*, 184, 299-305.
- Mathupriya, S., Banu, S. S., Sridhar, S. ve Arthi, B. (2020). "Digital Twin Technology on IoT, Industries & Other Smart Environments: A Survey", *Materials Today: Proceedings*, DOI: 10.1016/j.matpr.2020.11.358.
- Meissner, H., Ilsen R. ve Aurich J.C. (2017). "Analysis of Control Architectures in the Context of Industry 4.0", *Procedia CIRP*, 62, 165-169.
- Negri, E., Fumagalli, L. ve Macchi, M. (2017). "A Review of the Roles of Digital Twin in SFS-Based Production Systems", *Procedia Manufacturing*, 11, 939-948.
- Özen, A. ve Gürel, F.N. (2020). "Kamu Denetiminde Dijital Dönüşüm: Dijital İkiz Yöntemi", *İzmir Sosyal Bilimler Dergisi*, 2(1), 16-23.
- Öztürk, G.B. (2021). "Digital Twin Research in the AECO-FM Industry", *Journal of Building Engineering*, 40, 102730.
- Parmar, R., Leiponen, A. ve Thomas, L.D. (2020). "Building an Organizational Digital Twin", *Business Horizons*, 63(6), 725-736.
- Qi, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y. ve Nee, A.Y.C. (2019). "Enabling Technologies and Tools for Digital Twin", *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 3-21.
- Rosar, R., Gollner D., Bernijavoz R., Kaiser L. ve Dumitretcu R. (2021). "Towards Collaborative Life Cycle Specification of Digital Twins in Manufacturing Value Chains", *Procedia CIRP*, 98, 229-234.
- Sayer, S. ve Ülker, A. (2014). "Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi", *Mühendis ve Makina*, 55(657), 65-72.
- Schroeder, G. N., Steinmetz, C., Pereira, C.E. ve Espindola, D.B. (2016). "Digital Twin Data Modeling with Automation ML and a Communication Methodology for Data Exchange". *IFAC Papers OnLine*, 49(30), 12-17.
- Schwab, K. (2016). "Dördüncü Sanayi Devrimi", *World Economic Forum*, Optimist Yayınları, İstanbul.
- Scime, L., Singh, A. ve Paquit, V. (2021). "A Scalable Digital Platform for the Use of Digital Twins in Additive Manufacturing", *Manufacturing Letters*, DOI: 10.1016/j.mfglet.2021.05.007.
- Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H., ve Dassisti, M. (2021). "Digital Twin Paradigm: A Systematic Literature Review", *Computers in Industry*, 130, 103469.
- Shaw, K. ve Fruhlinger, J. (2019). "What is a Digital Twin? And How It's Changing IoT, AI and More", <https://www.networkworld.com/article/3280225/what-is-digital-twin-technology-and-why-it-matters.html>, (Erişim tarihi 27.07.2021).

- Shengli, W. (2021). "Is Human Digital Twin Possible?", *Computer Methods and Programs in Biomedicine Update*, 1, 100014.
- Sierla, S., Kyrki, V., Aarnio, P. ve Vyatkin, V. (2018). "Automatic Assembly Planning Based on Digital Product Descriptions", *Computers in Industry*, 97, 34-46.
- Singh, S., Weeber, M. ve Birke, K. P. (2021). "Advancing Digital Twin Implementation: A Toolbox for Modelling and Simulation", *Procedia CIRP*, 99, 567-572.
- Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., ve Sui, F. (2018). "Digital Twin-Driven Product Design, Manufacturing and Service with Big Data", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(9-12), 3563-3576.
- Tao, F., Sui, F., Liu, A., Qi, Q., Zhang, M., Song, B. ve Nee, A.Y. (2019). "Digital Twin-Driven Product Design Framework", *International Journal of Production Research*, 57(12), 3935-3953.
- TC. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2019). "Şehirlerin "Dijital İkizi" ile Afetlere Önlem Alınacak", <https://www.csb.gov.tr/sehirlerin-dijital-ikizi-ile-afetlere-onlem-alinacak-bakanlik-faaliyetleri-29645>., (Erişim tarihi 26.07.2021).
- Thinktech STM (2020). "Dijital İkiz Teknolojileri ve Üretime Faydaları", https://thinktech.stm.com.tr/uploads/raporlar/pdf/952019111434675_stm_blog_dijital_ikiz_teknolojileri.pdf, (Erişim tarihi 26.07.2021).
- Vanderhorn, E. ve Mahadevan, S. (2021). "Digital Twin: Generalization, Characterization and Implementation", *Decision Support Systems*, 145, 113524.
- Wang, L. ve Wang, G. (2016). "Big Data in Cyber-Physical Systems, Digital Manufacturing and Industry 4.0", *I.J. Engineering and Manufacturing*, 4, 1-8.
- White, G., Zink, A., Codecá, L. ve Clarke, S. (2021). "A Digital Twin Smart City for Citizen Feedback", *Cities*, 110, 103064.
- Yeşilyurt, E.F. (2018). "TAI Dijital Dönüşümde Siemens'i Tercih Etti", <https://www.aa.com.tr/tr/sirkethaberleri/bilisim/tai-dijital-donusumde-siemens-i-tercih-etti/645365>, (Erişim tarihi 26.07.2021).
- Yükcü, S. ve Aydın, Ö. (2020). "Maliyet Düşürme Yöntemi Olarak Dijital İkiz", *Muhasebe Bilim Dünyası Dergisi*, 22(3), 563-579.
- Yükcü, S., Aydın Ö. ve Koçakoğlu, Ü.Ö. (2020). "Bağımsız Denetimde Dijital İkiz Uygulaması", *Mali Çözüm Dergisi/Financial Analysis*, 30(161), 13-26.
- Zhang, J., Deng, T., Jiang, H., Chen, H., Qin, S. ve Ding, G. (2021). "Bi-Level Dynamic Scheduling Architecture Based on Service Unit Digital Twin Agents", *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 59-79.
- Zheng, Y., Yang, S., ve Cheng, H. (2019). "An Application Framework of Digital Twin and Its Case Study", *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(3), 1141-1153.
- Zhu, Z., Xi, X., Xu, X. ve Cai, Y. (2021). "Digital Twin-Driven Machining Process for Thin-Walled Part Manufacturing", *Journal of Manufacturing Systems*, 59, 453-466.
- Zhuang C., Liu J. ve 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.

ENDÜSTRİ 4.0 VE VERİMLİLİK: TÜRK BEYAZ EŞYA SEKTÖRÜNDE KEŞFEDİCİ DURUM ÇALIŞMASI

Kübra ŞİMŞEK DEMİRBAĞ¹, Nihan YILDIRIM²

ÖZET

Amaç: Türk beyaz eşya sektörünün önde gelen iki ana üreticisi ve bu üreticilerin tedarikçisi konumundaki bir yan sanayi şirketi için Endüstri 4.0'ın durumunu, uygulama örneklerini, dönüşüm sürecinde elde edilen avantajları/karşılaşılan zorlukları ve Endüstri 4.0'ın verimliliğe etkisini ortaya koymak amaçlanmaktadır.

Yöntem: Yin (2002, 2017) tarafından önerildiği şekliyle keşfedici durum çalışması yöntemi kullanılmıştır. Kanıtlar ise yarı-yapılandırılmış mülakatlar, doğrudan gözlemler ve şirketlere yönelik online belgelerden elde edilmiştir.

Bulgular: Türk beyaz eşya sektörü şirketleri Endüstri 4.0 dönüşümü için çaba sergilemekte ve dönüşümü zorunluluk olarak algılamaktadır. Şirketler, Endüstri 4.0'a özel bütçe ayırmakta ve en çok veri toplama/analitiğine önem vermektedir. Yapılan yatırımların ise kısa vadede dahi verimliliğe etkisi olumlu olmuştur.

Özgünlük: Mevcut makale, dünyanın en büyük ikinci beyaz eşya üreticisi ve Türkiye'nin en yenilikçi ve en yüksek dijital olgunluğa sahip sektörlerinden biri olan beyaz eşya sektöründe Endüstri 4.0'ın durumunu vaka analiziyle ortaya koyan ilk akademik çalışma niteliğindedir.

Anahtar Kelimeler: Dördüncü Sanayi Devrimi, Endüstri 4.0, Sanayi 4.0, Beyaz Eşya, Durum Çalışması.

JEL Kodları: D24, L68, M11, O14, O30.

INDUSTRY 4.0 AND PRODUCTIVITY: EXPLORATORY CASE STUDY IN TURKISH WHITE GOODS INDUSTRY

ABSTRACT

Purpose: It is aimed to reveal the status of Industry 4.0, its implementation examples, the advantages and challenges in the transformation process, and the effect of Industry 4.0 on productivity for two leading manufacturers and one of their suppliers operating in the Turkish white goods industry.

Methodology: The exploratory case study method was used as suggested by Yin (2002, 2017). Evidence was obtained via semi-structured interviews, direct observations, and online documents regarding companies.

Findings: Turkish white goods companies have made significant efforts in the transformation of Industry 4.0 and perceive the transformation as a must. Companies allocate a special budget for Industry 4.0 and attach great importance to data collection/analytics. The investments have a positive effect on productivity even in the short term.

Originality: The current paper is the first academic work that unveils the status of Industry 4.0 in the white goods industry, which is the second-largest white goods manufacturer in the world and one of the most innovative and digitally mature sectors, through a case study.

Keywords: Fourth Industrial Revolution, Industry 4.0, White Goods, Case Study.

JEL Codes: D24, L68, M11, O14, O30.

¹ Öğr. Gör. Dr., Gümüşhane Üniversitesi, Uzaktan Eğitim Uygulama ve Araştırma Merkezi, Gümüşhane, Türkiye, kubrasimsek@gumushane.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6404-3999 (Sorumlu Yazar-Corresponding Author).

² Doç. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, İşletme Fakültesi, İşletme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye, yildirimni@itu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6279-3849.

1. GİRİŞ

Son 250 yılda buhar motoru, elektrik, bilişim sistemleri, otomasyon, nesnelere interneti, siber-fiziksel üretim sistemleri gibi çözümlerin ön plana çıkmasıyla insanlık tarihinde oldukça radikal değişimler meydana gelmiştir. Sanayi devrimleri olarak adlandırılan bu değişimler, üretim süreçlerinde teknolojilerin kullanımıyla verimliliğin artmasına olanak sağlarken, ülkeler ve toplumlar teknolojiye ayak uydurmak ve yeni araç, yöntem ve teknolojileri ne şekilde elde edip kullanacaklarını öğrenmek zorunda kalmışlardır. Son on yıldır ise, dördüncü sanayi devriminin başladığına işaret eden, Avrupa borç krizine bir yanıt olarak doğan ve Almanya'nın sanayileşme, ekonomik korumacılık ve yerli üretim stratejilerine dayalı olan Endüstri 4.0 kavramından bahsedilmektedir (Fırat, 2016; Gür ve diğerleri, 2017: 42, 76-77). Küresel ekonomideki güç dengelerini önemli ölçüde değiştirecek olan Endüstri 4.0, yeni bir tür akıllı, ağ bağlantılı ve çevik değer zinciri oluşturmak için fiziksel nesnelere, insanları, akıllı makineleri, üretim hatlarını ve süreçleri entegre etmek maksadıyla internetin ve gömülü sistemler gibi destekleyici teknolojilerin bir omurga görevi gördüğü son teknolojik gelişmeleri kapsamaktadır (Schumacher ve diğerleri, 2016; Vogel-Heuser ve Jumar, 2019). Fang (2016), kavramı son üç sanayi devriminden daha ileri bir gelişme olarak kabul edilen siber-fiziksel üretim sistemlerine dayalı yeni bir üretim modu olarak tanımlamaktadır. Çoğu araştırmacı tarafından "moda bir sözcük" (Kinzel, 2017; Bär ve diğerleri, 2018; Tvenge ve Martinsen, 2018; Sony ve Naik, 2020; Rupp ve diğerleri, 2021) olduğu söylenen Endüstri 4.0, en genel haliyle, ilk üç devrim boyunca yaratılmış olan siber sistemler ile fiziksel sistemlerin tam entegre hale getirilmesiyle yaratılan ve kendi üretim ve tedarik zincirini planlayabilen akıllı sistemlerin işgücünün yerini alarak üretimin en verimli şekilde yapıldığı karanlık fabrikalara sahip olmayı mümkün kılması için izlenecek strateji ve uygulamalar bütünüdür.

Schwab (2017: 55), Endüstri 4.0'ın gelir, beceri, altyapı ve finans gibi konularda ülkeler arasındaki farkın artmasına mı yoksa azalmasına mı yol açacağını sorgulamaktadır. Bilhassa, Almanya gibi ekonomik yapısı sanayiye dayalı olan gelişmiş ülkelerin Endüstri 4.0 için yol haritaları çizerek harekete geçmeleri, Türkiye gibi teknolojiye dışa bağımlı ve gelişmekte olan ülkeler için büyük risk teşkil etmektedir. Gelişmiş ülkelerle gelişmekte olan ülkelerin arasındaki bahsi geçen farkların azaltılması ülkelerin coğrafya, sanayi yapısı, ekonomik yapı gibi faktörleri dikkate alarak kendi koşullarından sapmadan oluşturacakları özgün stratejilere bağlıdır. Öyleyse, en uygun stratejik yol haritalarını çizerek politikalar geliştirmek için atılması gereken ilk adım dönüşüm yapılacak süreç, birim, organizasyon, sektör, bölge veya ülkelerin mevcut durumunu ortaya çıkarmaktır. Ayrıca, yapılan dönüşümlerden sonra elde edilecek verimlilik kazanımlarında da farklılıklar olması kaçınılmazdır. Dolayısıyla, spesifik örneklerde Endüstri 4.0'ın durumunu, uygulama örneklerini ve Endüstri 4.0 teknolojilerinin üretim süreçlerinde kullanılması dolayısıyla verimlilikte herhangi bir artış olup olmadığını derinlemesine ve kapsamlı bir şekilde inceleyerek ortaya çıkarmanın hem literatüre katkı sağlayacağı hem de olumlu pratik etkiler yaratacağı aşikârdır.

Dönüşüm sürecinde durum tespitleri yaparak yol haritaları hazırlamak için öncelik verilmesi gerekenler dijital olgunluğa sahip, teknolojik ve örgütsel yapısı Endüstri 4.0'a geçişe uygun olan lokomotif sektörlerdir. Bu yüzden, mevcut çalışmada, en büyük rakibinin Endüstri 4.0'ın başat tetikleyicisi olan Çin olduğu, dünyanın en büyük ikinci, Avrupa'nın ise birinci beyaz eşya üreticisi konumunda bulunan, beyaz eşya ihracatında dünya lideri üç ülkeden biri, Türkiye'nin en fazla inovasyon yaratan sektörü ve Türkiye'deki en yüksek dijital olgunluk seviyesine sahip ilk üç sektörden biri olan Türk beyaz eşya sektörüne odaklanılmaktadır (Reel Sektör, 2016; TÜBİTAK, 2017; Özden ve diğerleri, 2019; TradeMap, 2020). Söz konusu topyekûn bir dönüşümü ifade eden Endüstri 4.0 olduğundan, mevcut durumu değer zincirinin farklı katmanlarındaki aktörleri bir arada dikkate alarak ortaya koymak daha iyi çıktılar sağlayacaktır. Güncel bir olgu olan Endüstri 4.0'ı gerçek yaşam bağlamında sorgulamak gerektiği için kullanılacak en uygun yöntem ise durum çalışmasıdır (Yin, 2002: 13). Tüm bunlardan hareketle, bu çalışmanın amacı, durum çalışması yönteminden faydalanarak, Türk beyaz eşya sektöründe faaliyet gösteren iki ana üretici şirket ve ana üreticilerin tedarikçisi konumundaki bir yan sanayi şirketinde Endüstri 4.0'ın mevcut durumunu, uygulama örneklerini, dönüşüm sürecinde elde edilen avantajları ve karşılaşılan zorlukları ve Endüstri 4.0'ın verimliliğe etkisini ortaya çıkarmaktır. Anlaşılacağı üzere, bu makale Endüstri 4.0 dönüşümünün durumunu ve etkilerini tespit etme açısından Türkiye'deki en öncelikli sektörlerden beyaz eşya sektörüne odaklanan, dönüşümü değer zincirinin farklı katmanlarındaki tedarikçi ve ana üreticilerin perspektifinden ortaya koyarak gerçek yaşam bağlamında ve derinlemesine şekilde inceleyen ilk akademik çalışma niteliğindedir.

Bir sonraki bölümde sanayi devrimlerinin tarihçesi, Endüstri 4.0 kavramının doğuşu ve Endüstri 4.0 ile verimlilik ilişkisine dayalı literatür araştırması bulunmaktadır. Takip eden bölümler ise sırasıyla çalışmanın yöntemine, bulgularına ve sonuçlarına ayrılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

İnsanlık, günümüze kadar dört farklı sanayi devrimine tanıklık etmiştir. İlk Sanayi Devrimi, ücretlerin yüksek, sermaye ve enerji maliyetlerinin düşük olması sebebiyle Büyük Britanya'da ortaya çıkmıştır (Allen,

2009: 135-144). Makineleşme dönemi olarak da bilinen Birinci Sanayi Devrimi'yle birlikte, eski moda aile işletmeleri ve küçük üretim tesisleri yerlerini büyük fabrikalara bırakmıştır. 18. ve 19. yüzyıllar arasındaki bu dönemde üretimde makinelerin yaygınlaşmasında buhar gücü ve kömürün önemli rolü yadsınamaz. Dahası, buhar, kömür ve demirin birlikte kullanılmasıyla demiryolları da gelişmiş ve üretilen ürünleri ve ham maddeleri Avrupa'nın çeşitli yerlerine taşımak ve sanayi devrimini Avrupa'ya yaymak mümkün olmuştur. Böylelikle, dünya, "daha küçük ve daha entegre" bir yer olmaya başlamıştır (Siemens, 2016: 5). Bu dönemde, fabrikalarda çalıştırmak üzere vasıfsız iş gücüne olan ihtiyaç arttığı için kırsalda yaşayan insanlar kentlere göç etmeye başlamışlardır (Siemens, 2016: 5; Özdoğan, 2018: 9).

1870'lerde, elektrikli makinelerin yaygın biçimde kullanılmasıyla birlikte otomasyona geçişin olanaklı hale geldiği İkinci Sanayi Devrimi başlamıştır. Henry Ford'un seri üretim sistemleri, yağ bazlı içten yanmalı motorlar ve elektrik, İkinci Sanayi Devrimi'nin en önemli tetikleyicileridir. Büyük Britanya'nın sanayideki liderliği, seri üretimdeki başarılarından ötürü ABD'ye geçmiştir (Gür ve diğerleri, 2017: 59). Bu dönemde, telefon, radyo, daktilo ve ucuz gazete kâğıdı gibi yenilik ve gelişmeler sayesinde iletişim de hızlanmıştır (Siemens, 2016: 6). 1920'de, ABD tarihinde ilk kez kentlerde yaşayan nüfus kırsalda yaşayan nüfusu geçmiştir.

20. yüzyılın son çeyreğinde ortaya çıkan Üçüncü Sanayi Devrimi ile dünya "düzleşme süreci"ne girmiştir (Friedman, 2005: 8). II. Dünya Savaşı sonrasında elektronik ile bilgi ve iletişim teknolojilerinin gelişmesiyle yaratılan Programlanabilir Lojik Kontrolör sayesinde, üretimde otomasyon bir adım ileriye taşınmıştır (Siemens, 2016: 6). Üretimdeki bu ilerlemeler, gelişmiş ülkelerde üretim fazlasına sebep olmuş (Siemens, 2016: 7) ve gelişmiş ülkeler ise çareyi üretim tesislerini ucuz iş gücü, düşük vergi oranları ve sıkı olmayan yasal düzenlemelere sahip gelişmekte olan ülkelere taşımakta bulmuştur (Gür ve diğerleri, 2017: 63). Üçüncü Sanayi Devrimi döneminde, özellikle Japonya tarafından takip edilen sanayileşme stratejileri ve alternatif yönetim yaklaşımları popüler hale gelmiştir. Özetle, toplam kalite yönetimi ya da tam zamanında üretim gibi kavramlar değer kazanırken kas gücü yerine beyin gücünün, standartlaşma yerine esnekliğin, dikey organizasyonlar yerine yatay organizasyonların önemli hale geldiği yönetim yaklaşımları benimsenmeye başlanmıştır (Gür ve diğerleri, 2017: 63).

Bugünkü teknolojik gelişmeler, verimliliğe ciddi katkılar sağlayan üç temel dönemin de (Muhuri ve diğerleri, 2019) geride kalmasına neden olarak dijitalleşme, otomasyon ve bütünleşmiş üretime dayalı yepyeni bir paradigma doğurmuştur (Kagermann ve diğerleri, 2013). Yukarıda bahsedildiği gibi, Üçüncü Sanayi Devrimi boyunca üretim fazlasının ortaya çıkması sebebiyle gelişmiş ülkelerin üretim ve teknik bilgi birikimleri daha az gelişmiş olan ülkelere kaydırılmıştır. Ne var ki, 2008 yılındaki küresel finansal kriz, reel ekonominin önemini bir kez daha göstermiş ve gelişmiş ülkeleri ekonomik korumacılık ve yeniden sanayileşme stratejilerine yönlendirmiştir (Fırat, 2016; Gür ve diğerleri, 2017: 42-49). Refahın Batı'dan Doğu'ya doğru kaymaya başlamasının yaratacağı tehlikenin farkına varan ve gelişmekte olan ülkelerin emek yoğun üretim kapasiteleriyle aynı şekilde mücadele etmeleri mümkün olmayan gelişmiş ülkelerin, sanayisizleşme eğiliminden kurtulmak üzere teknolojik gelişmeleri ön plana çıkarmışlardır (Gür ve diğerleri, 2017: 48-49). Teknolojik gelişmeler, üretim maliyetlerinin azalmasını sağlayarak üretimin tekrardan menşee ülke içerisine çekilmesine olanak tanımıştır (Barbieri ve diğerleri, 2018). Ayrıca, üretimin menşee ülkeye taşınması, müşteri pazarına yaklaşma ile taşıma maliyetlerinin ve müşterinin ürün için beklediği sürenin azalmasını mümkün kılmıştır (Ford, 2018: 27-28). Sırasıyla, Avrupa, ABD, Japonya ve Güney Kore gibi ülkeler önceki sanayi devrimlerinin başat aktörleriyken, Dördüncü Sanayi Devrimi'nin tetikleyicilerinin başta Çin olmak üzere gelişmekte olan ülkeler olduğu söylenebilir (Li ve diğerleri, 2016). Anlaşılacağı üzere, gelişmekte olan ülkelere karşı rekabet gücünü kaybetmeyi göze alamayan gelişmiş ülkeler, yerli üretime geçmeye ve küresel rekabet güçlerini artırmak amacıyla ulusal projelerini hayata geçirmeye başlamışlardır. Örneğin, Eski ABD Başkanı Obama, ABD'nin İleri İmalat Ortaklığı (Advanced Manufacturing Partnership) girişiminin açılış konuşmasında, Amerikan imalatında rönesansın fitilini ateşlemek ve Amerikan üreticilerin dünyayla rekabet etmelerini sağlamak için gereken en ileri araçları geliştirmek amacıyla, özel sektör, üniversiteleri ve hükümeti bir araya gelmeye davet etmiş ve bu kilit yatırımlar sayesinde ABD'nin yerli icat ve üretim yapan bir ülke olarak kalmasının ve Amerikan işçiler için yüksek kaliteli ve iyi ücretli işler yaratılmasının kritik olduğunu bildirmiştir (Obamawhitehouse, 2011).

Bahsi geçen ulusal girişimlerden bir diğeri ise 2011 yılında Hannover Messe Ticaret Fuarı'nda Federal Almanya Eğitim ve Araştırma Bakanlığının "Gelecek Projesi" adı verilen on projesinden biri olarak duyurulan Endüstri 4.0'dır (Almanca: Industrie 4.0) (Ślusarczyk, 2018). 2013 yılında ise Alman Ulusal Bilim ve Mühendislik Akademisinin (acatech) yayımladığı manifesto ile Endüstri 4.0 kavramı için kuramsal bir çerçeve oluşmuştur (Gür ve diğerleri, 2017: 74). Endüstri 4.0 kavramı, yalnızca Almanya'nın ulusal bir projesi olarak değil Dördüncü Sanayi Devrimi'nin başlangıcına işaret eden bir kavram olarak da literatürde kendisine yer bulmuştur. Böylelikle, gelişmiş ülkelerin yanı sıra gelişmekte olan ülkelerin hükümetleri, sanayicileri ve akademisyenleri tarafından da Dördüncü Sanayi Devrimi'ne yönelik stratejiler kurgulanmış

ve teknoloji yol haritaları hazırlanmıştır. Örneğin Çin, tüm bu gelişmelere "Made in China 2025" girişimi ile karşılık vermiştir (Wübbeke ve diğerleri, 2016).

Geçmiş sanayi devrimleri ortaya çıktıktan ve süreç tamamlandıktan sonra birer devrim olarak tanımlanırken, Dördüncü Sanayi Devrimi süreci Endüstri 4.0 kavramının ortaya atılmasıyla başlamıştır. Henüz hiçbir uygulama yapılmamışken, yaşanacak bir dönemin "sanayi devrimi" olarak zikredilmesi Endüstri 4.0'ın verimliliğe etkisini ölçmeyi elzem hale getirmektedir (Backhaus ve Nadarajah, 2019). Literatürdeki birçok çalışmada, Dördüncü Sanayi Devrimi'nin, namıdğer Endüstri 4.0'ın da diğer sanayi devrimleri gibi verimliliği artırması beklenmektedir (Kagermann ve diğerleri, 2013; Lasi ve diğerleri, 2014; Davies, 2015; Rüßmann ve diğerleri, 2015; Walendowski ve diğerleri, 2016: 3, 49; Karre ve diğerleri, 2017; Waibel ve diğerleri, 2017; Fonseca, 2018; Tarasov, 2018; Horváth ve Szabó, 2019). Hatta Endüstri 4.0'ın nihai amacının verimliliği artırmak olduğunu vurgulayan çalışmalar da mevcuttur. Hennies ve Raudjäv (2015), Endüstri 4.0'ın sanayi ülkelerinin ürün ve hizmet verimliliğini artırmak amacıyla sonsuz bir yenilik seliyle karakterize edilen bir döneme girildiğini belirten bir kavram olduğunu ileri sürmektedir. Yeni Zelanda (Hamzeh ve diğerleri, 2018), Brezilya (Dalenogare ve diğerleri, 2018), Çin (Li, 2018), Güney Kore (Chung, 2018), Hindistan (Iyer, 2018) ve Malezya (Faheem ve diğerleri, 2018; Backhaus ve Nadarajah, 2019) gibi birçok gelişmiş ve gelişmekte olan ülkede yapılan çalışmalarda da Endüstri 4.0'ın verimliliğe etkisinin olumlu olduğu ortaya konulmuştur.

Türkiye'de Endüstri 4.0'a ilişkin yapılan çalışmaların genellikle Endüstri 4.0'ın kavramsallaştırılmasına, devrimlerin tarihsel akışına ve kavrama ilişkin trendlere (Aksoy, 2017; Dengiz, 2017; Fırat ve Fırat, 2017; Özsoylu, 2017; Akben ve Avşar, 2018; Bağcı, 2018; Kılıç ve Alkan, 2018; Özdoğan, 2018; Pamuk ve Soysal, 2018; Yıldız, 2018, Kamber ve Bolatan, 2019), Endüstri 4.0 kavramının inovasyon (Bulut ve Akçacı, 2017; Esmer ve Alan, 2019), açık inovasyon (Ovacı, 2017), girişimcilik (Soylu, 2018), sürdürülebilirlik (Toker, 2018), istihdam (Çakır, 2018; Taş, 2018) gibi konularla ilişkisine, dördüncü sanayi devriminin pazarlama (Ertuğrul ve Deniz, 2018), insan kaynakları (Filizöz ve Orhan, 2018; Türkel ve Bozağaç, 2018) ve muhasebe (Demirkan ve Arslan, 2019; Gönen ve Rasgen, 2019) gibi alanlar ve lojistik (Öztemel ve Gürsev, 2018; Saatçioğlu ve diğerleri, 2018; Şekkeli ve Bakan, 2018), turizm (Burak ve Dirican, 2018), otomotiv (Sürmen ve Güler, 2021), mobilya (Öztürk ve Koç, 2017) ve hazır giyim (Yoşumaz ve Özkara, 2019) gibi çeşitli sektörler üzerindeki etkilerine yönelik olduğu görülmektedir. Öte yandan, Türkiye'de Endüstri 4.0'ın mevcut durumunu vaka çalışmalarına dayalı şekilde, ulusal (Koca, 2018), sektörel (Öztemel ve Gürsev, 2018; Saatçioğlu ve diğerleri, 2018) ya da örgütsel (Timurcanday Özmen ve diğerleri, 2019) çapta inceleyerek stratejik yol haritaları çizen çeşitli çalışmalar bulunmasına rağmen Türkiye'nin dijital olgunluk seviyesi en yüksek sektörlerinden biri olan Türk beyaz eşya sektöründeki duruma yönelik herhangi bir durum çalışması bulunmamaktadır.

3. YÖNTEM

3.1. Durum (Vaka) Çalışması Yöntemi

Mevcut makalede vakaları yakından ve derinlemesine anlamak üzere durum çalışması yöntemi tercih edilmiştir. Yin (2002: 13), durum çalışmasını fenomenle bağlam arasındaki sınırların açıkça belli olmadığı durumlarda, güncel bir olgunun gerçek yaşam bağlamında sorgulandığı ve birden fazla kanıt kaynağının kullanıldığı ampirik bir araştırma yöntemi olarak tanımlamaktadır.

Genel kaniya göre durum çalışmalarını içeren nitel araştırma yöntemleri az sayıda kanıtlarla araştırma yapılan, bilimsellikten uzak yöntemler toplamı iken nicel yöntemler veri ve sonuç odaklı olan bilimsel yöntemlerdir. Ne var ki bu düşünce tamamen zamanın gerisinde kalmıştır (Yin, 2002: 10-11; 2017: 5-6) ve nitel yöntemler veri ve sonuç odaklı olabilirken zaman zaman nicel yöntemlerin yetersiz örneklem büyüklüğü ya da iyi tanımlanmamış değişkenler dolayısıyla bilimsellikten uzaklaşması mümkündür. Bu çalışmada, nitel bir araştırma yöntemi olan durum çalışmasının tercih edilmesinin başlıca nedenlerinden biri, nicel yöntemlerin sosyal ve davranışsal konularda kapsamlı ve derinlemesine bir açıklama sağlamak konusunda yetersiz kalmasıdır. Diğer bir deyişle, bilimsel çalışmalarda nicel yöntemlerin kullanılması, kritik verilerin ortaya çıkarılmasını engelleyebilmektedir (Zainal, 2007). Ayrıca, durum çalışmasında vakaların gerçek dünya bağlamında incelenmesi ve verilerin doğal ortamından toplanması tercih edilmektedir (Bromley, 1986: 23).

Yin (2002: 5), durum çalışmasının hangi şartlar altında bir araştırma yöntemi olarak tercih edilebileceğini göstermek üzere yöntemi deney, anket çalışması, arşiv analizi gibi diğer yöntemlerle kıyaslamıştır. Evvela, çalışma betimleyici ve açıklayıcı sorular içeriyorsa, yani "nasıl" ve "niçin" ile başlayan araştırma soruları mevcutsa, durum çalışması yönteminin tercih edilmesi uygundur. İkincisi, durum çalışmaları, deneylerin aksine, davranışsal olayların kontrolü gerekli değilse kullanılır. Son olarak, güncel konulara odaklanılıyorsa, durum çalışmasının seçilmesi isabetli olacaktır.

Yin (2002: 19; 2017: 7), durum çalışması tasarımını tekli ve çoklu olmak üzere ikiye ayırmaktadır. Tekli durum çalışmaları kritiklik, aşırılık, açığa çıkarma gücü ya da boyamsallık gibi nedenlerle seçilirken, çoklu durum çalışmaları vakaların tekrarlamasından ötürü seçilebilir (Zainal, 2007; Yin, 2002: 39-55; 2017: 7-9; Aberdeen, 2013). Durum çalışmaları, anketler gibi tek bir veri kaynağıyla sınırlı değildir. Aksine, iyi tasarlanmış durum çalışmaları birden fazla kaynaktan yararlanmalıdır. Toplanan veriler hem nicel hem de nitel olabilir. Durum çalışması yürütülürken en çok kullanılan altı kaynak, doğrudan gözlem, mülakat, arşiv kayıtları, katılımcı gözlem, belgeler ve fiziksel eserlerdir ve genellikle üç veya daha fazla kaynaktan yararlanmak kanıtların çeşitlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Yin, 2002: 83-108; 2017: 10-11). Üstelik farklı kaynaklardan elde edilen bulgular ile tutarlılık kontrolü yapmak da mümkün olmaktadır (Duneier, 1999: 345-347). Toplanan kanıtları yorumlamayla karıştırmak, durum çalışmasının iyi anlaşılmasına işaret eder. Bunun yerine, veri kaynaklarından toplanan kanıtları sistematik bir şekilde ayrı metinler, tablolar ya da şekiller halinde sunduktan sonra yorumlama aşamasına geçilmelidir (Yin, 2017: 14-15).

Yin'e göre (2002: 3; 2017: 27) durum çalışmaları keşfedici, betimleyici ve açıklayıcı olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Stake (1995: 3-4), durum çalışmalarını içsel, araçsal ve kolektif çalışmalar olarak sınıflandırırken McDonough ve McDonough (1997: 207), yorumlayıcı ve değerlendirici yöntemlerden de bahsetmişlerdir.

3.2. Araştırma Tasarımı

Mevcut makalede Yin (2002, 2017) tarafından önerilen durum çalışması metodolojisi dikkate alınmaktadır. Çağdaş bir olgu olan Endüstri 4.0'ın Türk beyaz eşya sektöründeki durumunu kapsamlı ve derin bir biçimde araştırmak ve yorumlamak üzere keşfedici durum çalışması yöntemi tercih edilmiştir. Şekil 1'de araştırma adımları sunulmaktadır.



Şekil 1. Durum çalışmasının araştırma adımları

Araştırma verileri, yarı-yapılandırılmış mülakatlar, doğrudan gözlemler ve online dokümanlardan elde edilmiştir. Araştırma yöntemi keşfedici durum çalışması olduğundan Endüstri 4.0'a yönelik toplanacak verileri tamamiyle sınırlandırmamak adına yapılandırılmış mülakat formu tercih edilmemiştir. Hazırlanan mülakat sorularının uygunluğu, dördü akademisyen, biri mühendis ve biri yönetici olan altı farklı uzman tarafından kontrol edilmiştir. Mülakat soruları Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Yarı-yapılandırılmış mülakat soruları

<i>Araştırma konusu</i>	<i>Mülakat soruları</i>
Endüstri 4.0 bilgi düzeyi	Endüstri 4.0 kavramıyla daha önce karşılaştınız mı? Endüstri 4.0 ne demektir?
Endüstri 4.0 hazırlık düzeyi	Teknoloji yönetimi İstatistiksel süreç kontrolü ve yalın üretim Dijital dönüşüm seviyesi
Endüstri 4.0 yatırımları	Teknolojiyi nasıl yönetiyorsunuz? Teknoloji yönetimine ayrılmış bir departmanınız var mı? Teknoloji yönetimi ile ilgili ne tür çalışmalar yapmaktasınız? İstatistiksel süreç kontrolü yapıyor musunuz? Şirketinizin yalın üretim olgunluk seviyesi nedir? Dijital dönüşümün hangi seviyesinde olduğunuzu düşünüyorsunuz?
Endüstri 4.0 teknolojileri ve dönüşümden etkilenen imalat süreçleri	Endüstri 4.0 ve dijital dönüşüm için ne tür yatırımlar yaptınız? Bütçenizin ne kadarı Endüstri 4.0 yatırımlarına ayrılmıştır? Bu yatırımlar sonucunda olumlu bir geri dönüş sağladınız mı? Dijital dönüşümden hangi üretim süreçleriniz etkilendi? Bu süreçlerde hangi araç ve teknolojiler kullanılmaktadır? Şirketinizin robot/otomasyon, sensörler, büyük veri/veri analitiği, simülasyon, eklemeli üretim, AR/VR, yapay zekâ, nesnelerin interneti, yatay ve dikey entegrasyon ve bulut gibi Endüstri 4.0 araç, yöntem ve teknolojilerine yönelik politikalarınız nelerdir?
İtici güçler	Şirketinizi Endüstri 4.0'a geçiş yapmaya iten sebepler nelerdir? Endüstri 4.0'a geçiş sizce bir zorunluluk mu yoksa tercih midir? Neden?
Avantajlar	Sizce şirketiniz dijital dönüşümden olumlu etkilendi mi? Dönüşümün sağladığı avantajlar nelerdir?
Engeller/Zorluklar	Endüstri 4.0 uygulamalarının önündeki engeller nelerdir?
Verimlilik	Verimliliğinizin bu süreçte ne kadar arttığını düşünüyorsunuz?

Mülakatlar yapılırken ses kayıt cihazı ile toplanan veriler yazılı hale getirilmiş ve şirketler tarafından kayıt dışı bırakılması istenen gizli bilgiler temizlenmiştir. Mülakatların sonrasında şirketlerin üretim tesisleri gezilerek doğrudan gözlemler yapılmış ve şirketlerin web siteleri, online raporları ve şirketlere yönelik internet haberleri gibi online dokümanlar taranmıştır. Toplanan tüm kanıtlar birbirleriyle kıyaslanarak tutarlılık kontrolleri yapılmış ve tutarlı kanıtlar sorulara göre gruplandırılmıştır. Son olarak, kanıtlar literatüre dayalı şekilde yorumlanarak analiz edilmiştir.

3.3. Görüşülen Şirketler ve Kişiler

Mülakatlar, şirketler ve görüşme yapılan kişilere ilişkin bilgiler Tablo 2'de sunulmaktadır.

Tablo 2. Mülakatlar, ziyaret edilen şirketler ve görüşülen kişilere yönelik bilgiler

<i>Şirket</i>	<i>Tarih</i>	<i>Mülakat Süresi</i> <i>(Kayıt dışı hariç)</i>	<i>Kişi</i>	<i>Görüşülen Kişinin Pozisyonu</i>
X	15 Ocak 2019	01:59:35	A	Şirket Ortağı ve Genel Müdür
Y	16 Ocak 2019	02:41:49	B	Akıllı Üretim Sistemleri ve Robotik Yöneticisi
	17 Ocak 2019	01:40:39	C	Üretim Teknolojileri Kıdemli Uzmanı
Z	30 Mart 2019	03:42:46	D	Teknik Yönetici / Otomasyon ve IT Uzmanı
			E	Otomasyon ve Projeler Geliştirme Müdürü
			F	Makine Tasarım ve Uygulama Uzmanı
			G	Makine Tasarım ve Uygulama Uzmanı
			H	Otomasyon Projeleri Uzmanı
			I	Merkezi Metot Sorumlusu

Şirket X: 25 yıldır faaliyet gösteren şirket, komple yanma sistemleri, bek şapkaları, cezvelik ve kahve makinesi için pişirme haznesi gibi diğer metal parçalar üretmekte ve Avrupa ve diğer kıtalardaki 15 ülkeye ihracat yapmaktadır. Yaklaşık 160 çalışanıyla bir KOBİ olan X, yanma sistemlerinin tüm parçalarını %100 yerli sermaye ile üretebilen ilk ve tek Türk üreticisi konumundadır. 15 Ocak 2019'da şirketin Genel Müdürü (A) ile yaklaşık iki saat süren bir görüşme yapılmıştır.

Şirket Y: 65 yıl önce kurulmuş olan Y'nin dünya çapında 30.000'den fazla çalışanı ve sekiz farklı ülkede 22 üretim tesisi bulunmaktadır. Yaklaşık 150 ülkeye ürün ve hizmet sunan şirket, beyaz eşya, ankastre ürünler, küçük ev aletleri, ısıtma-havalandırma ve iklimlendirme ürünleri, tüketici elektroniği ürünleri ve komponentlerin üretimlerini yapmaktadır. Y, Türkiye'de sektör lideri, Avrupa'da ise toplam satışlarda ikinci

beyaz eşya markasıdır. Mülakat için şirketin hem Üretim Teknolojileri ve Endüstri 4.0 Departmanı hem de çamaşır makinesi üretim tesisi ziyaret edilmiştir. Bu nedenle görüşmeler Tablo 2’de Y1 ve Y2 olarak gruplandırılmıştır. Üretim Teknolojileri ve Endüstri 4.0 Departmanı, üretimde kullanılan Endüstri 4.0 teknolojilerini araştıran ve en son üretim teknolojilerinin şirket tesislerinde kullanımına yönelik çalışmalar yürüten merkezi bir departman niteliğindedir. Y’nin bu departmanı 16 Ocak 2019 tarihinde ziyaret edilmiş ve Üretim Teknolojileri ve Endüstri 4.0 Yöneticisi (B) ve Üretim Teknolojileri Kıdemli Uzmanı (C) ile görüşülmüştür. Görüşme iki saat 42 dakika sürmüştür. Şirketin çamaşır makinesi tesisinde ise yaklaşık 1900 operatör ve 250 ofis çalışanı bulunmaktadır. Tesiste 17 Ocak 2019’da Teknik Yönetici (D) ile bir saat 40 dakika süren bir mülakat gerçekleştirilmiştir.

Şirket Z: Beyaz eşya, ankastre ürünler, klima ve ısıtıcılar, küçük ev aletleri, mobil cihaz ve tüketici elektroniği kategorilerinde üretim yapan ve 16.000’den fazla çalışanı bulunan Z, 155 farklı ülkeye ürünlerini ihraç etmektedir. Beyaz eşyada, Avrupa’nın ilk beş, Türkiye’nin ise ilk üç üreticisinden biri olan şirket, Avrupa’nın tek yerleşkede üretim yapan en büyük üretim tesislerinden birine sahiptir. 30 Mart 2019’da şirketin Otomasyon ve Projeler Geliştirme Departmanı ziyaret edilmiş ve yaklaşık üç saat 43 dakika süren bir görüşme gerçekleştirilmiştir. Organizasyon şemasında doğrudan Genel Müdürlük altında olan departman, şirketin yedi fabrikasına merkezi bir departman olarak hizmet vermekte ve Endüstri 4.0 teknolojilerine yönelik projeleri uygulamaktadır. Departman, yatırım, metot ve otomasyon olmak üzere üç birimden oluşmaktadır. Mülakata departmanın beş farklı çalışanı ekip olarak katılım sağlamıştır. Görüşülen kişiler, üç birime de liderlik eden Otomasyon ve Projeler Geliştirme Müdürü (E), otomasyon biriminden iki Makine Tasarım ve Uygulama Uzmanı (F ve G) ve bir Otomasyon Projeleri Uzmanı (H) ile metot biriminden Merkezi Metot Sorumlusudur (I). Mülakattan sonra, araştırmacıya şirketin Endüstri 4.0 projelerini tanıtan bir video izletilmiştir.

4. BULGULAR

4.1. Endüstri 4.0 Bilgi Düzeyi

Her üç şirketin de Endüstri 4.0 kavramına aşina olduğu ve özellikle son iki yılda Endüstri 4.0 uygulamalarını artırdıkları görülmüştür. X, Y2 ve Z şirketlerinde görüşülen kişiler Endüstri 4.0’ı tanımlarken kavramın teknik boyutuna vurgu yapmışlardır. A, Endüstri 4.0’ı, “şu anda kullandığımız ya da kullanacağımız teknolojilerin birbirleriyle iletişim kurması ve bizim de bu iletişimi izleyebilmemiz” olarak tanımlarken, E’ye göre Endüstri 4.0, “tedarikçilerden müşterilere kadar tüm sürecin otomatize edilerek izlenebilir, birbirine bağlı ve kontrol edilebilir bir hale getirilmesi ve karşılaşılabilecek hataların önceden görülebilmesi”dir. Öte yandan, D, “insan gücüyle yapılan işlerin otomatize edilmesi, otomatik sistemlerden sensörler veya diğer teknolojiler aracılığıyla bilgi toplanması ve toplanan bu bilgilerin ürün kalitesini ve verimliliği artırırken maliyetlerin düşürülmesi amacıyla kullanılması” şeklinde bir tanım yapmıştır. Bu tanımlar, literatürdeki tanımlarla paralellik göstermektedir. Oesterreich ve Teuteberg (2016), Endüstri 4.0’ı “sayısallaştırma, otomasyon ve bilgi ve iletişim teknolojilerinin üretimde kullanılmasına ilişkin bir trend” olarak tanımlamaktadır. Şu ana kadar herkes tarafından kabul edilen bir Endüstri 4.0 tanımı olmamasına rağmen (Götz ve Jankowska, 2017; Lu, 2017), her üç şirketin de kavramı teknik bir yaklaşımla tariflendikleri ileri sürülebilir. Öte yandan, kavramın verimlilik ile doğrudan ilişkisine vurgu yapan yalnızca D olmuştur. B’ye göre ise, Endüstri 4.0 “Alman Hükümeti ve Avrupa Birliği tarafından yaratılmış bir marka”dır ve Endüstri 4.0, bütünsel bir kalkınma stratejisi ve kapsamlı sosyoekonomik, politik ve teknolojik bir kavram olması hasebiyle teknik boyutu ön plana çıkaran tanımlar yetersiz kalmaktadır. Nitekim birçok raporda ve akademik araştırmada da Endüstri 4.0 bir marka olarak anılmaktadır (Glas ve Kleeman, 2016; Huchler, 2017; Bıba, 2018; Germany Trade and Invest, 2018; Kheyfets ve Chernova, 2019). Benzer bir bulgu olarak, Endüstri 4.0’ın tedarik yönetimi üzerindeki etkilerine ilişkin bir çalışmada mülakat uygulanan iki katılımcı kavramın bir “marka ve moda sözcük” olduğunu ileri sürmüştür (Glas ve Kleeman, 2016).

Üretim Teknolojileri ve Endüstri 4.0 Yöneticisi olan B, Endüstri 4.0’ın yaratılmasının yalnızca gelişmiş ülkelere değil gelişmekte olan ülkelere de fayda sağlayacağı inancındadır. Çünkü kavram, gelişmekte olan ülkeleri sanayileşmiş ve gelişmiş ülkelere teknolojik açıdan bağımlı olmanın artık oldukça riskli bir durum haline geldiğini fark ederek yerli üretime odaklanmaya itmektedir. Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Teşkilatının bir raporunda, şayet teknolojik öğrenme ve inovasyona değer vererek teknolojik değişimlere ayak uydururlarsa, Endüstri 4.0’ın gelişmekte olan ülkeler için de bir fırsat yaratacağı vurgulanmaktadır (UNIDO, 2018). Bir başka makalede, Dördüncü Sanayi Devrimi’nin yarattığı fırsat sayesinde, gelişmekte olan ülkelerin yükselen teknolojileri benimserlerse gelişim aşamalarını hızla atlayıp gelişmiş ülkelerle rekabet etmelerinin mümkün olduğu belirtilmektedir (Manda ve Ben Dhaou, 2019).

4.2. Endüstri 4.0 Hazırlık Düzeyi

Birtakım sorular ile şirketlerin Endüstri 4.0 dönüşümüne ne derece hazır olduğu ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır. İlk soru şirketlerin teknolojiyi nasıl yönettiğine ilişkindir. Bir KOBİ olan X'in teknoloji yönetimine ayrılmış bir departmanı bulunmamakta, ancak şirket, Endüstri 4.0 çözümleri üreten kardeş şirketinden destek almaktadır. Ayrıca, teknolojik gelişmeleri takip etmek için Türkiye, Avrupa, ABD ve Çin gibi ülkelerde düzenlenen fuarlara katılım sağlamaktadır. Endüstri 4.0 kavramının ilk kez Hannover Messe Ticaret Fuarı'nda ortaya atıldığı düşünüldüğünde (Safar ve diğerleri, 2018), teknolojik gündemi takip etmek için fuar katılımlarının uygun bir yol olduğu söylenebilir. Y'de, söz konusu teknoloji yönetimi olduğunda, Ar-Ge ve ürün geliştirme arasındaki farkı anlamanın önemine değinilmiştir. Şirketin çamaşır makinesi, buzdolabı, bulaşık makinesi gibi tüm işletmelerinde ayrı ayrı Ar-Ge departmanı bulunmaktadır. Tüm bu Ar-Ge birimleri ise merkezi bir Ar-Ge departmanının altında toplanmaktadır. Şirkette teknolojik trendleri araştıran ve araştırma sonuçlarını Ar-Ge departmanı ile paylaşan merkezi bir üretim teknolojisi departmanı da mevcuttur. Tüm bunların yanı sıra, şirketin Tayvan, Cambridge, Silikon Vadisi ve Çin'de çeşitli Ar-Ge ofisleri bulunmaktadır. Bir diğer teknoloji yönetimi stratejisi olarak, farklı ülkelerden profesörlerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan danışma kurulu her yıl toplanmakta ve şirkete öneriler sunmaktadır. Endüstri 4.0 kavramının sanayiye transferi için bilimsel bir danışma kurulunun oluşturulması yoluyla sektör ve bilim kurulları arasındaki iş birliklerinin sağlanması başvurulacak önemli yöntemlerdendir (Anderl, 2014). Y'de yapılan kritik değişikliklerden biri de geleneksel yönetim sistemlerinde finans departmanının altında bulunan Bilgi Teknolojileri (BT) biriminin şirketin dijital dönüşüm ofisine bağlanmış olmasıdır. Y'de, dünya çapındaki Ar-Ge ofisleri, akademisyenlerden oluşan danışma kurulu, organizasyon şemasında merkezi dijital dönüşüm departmanının altında yer alan BT departmanı haricinde, söz konusu teknoloji yönetimi olduğunda, GPO (Global Process Owner) yapısından ve karar alma süreçlerine genç çalışanların dâhil edilmesinden de bahsedilmiştir. Literatürdeki çalışmalar, genç çalışanları karar alma süreçlerine dâhil etmenin ne kadar kritik olduğunu göstermektedir. Özellikle, Y kuşağı için yeni liderlik tarzları (Suyanto ve diğerleri, 2019; Sarwono ve Bernarto, 2020), kişisel değer analizi (Črešnar ve Jevšenak, 2019; Črešnar, 2020), Endüstri 4.0 döneminde Y kuşağının çalışma ortamında ortaya çıkabilecek fırsatlar ve zorluklar (Sindhuja ve Akhilesh, 2020) gibi konulara araştırmacılar tarafından odaklanılmalıdır. Y'nin teknoloji yönetim sürecinde karşılaştığı en büyük zorluk BT ve operasyon teknolojileri arasındaki iletişim sorunlarıdır. İki taraf bir araya geldiğinde aynı dili konuşmadığından hem teknik hem de operasyonel bilgiye sahip kişilere ihtiyaç vardır. Bu kişiler literatürde "analitik çevirmenler" olarak kavramsallaştırılmıştır ve analitik çevirmenler, veri uzmanlarının teknik bilgisi ile pazarlama, üretim ve tedarik zinciri gibi ön saflardaki yöneticilerin operasyonel bilgileri arasında bağlantı kurmaktan sorumludurlar (Henke ve diğerleri, 2018: 2). Üniversitelerin yeni bölümler açarken veya mevcut bölüm programlarını güncellerken bahsedilen yetkinliği göz önünde bulundurması önem arz etmektedir. Y'ye göre bir diğer çözüm ise genellikle bilgi teknolojilerine ilişkin işlerde çalışan bilgisayar mühendislerinin ve benzer alanlardan kişilerin üretimde istihdamını sağlamaktır. Ürün ve üretim teknolojileri için ayrı merkezi departmanlara sahip olan Z'de görüşülen kişiler de teknolojik gelişmeleri sürekli takip ettiklerini göstermek üzere inovasyon ve tasarım ödüllü alan ürünlerinden ve dünyaca ünlü şirketlerle yaptıkları ortaklıklardan bahsetmişlerdir.

Üç şirket de uzun yıllardır istatistiksel süreç kontrolü yapmakta ve en az iki yıldır yalın üretim ilkelerine bağlı kalmaktadır. Şirketlerin tümü dijital dönüşüme hazır olduklarına ve geçiş sürecinde belli ilerlemeler kaydettiklerine inanmaktadır. Literatürde de belirtildiği gibi, yalın üretim, Endüstri 4.0'a hazır olmanın bir ön koşuludur (Kaspar ve Schneider, 2015; Tschandl ve Mallaschitz, 2016; von Haartman ve diğerleri, 2016). Bazı araştırmacılar ise Endüstri 4.0 olgunluk seviyesini artırmanın yalın üretim olgunluk seviyesini artırdığını belirtmektedir (Kolberg ve Zühlke, 2015; Roy ve diğerleri, 2015; Rüttimann ve Stöckli, 2016; Wagner ve diğerleri, 2017). Öyleyse, Endüstri 4.0 yalın üretimi, yalın üretim ise Endüstri 4.0'ı olgunlaştırmaktadır. Şirketler yalın üretim uygulamaları sayesinde verimlilik artışı ve dolayısıyla, rekabet avantajı elde ettiklerini bildirmişlerdir. Bilhassa, Z, organizasyon yapısının her seviyesindeki çalışanlarına yalın üretim eğitimi vererek yalınlığı şirket çapında bir kültür haline getirmiştir. Tesis gezileri esnasında Z'nin tüm tesislerinin duvarlarında yalınlığa ilişkin posterler olması dikkat çekmiştir. Şirket ayrıca iki kez TVB (Toplam Verimli Bakım) özel ödülüne layık görülmüştür.

4.3. Endüstri 4.0 Yatırımları

Şirketlere yöneltilen bazı sorular da Endüstri 4.0 yatırımlarına ilişkindir. Tüm şirketler Endüstri 4.0 dönüşümüne kısa ve uzun vadeli yatırımlar yapmıştır. A ve B, başlangıçtaki hızlı ve plansız bazı yatırımlarından dolayı şirketlerinin zarar gördüğünü belirtmişlerdir. X'te, 2017 yılından bu yana Endüstri 4.0 dönüşümüne yatırım yapılmakta ve toplam bütçenin %10'u Endüstri 4.0 yatırımlarına ayrılmaktadır. X'in kısa vadeli yatırımlardan sağladığı en önemli avantaj, kalitenin ve verimliliğin artmasıyla maliyetlerin düşürülmüş olmasıdır. Y'den B, Endüstri 4.0 özel bir bütçe kalemi olarak düşünüldüğünde toplam bütçelerinin %2'sini Endüstri 4.0 yatırımlarına ayırdıklarını ama tüm yatırımlarının dolaylı olarak Endüstri 4.0'a yönelik olduğunu ileri sürmüştür. Verilen yatırım kararlarından bazıları şirketin Romanya'da kurduğu yeni fabrika ve mevcut fabrikalarında kurulan donanım hızlandırma merkezi, denetim laboratuvarı, üniversite-sanayi iş birliği içerisinde yeni projeler geliştirme imkânı sunan Endüstri 4.0 atölyesi, veri toplama

sistemi, fonksiyon testi ve üç boyutlu tarayıcılardır. Y'de yatırım kararı verilirken önceliklendirme matrisinden faydalanılmaktadır ve fabrikalarda kurulacak yeni sistemler ilk olarak laboratuvarında test edilmektedir. Yapılan yatırımlar sayesinde, şirketin ürün kalitesi artmış ve hata oranları azalmıştır. Z'den görüşülen kişilere göre, şirkette Endüstri 4.0'a yapılan en önemli yatırım Otomasyon ve Projeler Geliştirme Departmanının kurulmuş olmasıdır. Şirkette Endüstri 4.0 için eğitim yatırımlarına da önem verilmektedir. E'ye göre, tamamlanan tüm projelerin sonuçları olumludur.

4.4. Endüstri 4.0 Teknolojileri ve Dönüşümden Etkilenen İmalat Süreçleri

Bazı mülakat soruları dijital dönüşümden hangi imalat süreçlerinin etkilendiği, bu süreçlerde hangi teknolojilerin kullanıldığı ve şirketlerin Endüstri 4.0 araç ve teknolojilerine yönelik politikalarının neler olduğu ile ilgilidir. Şirketlerin tümü, Endüstri 4.0'dan etkilenen imalat süreçlerine ve kullanılan teknolojilere yönelik sorulara benzer yanıtlar vermiştir. Şirketler aynı sektörde faaliyet gösterse de üretim girdi ve çıktılarının veyahut fabrika yerleşiminin farklı olması gibi nedenlerle şirketlerin üretim süreçleri farklılık göstermektedir. Bu nedenle her şirket bahsi geçen soruları üretim süreçlerini istedikleri şekilde gruplara ayırarak yanıtlamıştır. X'in tüm üretim süreci, altı alt süreçten oluşmaktadır: Kalıp, talaş kaldırma, kumlama, montaj, kontrol ve paketleme. Ana üreticiler olan Y ve Z ise üretim süreçlerini plastik üretim, mekanik üretim, montaj ve boya alt süreçlerine ayırmıştır. Tablo 3-4-5, X, Y ve Z'nin üretim süreçlerinde kullanılan teknolojileri göstermektedir.

Tablo 3. X'in üretim süreçlerinde kullanılan Endüstri 4.0 teknolojileri

Şirket X	Kalıp	Talaş Kaldırma	Kumlama	Montaj	Kontrol	Paket	Not
Robot/otomasyon	-	+	-	+	+	-	
Sensör/aktüatör	+	+	-	+	+	-	
Büyük veri/veri analitiği	+	+	+	+	+	+	
Simülasyon	+	+	+	+	+	+	
Eklemeli üretim	-	-	-	-	-	-	Plan yok.
Sanallaştırma teknolojileri (AR/VR)	-	-	-	-	-	-	Pilot proje
Yapay zekâ	-	-	-	-	-	-	TRL düşük
Bulut teknolojileri	+	+	+	+	+	+	

Tablo 4. Y'nin üretim süreçlerinde kullanılan Endüstri 4.0 teknolojileri

Şirket Y	Mekanik				Not
	Plastik Üretim	Üretim	Montaj	Boya	
Robot/otomasyon	1	1	1	1	
Sensör/aktüatör	1	1	1	2	
Büyük veri/veri analitiği	3	2	1	2	
Simülasyon	2 (akış simülasyonu)	2	2	4	
Eklemeli üretim	4	4	4	4	Ar-Ge'de prototipleme için kullanılmaktadır.
Sanallaştırma teknolojileri (AR/VR)	4	4	4	4	Pilot proje yapılmıştır ama kullanılmamaktadır.
Yapay zekâ	4	4	4	4	
Bulut teknolojileri	1	1	1	1	Amazon ve Microsoft Azure çok kısıtlı kullanılıyor. Kendi bulut sistemleri var.

Not: 1.Yaygınlaşıyor, 2.Uygulanıyor, 3.Pilot projede, 4.Kullanılamaz/uygun değil

Tablo 5. Z'nin üretim süreçlerinde kullanılan Endüstri 4.0 teknolojileri

Şirket Z	Plastik	Mekanik	Montaj	Boya	Not
----------	---------	---------	--------	------	-----

	Üretim	Üretim		
Robot/otomasyon	+	+	+	+
Sensör/aktüatör	+	+	+	+
Büyük veri/veri analitiği	+	+	+	+
Simülasyon	+	+	+	+
Eklemeli üretim	+	+	+	+
Sanallaştırma teknolojileri (AR/VR)	Pilot proje	+	+	Pilot proje Eğitim amacıyla kullanılmaktadır.
Yapay zekâ	+	+	+	+
Bulut teknolojileri	+	+	+	+

A ve B, yapay zekânın teknoloji hazırlık düzeyinin (TRL) oldukça düşük olduğuna inandıkları için üretim süreçlerinde yapay zekâ teknolojilerini kullanmadıklarını belirtmişlerdir. Öte yandan E, tüm üretim süreçlerinde yapay zekâ kullandıklarını söylemiştir. Şirketler arasındaki bu farklılığın nedeni, yapay zekâyı farklı şekillerde kavramsallaştırmalarıdır. Örneğin Yudkowsky (2008) ve Bostrom ve Yudkowsky (2014) yapay zekâyı insan zihnine kıyasla çok geniş bir olasılık alanı olarak ifade ederken, Zhang ve diğerleri (2017), kavramı bilgisayarların sergilediği zekilik olarak tanımlamaktadır. Chou ve diğerleri (2013) tarafından yapılan bir başka tanıma göre yapay zekâ, karmaşık ve zayıf yapılandırılmış problemlerin üstesinden gelmek için yapay sinir ağları ve destek vektör makineleri gibi araçlardan yararlanan bilgi işlem teknolojileri anlamına gelmektedir. Anlaşılabileceği üzere Z'de yapay zekâ insan zihninin mevcut araç, yöntem ve teknolojilerle belli bir oranda taklit edilmesi olarak algılanırken, diğer şirketlere göre yapay zekânın insan zihnini taklit etmek için daha ileri düzeyde olması gerekmektedir.

Y ve Z, eklemeli üretimi prototipleme amacıyla kullanmaktadır. ABD Patent Ofisindeki kayıtların incelenerek eklemeli üretimin köklerinin araştırıldığı bir çalışmada, eklemeli üretimin 40 yıllık bir tarihinin olduğu ortaya çıkarılmıştır (Bourell ve diğerleri, 2009). 3D baskı, hızlı prototipleme veya katı serbest form imalatı gibi isimlerle de anılan eklemeli üretim (Hughes ve Wilson, 2015), Y'de de 20 yıldır prototipleme için kullanılmaktadır. Y'nin çamaşır makinesi tesisinin Teknik Müdürü olan D, eklemeli üretimin büyük parçaların üretiminde kullanıldığı takdirde maliyeti artıracacağı için beyaz eşya üretimine uygun olmadığını belirtmiştir. Eklemeli üretim, seri üretim yapıldığında, düşük yüzey kalitesi, maliyet ve boyut sınırlamaları gibi nedenlerle geleneksel imalat teknikleriyle rekabet edememektedir (Prakash ve diğerleri, 2018). A ise, eklemeli üretimin bir gereklilik olduğuna inanmamaktadır.

X ve Y'de sanallaştırma (AR/VR) teknolojileri için pilot projeler yürütülmüş ve bu teknolojilere beyaz eşya üretiminde ihtiyaç olmadığına kanaat getirilmiştir. B'ye göre AR/VR teknolojileri yalnızca pazarlama amacıyla kullanılan görsel araçlardan ibarettir. Öte yandan, Z'nin üretim tesisleri birincil gelir kaynağı tarım olan bir şehirde kurulu olduğundan, mavi yakalı çalışanların personel devir oranı bir hayli yüksektir ve çalışan eğitimi, zaman alıcı ve maliyetlidir. Bu nedenle AR/VR teknolojileri çalışanları eğitmek için kullanılmaktadır. Şirketin plastik üretim ve boyama süreçlerinde ise AR/VR teknolojilerinin kullanımına yönelik pilot projeler başlatılmıştır.

Robot ve otomasyon, sensörler/aktüatörler, büyük veri ve veri analitiği, simülasyon ve bulut teknolojileri, üç şirketin de üretim süreçlerinde kullanılmaktadır. Yapılan görüşmeler ve gözlemler sırasında, tüm şirketlerin ana odağının veri toplama ve analitik olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca orta ölçekli bir şirket olan X'in Genel Müdürü, simülasyon araçlarının düşük maliyetli olduğunu düşünmekte ve simülasyonun şirketleri çok sayıda robot satın almaktan kurtardığını iddia etmektedir. X, Türkiye'de önde gelen bir üniversitenin İşletme Mühendisliği Bölümünde verilen simülasyon dersine öncülük etmektedir. Literatürdeki bazı çalışmalarda da simülasyon araçlarının KOBİ'ler için gerekli olduğu belirtilmekte ve üniversitelerin mühendislik bölümlerinde simülasyon derslerinin açılması önerilmektedir (De Vin ve Jägstam, 2001). Y kendi bulut sistemine ve farklı ülkelerden robotları içinde toplayan gelişmiş bir robotik laboratuvarına sahiptir. X de robotik yatırımlarını artırmayı planlamaktadır.

Dikkat çeken bir konu, nesnelerin interneti (IoT) denilince tüm şirketlerin tüketici IoT'sini düşünmesidir. Oysa IoT, hem şirketlerin ürün ve hizmet sağlamak için kullandığı üretim araçlarından oluşan endüstriyel nesnelerin internetini (IIoT) hem de tüketici için üretilen akıllı cihazlardan oluşan tüketici IoT'sini içerir (McKnight, 2016; Ferrari ve diğerleri, 2018). Y, merkezi Ar-Ge departmanına bağlı bir IoT birimine sahiptir. Dahası, Y ve Z tarafından üretilen ürünlerin internete bağlanabilen ve kablosuz iletişim kurabilen akıllı versiyonları bulunmaktadır. Dikkate değer bir diğer konu ise yatay ve dikey entegrasyona yönelik politikalar sorulduğunda, Y ve Z'nin tedarikçisi olan X'in son kullanıcılarla herhangi bir etkileşiminin olmadığını anlaşılmıştır. Çünkü X'in Y ve Z gibi müşterileri, son kullanıcı verilerini ve geri bildirimlerini X ile paylaşmamaktadır. X ise müşteri geri bildirimlerine ulaşmak için çözüm olarak sikayetvar.com gibi platformları takip etmekte veya ana üreticilerin yetkili servislerini ziyaret etmektedir. Benzer şekilde, B de müşteri-tedarikçi ilişkilerinin etkin bir şekilde yönetildiği bir platformlarının bulunmadığını belirtmiştir. Ne var

ki, tedarik zinciri boyunca bilgi paylaşımının yapılması, bilgi asimetrisini azaltmakta, tedarik zincirinin iş birliği kapasitesini geliştirmekte, müşteri ilişkilerini güçlendirmekte, rekabet avantajı sağlamakta ve iş performansını artırmaktadır (Bâr ve diğerleri, 2018; Hsu ve diğerleri, 2008; Liu, 2018; Skylar ve diğerleri, 2019; Şahin ve Topal, 2019).

4.5. İtici Güçler

X'in Genel Müdürü Endüstri 4.0'a geçişin bir zorunluluk olduğuna inanmaktadır ve müşteriler tarafından tercih edilmenin en büyük motivasyon olduğunu bildirmiştir. Y'nin Üretim Teknolojileri ve Endüstri 4.0 Yöneticisi ise küresel bir oyuncunun rekabet ortamında teknolojiye ayak uydurmaktan başka bir seçeneğinin olmadığını ve Endüstri 4.0'a geçişteki ana itici güçlerin şirketin hayatta kalması, dağılıma korkusu, küreselleşme ve rakipler olduğunu belirtmiştir. Y'nin Teknik Müdürü'ne göre ise Endüstri 4.0 dönüşümü için harekete geçmeyenler Darwin'in doğal seçim kavramında olduğu gibi önünde sonunda ortadan kalkacaktır ve şirketin Endüstri 4.0'a geçişteki temel motivasyonları maliyet düşürme, kalite iyileştirme, Çinli rakiplerin gerisinde kalmama ve dolayısıyla kâr sağlamadır. Şaşırtıcı bir şekilde, Z'den görüşülen kişiler Endüstri 4.0'a geçişin henüz bir zorunluluk olmadığı inancındadır. Şirketin dönüşümdeki itici güçleri, üst yönetimin desteği, finansal destekler, maliyetin düşürülmesi ve kalitenin artırılmasıdır. Elde edilen bulguların literatürdeki bulgularla benzer olduğu görülmüştür. Horváth ve Szabó (2019), Endüstri 4.0'ın itici güçlerini insan kaynakları, finansal kaynaklar ve kârlılık, piyasa koşulları ve rakipler, yönetim beklentileri, verimlilik ve etkinlik ile müşteri memnuniyeti olarak sınıflandırmaktadır. İnsan kaynakları haricindeki tüm bu itici güçler, mülakat yapılan kişilerce de dile getirilmiştir. Öte yandan, insan kaynakları ve müşteri memnuniyetine ilişkin itici güçler KOBİ'leri büyük şirketlerden daha fazla etkilemektedir (Horváth ve Szabó, 2019) ve müşteriler tarafından tercih edilmeyi yalnızca X bir itici güç olarak görmektedir.

4.6. Avantajlar

Her üç şirkette de Endüstri 4.0'ın etkisinin olumlu olacağı düşünülmektedir. Endüstri 4.0'a geçişin şirketlere sağladığı avantajlar sorulduğunda A, aynı zamanda itici bir güç olduğuna inandığı müşteriler tarafından tercih edilmenin Endüstri 4.0'ın sağladığı en büyük avantaj olduğunu belirtmiştir. Endüstri 4.0'ın Y'ye sağladığı avantajlar; maliyetleri düşürmek, ürün kalitesini yükseltmek, rakipleri geride bırakmak, müşteri memnuniyeti sağlamak ve kâr elde etmektir. Z'nin sağladığı avantajlar ise verimlilik, kalite, ergonomi, iş sağlığı ve güvenliği, esnek üretim ve enerji tasarrufudur.

4.7. Engeller/Zorluklar

X için temel engeller, yetkin çalışanların eksikliği, yetkin olmayan tedarikçiler, yetersiz öz sermaye ve finansal desteklerin uygun olmayan şekilde dağıtılmasıdır. Y'den bu soruya gelen yanıtlar, yanlış yatırımlar, uygulanabilir projeler oluşturma, rol çatışması, statükocu yönetim tarzı, belli bir yaşın üzerindeki karar vericiler, geleneksel BT yapısı, nitelikli ve eğitilmiş çalışan eksikliği olmuştur. Diğer taraftan, Z'nin karşılaştığı zorluklar, ön yargı, çalışanların otomasyona direnci, işini kaybetme korkusu, teknolojiyi kullanma korkusu ve teknoloji sağlayıcılar ile şirketler arasındaki bilgi asimetrisidir. İlgili literatürde bu zorluklar üzerinde de durulmuştur. Finansal kaynak eksikliği (Erol ve diğerleri, 2016; Walendowski ve diğerleri, 2016: 5-6; Kiel ve diğerleri, 2017), nitelikli/becerili çalışan eksikliği (Kagermann ve diğerleri, 2013; Erol ve diğerleri, 2016; Walendowski ve diğerleri, 2016: 5-6), çalışanların değişime hazırlıklı olmaması ve örgütsel direnç (Walendowski ve diğerleri, 2016: 5, Kiel ve diğerleri, 2017; von Leipzig ve diğerleri, 2017) ve liderlik eksikliği (Horváth ve Szabó, 2019) Endüstri 4.0'a geçişin önündeki bazı engellerdir ve bu engeller şirketlerden elde edilen bulgularla örtüşmektedir. Horváth ve Szabó (2019), Endüstri 4.0'ın önündeki engelleri insan kaynakları, finansal kaynaklar ve kârlılık, yönetim gerçekliği, örgütsel faktörler, teknolojik entegrasyon ve süreç entegrasyonu/iş birliği olmak üzere beş faktöre ayırmış ve engellerin KOBİ'ler ve çok uluslu işletmeler (ÇUI) üzerindeki etkilerini incelemiştir. İnsan kaynakları, yönetim gerçekliği ve finansal kaynaklarla ilgili engeller KOBİ'ler üzerinde daha fazla etkiye sahipken, örgütsel faktörler ve teknoloji ve süreç entegrasyonu ile ilgili engeller ÇUI'leri daha fazla etkilemektedir (Horváth ve Szabó, 2019). Bu bulgulara benzer şekilde, bir KOBİ olan X tarafından finansal kaynak eksikliği bir engel olarak algılanırken, çok uluslu bir işletme olan Z tarafından çalışanların direnç göstermesi örgütsel bir engel olarak görülmektedir.

4.8. Verimlilik

Endüstri 4.0'ın zaruri kıldığı dijital dönüşümün en temel amaçlarından birinin verimliliğin artırılması (Demirkan ve diğerleri, 2016) olduğundan, şirketlere dönüşüm sürecinde verimliliklerinin ne kadar arttığı sorulmuştur. Z'nin Otomasyon ve Projeler Geliştirme Müdürü, Endüstri 4.0'ı "daha verimli olmak için çözümler üretmek" şeklinde tariflemiştir. X'in Genel Müdürü, toplam verimlilikte %6-7 oranında bir artış olduğunu belirtmiştir. Y'de verimlilik ölçümleri faaliyet bazlı yapıldığı için toplam verimliliğe ilişkin bir bilgi sunmaları mümkün olmamıştır. Öte yandan, faaliyetlerde genel olarak bir verimlilik artışı olduğunu bildirmişlerdir. Y'nin Teknik Müdürü, şirketin nihai amacının verimliliği maksimize ederek fabrikalarda hiçbir çalışan bırakmamak ve tam otomasyon sağlamak olduğunu söylemiştir. Karanlık fabrikalara sahip olmayı

hedefleyen şirketin mottosu ise “insan yok, ışık yok”tur. Z'nin ise üç yıl öncesine kıyasla üretim çıktıları iki katına çıkmış, çalışan sayısı %1 artmış ve çalışma saatleri %20 azalmıştır. Kısacası, verimlilikte önemli bir artış sağlandığı aşikârdır.

4.9. Çözüm Önerileri

Mülakatların sonunda görüşülen kişilere Endüstri 4.0 dönüşümü yolunda karşılaşılan zorlukları minimize etmek ve verimliliği artırmak için ne tür çözümler önerdikleri sorulmuştur. Başta A, şirketlerin Endüstri 4.0 dönüşümünün bir gereklilik olduğunu anlamalarının elzem olduğunu ama dönüşüm sürecinde aceleci davranmak yerine planlı davranmaları gerektiğini ifade etmiştir. Ayrıca, akademi ve sektör iş birlikleri ile dönüşümde başarılı olmuş şirketlerin başarı hikâyelerine dayanan bir sistem kurulması değer yaratan bir hamle olacaktır. Bu sayede, diğer şirketler dönüşüme daha istekli olabilir ve ölçülebilir kriterler sayesinde daha sağlam adımlar atabilir. B'ye göre, belli bir yaşın üzerindeki kişiler yeni teknolojilere aşina olmadıkları için dijital dönüşüm sürecinde operasyonel işler yapmaktan ziyade deneyimlerini paylaşmak ve yol göstericilik yapmak üzere danışman ya da koordinatör gibi rollere sahip olmalıdır. D, Endüstri 4.0 dönüşümünün kendini geliştiren çalışanlara olumsuz bir etkisinin olmayacağını düşünmekte ve mavi yakalı çalışanlar için daha iyi çalışma ortamları yaratılmasını ve tüm yöneticilerin “insanların makinelerden daha değerli olduğunu” her zaman göz önünde bulundurmalarını tavsiye etmektedir. E de mavi yakalı çalışanlar dâhil tüm organizasyonun Endüstri 4.0 projelerine dâhil edilmesi gerektiğine inanmaktadır. Bu sayede, mavi yakalılar hem birer takım arkadaşı olarak değerli katkılar sağlayabilirler hem de işlerini kaybetme korkusunu yenebilirler. Aksi takdirde, düşük motivasyonlu çalışanlar dolayısıyla süreçler olumsuz etkilenecektir. Yönetici ayrıca, Otomasyon ve Projeler Geliştirme Departmanı gibi merkezi bir departman olmadan organizasyonların dönüşüm sürecinde bir bütün olarak hareket edemeyecekleri kanısındadır. F de kendini geliştirmeyip teknolojik gelişmelere uyum sağlayamayan çalışanların doğal olarak geride kalacaklarını düşünmektedir.

E, Endüstri 4.0 dönüşümünde öne geçmek için yabancı hayranlığından kurtularak yerli üretime özel önem verilmesi gerektiğine inanmaktadır. Bu bağlamda yerli sanayi vatandaşlara daha çocuk yaşta tanıtılmalıdır. Daha önce bahsedildiği gibi, Endüstri 4.0 Almanya'nın ekonomik korumacılık ve yeniden sanayileşme strateji ve politikalarına bağlı olarak doğan bir kavramdır (Fırat, 2016; Gür ve diğerleri, 2017: 42, 76-77). Bu durumda, E'nin değerlendirmesi oldukça mantıklıdır. Dahası, Y'nin Üretim Teknolojileri ve Endüstri 4.0 Yöneticisi, Endüstri 4.0'ın gelişmekte olan ülkelerin teknolojik olarak gelişmiş ülkelere bağımlı olmanın riskli olduğunu anlamalarını mümkün kıldığını ve bu nedenle Endüstri 4.0'ın “yerli ve milli üretim” gibi akımlara dayalı bir anlayış şeklinde dikkate alınması gerektiğini düşünmektedir.

5. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Bu makalede, beyaz eşya sektöründe uygulanan vaka çalışmasından elde edilen bulgulara dayalı sonuçlar, sektörel özellikler, ihtiyaçlar ve politika çerçevesi bağlamında tartışılmıştır. İlk olarak, Endüstri 4.0 ve dijital dönüşümde katılımcı Türk beyaz eşya ana ve yan sanayi şirketlerinin önemli gayretlerinin olduğu, şirketlerin Endüstri 4.0 dönüşümünün bir zorunluluk olduğuna ilişkin genel bir kanaate sahip oldukları ve hatta Endüstri 4.0'a özel yatırım bütçeleri ayrılarak dönüşüm stratejileri geliştirmeye başladıkları görülmüştür. Ne yazık ki, Endüstri 4.0'ın önündeki engel ve zorlukların yadsınamaz etkisi dolayısıyla şirketler, dijital dönüşümün henüz başlangıç aşamalarında. Şirketler Endüstri 4.0 araç ve teknolojileri arasında birincil önemi veri toplama/analitiğine vermektedir. Hemen hemen tüm teknolojilerin Türk beyaz eşya sektörü şirketlerinin üretim sistemlerine entegre edildiği görülse de yapay zekâ teknolojilerinin teknoloji hazırlık seviyesinin henüz yüksek olmaması (Abou-Zahra ve diğerleri, 2018; Han ve diğerleri, 2019), eklemeli üretim teknolojilerinin büyük parçaların seri üretiminde maliyet avantajı sağlamaması (Prakash ve diğerleri, 2018) ve AR/VR teknolojilerinin ise üretimde kullanımının elzem olmadığı düşünülmesi gibi sebeplerle Türk beyaz eşya şirketleri tarafından öncelikli tercih edilen Endüstri 4.0 teknolojileri olmadıkları söylenebilir.

Şirketlerin Endüstri 4.0 yatırım ve uygulamaları sayesinde elde ettikleri en önemli avantajlar, müşteri memnuniyeti sağlamak ve müşteriler tarafından tercih edilebilir olmak, düşük maliyet, yüksek kalite, rekabet gücü, verimlilik, kâr sağlamak, ergonomi, iş sağlığı ve güvenliği, esnek üretim ve enerji tasarrufudur. Tüm bu avantajlar literatürdeki diğer çalışmalarla paralellik göstermesine rağmen sürdürülebilirliğin şirketlerce dile getirilen avantajlar arasında olmaması dikkat çekicidir. Yeşil Mutakabat ve BM sürdürülebilir kalkınma amaçları doğrultusunda, Endüstri 4.0 uygulamalarının bu husustaki avantajlarının da Türk beyaz eşya sektörünün gündemine girmesi beklenmektedir. Şirketlerin Endüstri 4.0'a geçiş yolunda en çok karşılaştıkları zorluklar ise nitelikli ve eğitilmiş çalışanların eksikliği, yetkin olmayan tedarikçiler, yetersiz öz sermaye, finansal desteklerin uygun olmayan şekilde dağıtılması, yanlış yatırımlar, rol çatışması, statükocu yönetim stili, uygulanabilir projeler yaratma zorluğu, belli bir yaşın üzerindeki karar vericiler, geleneksel BT yapısı, ön yargı, çalışanların otomasyona direnci, iş kaybetme korkusu, teknolojiyi kullanma korkusu ve teknoloji sağlayıcılar ile şirketler arasındaki bilgi asimetrisidir. Diğer yandan, siber güvenlik, yasal ve etik

konular gibi Endüstri 4.0 ile birlikte sıkça dile getirilen hususların birer engel olarak algılanmaması mutluluk vericidir. Bu tür engellere yönelik kaygıların sınırlı olmasında şirketlerin Endüstri 4.0 dönüşümüne olumlu bakmasının etkili olduğu düşünülmektedir. Bunların yanında, Türkiye'nin Bilim ve Teknoloji Yüksek Kurulu (BTYK) kararları, Hükümet Programı, 11. Kalkınma Planı, 2023 Hedefleri, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Strateji Belgeleri ve Orta Vadeli Programlar gibi ulusal plan, program ve strateji belgelerinde yerli üretim ve Endüstri 4.0 dönüşümüne yönelik ulusal çapta ve sektör bazında politikalarının bulunması, Endüstri 4.0'ın önündeki birçok engelin zamanla azalacağını ve Endüstri 4.0 dönüşümünün ivmeleneceğini göstermektedir.

Türk beyaz eşya sektörü şirketlerinin uzun vadeli yatırım çıktılarını görmek için oldukça erken olduğu ve henüz kısa vadeli yatırımlarının geri dönüşlerini almaya başladıkları göz önünde bulundurulduğunda, verimlilik kazanımlarının şimdiden oldukça yüksek olduğu ileri sürülebilir.

Mevcut makale, Türk beyaz eşya sektöründe Endüstri 4.0'ın durumunu vaka çalışması ile ortaya koyan ilk akademik çalışma niteliğindedir. Gelecekte bu ve benzeri üniversite ve sektör iş birliği ile yürütülen çalışmaların dijital olgunluğa ve ülke ekonomisinin gelişmesinde büyük paya sahip olan diğer sektörleri de kapsayacak şekilde, değer zinciri analizleriyle zenginleştirilerek ve daha geniş durum çalışmalarıyla desteklenerek yürütülmesinin yararlı olacağına inanılmaktadır. Endüstri 4.0 olgunluk seviyesinin yüksek olduğu ana sanayi şirketleri ve büyük ölçekli tedarikçi şirketlerinin en iyi uygulamaları ile bilgi ve öğrenilmiş derslerinin, uygulamalı olarak sektör şirketlerine ulaştırılması da gündeme alınması tavsiye edilen konulardan biridir.

Çalışmanın en büyük kısıtlılığı, Türk beyaz eşya sektöründe faaliyet gösteren şirketlerin bilgi paylaşımına açık olmaması dolayısıyla görüşme taleplerine olumsuz yanıtlar vermesidir. Bu yüzden, görüşülen şirket sayısını artırmak ve bulguları daha fazla çeşitlendirebilmek mümkün olmamıştır.

Gelecek çalışmalarda, daha geniş bir örnekleme ulaşma ve genelleme yapma imkânı tanıyacak nicel yöntemler kullanılması önerilmektedir. Dahası, Türk beyaz eşya sektörünün beyaz eşya üretim ve ihracatında rakipleri konumunda bulunan Çin, Meksika, Polonya ve Almanya gibi ülkelerin beyaz eşya sektörleriyle kıyaslanması ve sektörlerin Endüstri 4.0 olgunluk seviyelerinin ortaya konulması kritiktir.

KAYNAKÇA

- Aberdeen, T. (2013). "Review Essay: Yin, R. K. (2009), Case Study Research: Design and Methods. Thousand Oaks, Ca: Sage", *the Canadian Journal of Action Research*, 14(1), 69-71.
- Abou-Zahra, S., Brewer, J. ve Cooper, M. (2018). "Artificial Intelligence (AI) for Web Accessibility: Is Conformance Evaluation a Way Forward?", *Proceedings of the Internet of Accessible Things*, 1-4.
- Akben, İ. ve Aşar, İ.İ. (2018). "Endüstri 4.0 ve Karanlık Üretim: Genel Bir Bakış", *Türk Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi*, 3(1), 26-37.
- Aksoy, S. (2017). "Değişen Teknolojiler ve Endüstri 4.0: Endüstri 4.0'ı Anlamaya Dair Bir Giriş", *SAV Katkı*, 4, 34-44.
- Allen, R. C. (2009). "The British Industrial Revolution in Global Perspective", Cambridge University Press, Cambridge.
- Anderl, R. (2014). "Industrie 4.0-Advanced Engineering of Smart Products and Smart Production", *Proceedings of 19th International Seminar on High Technology*, Pracicaba, Brezilya, 1-14.
- Backhaus, S.K.H. ve Nadarajah, D. (2019). "Investigating the Relationship between Industry 4.0 and Productivity: A Conceptual Framework for Malaysian Manufacturing Firms", *Procedia Computer Science*, 161, 696-706.
- Bağcı, E. (2018). "Endüstri 4.0: Yeni Üretim Tarzını Anlamak", *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Elektronik Dergisi*, 9(24), 122-146.
- Bär, K., Herbert-Hansen, Z.N.L. ve Khalid, W. (2018). "Considering Industry 4.0 Aspects in the Supply Chain for an SME", *Production Engineering*, 12(6), 747-758.
- Barbieri, P., Ciabuschi, F., Fratocchi, L. ve Vignoli, M. (2018). "What Do We Know About Manufacturing Reshoring?", *Journal of Global Operations and Strategic Sourcing*, 11(1), 79-122.
- Bíba, O. (2018). "Towards Measurability and Identification of Key Benchmarks of Industry 4.0", *Trendy V Podnikání - Business Trends*, 8(2), 39-47.
- Bostrom, N. ve Yudkowsky, E. (2014). "The Ethics of Artificial Intelligence", *The Cambridge Handbook of Artificial Intelligence*, Editörler: Frankish, K., Ramsey, W.M., 316-334.
- Bourell, D.L., Beaman, J.L., Leu, M.C. ve Rosen, D.W. (2009). "A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead", Rapidtech, Workshop on Rapid Technologies, ABD-Türkiye, İstanbul.
- Bromley, D.B. (1986). "The Case-Study Method in Psychology and Related Disciplines", Wiley, Chichester, New York.
- Bulut, E. ve Akçacı, T. (2017). "Endüstri 4.0 ve İnovasyon Göstergeleri Kapsamında Türkiye Analizi", *Assam Uluslararası Hakemli Dergi*, 4(7), 55-77.
- Burak, M.İ.L. ve Dirican, C. (2018). "Endüstri 4.0 Teknolojileri ve Turizme Etkileri", *Disiplinlerarası Akademik Turizm Dergisi*, 3(1), 1-9.
- Chou, J.S., Cheng, M.Y. ve Wu, Y.W. (2013). "Improving Classification Accuracy of Project Dispute Resolution Using Hybrid Artificial Intelligence and Support Vector Machine Models", *Expert Systems with Applications*, 40(6), 2263-2274.
- Chung, H. (2018). "Ict Investment-Specific Technological Change and Productivity Growth in Korea: Comparison of 1996-2005 and 2006-2015", *Telecommunications Policy*, 42, 78-90.
- Črešnar, R. (2020). "New Generation of Productive Workers: How Millennials' Personal Values Impact Employee Productivity in Industry 4.0", *Recent Advances in The Roles of Cultural and Personal Values in Organizational Behavior*, Editörler: Nedelko, Z., Brzozowski, M., IGI Global, 261-275.
- Črešnar, R. ve Jevšenak, S. (2019). "The Millennials' Effect: How Can Their Personal Values Shape the Future Business Environment of Industry 4.0?", *Naše gospodarstvo/Our Economy*, 65(1), 57-65.
- Çakır, N.N. (2018). "Endüstri 4.0 ve Çalışmanın Geleceği", *Ejovoc (Electronic Journal of Vocational Colleges)*, 8(2), 97-105.
- Dalenogare, L.S., Benitez, G.B., Ayala, N.F. ve Frank, A.G. (2018). "The Expected Contribution of Industry 4.0 Technologies for Industrial Performance", *International Journal of Production Economics*, 204, 383-394.
- Davies, R. (2015). "Industry 4.0: Digitalisation for Productivity and Growth", European Parliamentary Research Service, Document No. Pe 568.337.
- De Vin, L.J. ve Jägstam, M. (2001). "Why We Need to Offer a Modeling and Simulation Engineering Curriculum", *Proceedings of the 33rd Conference on Winter Simulation*, IEEE Computer Society, Aralık, 1599-1604.
- Demirkan, H., Spohrer, J.C. ve Welser, J.J. (2016). "Digital Innovation and Strategic Transformation", *IT Professional*, 18(6), 14-18.
- Demirkan, S. ve Arslan, M.C. (2019). "Endüstri 4.0 ve Muhasebe Sistemine Etkisi Üzerine Kuramsal Bir İnceleme", *Enderun*, 3(1), 40-56.

- Dengiz, O. (2017). "Endüstri 4.0: Üretimde Kavram ve Algı Devrimi", *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 15(1), 38-45.
- Duneier, M. (1999). "Sidewalk", Farrar, Straus ve Giroux, New York, NY.
- Erol, S., Jäger, A., Hold, P., Ott, K. ve Sihm, W. (2016). "Tangible Industry 4.0: A Scenario-Based Approach to Learning for the Future of Production", *Procedia CIRP*, 54(1), 13-18.
- Ertuğrul, İ. ve Deniz, G. (2018). "4.0 Dünyası: Pazarlama 4.0 ve Endüstri 4.0", *Bitlis Eren Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 7(1), 143-170.
- Esmer, Y. ve Alan, M.A. (2019). "Endüstri 4.0 Perspektifinde İnovasyon", *Avrasya Uluslararası Araştırmalar Dergisi*, 7(18), 465-478.
- Faheem, M., Shah, S.B.H., Butt, R.A., Raza, B., Anwar, M. Ashraf, M. W., Ngadi, A. ve Gungor, V. C. (2018). "Smart Grid Communication and Information Technologies in the Perspective of Industry 4.0: Opportunities and Challenges", *Computer Science Review*, 30, 1-30.
- Fang, F. (2016). "Atomic and Close-to-Atomic Scale Manufacturing-A Trend in Manufacturing Development", *Frontiers of Mechanical Engineering*, 11(4), 325-327.
- Ferrari, P., Flammini, A., Rinaldi, S., Sisinni, E., Maffei, D. ve Malara, M. (2018). "Impact of Quality of Service on Cloud Based Industrial IOT Applications with OPC UA", *Electronics*, 7(7), 109.
- Fırat, O.Z. ve Fırat, S.Ü. (2017). "Endüstri 4.0 Yolculuğunda Trendler ve Robotlar", *İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi*, 46(2), 211-223.
- Fırat, S.Ü. (2016). "Sanayi 4.0 Dönüşümü Nedir? Belirlemeler ve Beklentiler", <http://www.sanayicidergisi.com.tr/sanayi-40-donusumu-nedirbelirlemeler-ve-beklentiler-makale,585.html>, (Erişim Tarihi: 29.08.2021).
- Filizöz, B. ve Orhan, U. (2018). "İnsan Kaynakları Yönetimi Bağlamında Endüstri 4.0: Bir Yazın Çalışması", *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 19(2), 110-117.
- Fonseca, L.M. (2018). "Industry 4.0 and the Digital Society: Concepts, Dimensions and Envisioned Benefits", *Proceedings of the International Conference on Business Excellence*, Sciendo, 12(1), 386-397.
- Ford, M. (2018). "Robotların Yükselişi: Yapay Zekâ ve İşsiz Bir Gelecek Tehlikesi", Kronik Yayınları, İstanbul.
- Friedman, T.L. (2005). "The World is Flat – A Brief History of the Twenty-First Century", 1. Baskı, Farrar, Straus and Giroux.
- Germany Trade and Invest. (2018). "Industrie 4.0 – Germany Market Report and Outlook", https://www.gtai.de/gtai/content/en/invest/_shareddocs/downloads/gtai/industry-overviews/industrie4.0-germany-market-outlookprogress-report-en.pdf?v=12, (Erişim Tarihi: 10.11.2019).
- Glas, A. H. ve Kleemann, F.C. (2016). "The Impact of Industry 4.0 on Procurement and Supply Management: A Conceptual and Qualitative Analysis", *International Journal of Business and Management Invention*, 5(6), 55-66.
- Gönen, S. ve Rasgen, M. (2019). "Endüstri 4.0 ve Muhasebenin Dijital Dönüşümü", *Manas Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 8(3), 2898-2917.
- Götz, M. ve Jankowska, B. (2017). "Clusters and Industry 4.0–Do They Fit Together?", *European Planning Studies*, 25(9), 1633-1653.
- Gür, N., Ünay, S. ve Dilek, Ş. (2017). "Sanayiyi Yeniden Düşünmek: Küresel Teknolojik Dönüşümün Dünya ve Türkiye Ekonomisine Yansımaları", Seta, Ankara.
- Hamzeh, R., Zhong, R. ve Xu, X.W. (2018). "A Survey Study on Industry 4.0 for New Zealand Manufacturing", *Procedia Manufacturing*, 26, 49-57.
- Han J.H., Jin C. ve Wu, L.S. (2020). "Research on Accuracy of Flower Recognition Application Based on Convolutional Neural Network", *Advances in Artificial Intelligence, Software and Systems Engineering AHFE 2019, Advances in Intelligent Systems and Computing*, Editör: Ahram, T., Springer, Cham, 224-232.
- Henke, N., Levine, J. ve Mcinerney, P. (2018). "Analytics Translator: The New Must-Have Role", *Harvard Business Review*, <https://www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-analytics/our-insights/analytics-translator>, (Erişim Tarihi: 29.08.2021).
- Hennies, M. ve Raudjäär, M. (2015). "Industry 4.0. Introductory Thoughts on the Current Situation", *Estonian Discussions on Economic Policy*, 23(2), 1-3.
- Horváth, D. ve Szabó, R.Z. (2019). "Driving Forces and Barriers of Industry 4.0: Do Multinational and Small and Medium-Sized Companies Have Equal Opportunities?", *Technological Forecasting and Social Change*, 146, 119-132.
- Hsu, C.C., Kannan, V.R., Tan, K.C. ve Keong Leong, G. (2008). "Information Sharing, Buyer-Supplier Relationships, and Firm Performance: A Multi-Region Analysis", *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 38(4), 296-310.

- Huchler, N. (2017). "Grenzen Der Digitalisierung Von Arbeit–Die Nicht-Digitalisierbarkeit und Notwendigkeit Impliziten Erfahrungswissens und Informellen Handelns", *Zeitschrift Für Arbeitswissenschaft*, 71(4), 215-223.
- Hughes, B. ve Wilson, G. (2015). "3D/Additive Printing Manufacturing: A Brief History and Purchasing Guide", *Technology and Engineering Teacher*, 75(4), 18-21.
- Iyer, A. (2018). "Moving from Industry 2.0 to Industry 4.0: A Case Study from India on Leapfrogging in Smart Manufacturing", *Procedia Manufacturing*, 21, 663-670.
- Kagermann, H., Wahlster, W. ve Helbig, J. (2013). "Recommendations for Implementing the Strategic Initiative Industrie 4.0", Acatech–National Academy of Science and Engineering, <https://en.acatech.de/publication/recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0-final-report-of-the-industrie-4-0-working-group/>, (Erişim Tarihi: 29.08.2021).
- Kamber, E. ve Bolatan, G.İ.S. (2019). "Endüstri 4.0 Türkiye Farkındalığı", *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 11(30), 836-847.
- Karre, H., Hammer, M., Kleindienst, M. ve Ramsauer, C. (2017). "Transition Towards an Industry 4.0 State of the Leanlab at Graz University of Technology", *Procedia Manufacturing*, 9, 206-213.
- Kaspar, S. ve Schneider, M. (2015). "Lean und Industrie 4.0 in der Intralogistik: Effizienzsteigerung Durch Kombination der Beiden Ansätze", *Productivity Management*, 20(5), 17-20.
- Kheyfets, B. ve Chernova, V. (2019). "Government Programs for Smart Re-Industrialization: Justification of Strategic Choice for Russia", *Revista Espacios*, 40(18), 30-37.
- Kılıç, S. ve Alkan, R.M. (2018). "Dördüncü Sanayi Devrimi Endüstri 4.0: Dünya ve Türkiye Değerlendirmeleri", *Girişimcilik İnovasyon ve Pazarlama Araştırmaları Dergisi*, 2(3), 29-49.
- Kiel, D., Müller, J.M., Arnold, C. ve Voigt, K. I. (2017). "Sustainable Industrial Value Creation: Benefits and Challenges of Industry 4.0", *International Journal of Innovation Management*, 21(8), 1-34.
- Kinzel, H. (2017). "Industry 4.0–Where Does This Leave The Human Factor?", *Journal of Urban Culture Research*, 15, 70-83.
- Koca, K.C. (2018). "Sanayi 4.0: Türkiye Açısından Fırsatlar ve Tehditler", *Sosyoekonomi*, 26(36), 245-252.
- Kolberg, D. ve Zühlke, D. (2015). "Lean Automation Enabled by Industry 4.0 Technologies", *IFAC-Papersonline*, 48(3), 1870-1875.
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T. ve Hoffmann, M. (2014). "Industry 4.0", *Business & Information Systems Engineering*, 6(4), 239-242.
- Li, L. (2018). "China's Manufacturing Locus in 2025: With a Comparison of "Made-in-China 2025" and Industry 4.0", *Technological Forecasting & Social Change*, 135, 66-74.
- Li, Q., Jiang, H., Tang, Q., Chen, Y., Li, J. ve Zhou, J. (2016). "Smart Manufacturing Standardization: Reference Model and Standards Framework", *OTM Confederated International Conferences on the Move to Meaningful Internet Systems*, Rodos, Yunanistan, 16-25.
- Liu, J. (2018). "Research on Supply Chain Optimization Strategy of Clothing Retail Industry under the Background of Big Data", *8th International Conference on Management, Education and Information, MEICI*, Shenyang, Çin, 56-60.
- Lu, Y. (2017). "Industry 4.0: A Survey on Technologies, Applications and Open Research Issues", *Journal of Industrial Information Integration*, 6, 1-10.
- Manda, M. I. ve Ben Dhaou, S. (2019). "Responding to the Challenges and Opportunities in the 4th Industrial Revolution in Developing Countries", *Proceedings of the 12th International Conference on Theory and Practice of Electronic Governance*, Melbourne, Avustralya, 244-253.
- Mcdonough, J. ve Mcdonough, S. (1997). "Research Methods for English Language Teachers", Arnold, Londra.
- Mcknight, M. (2016). "IOT, Industry 4.0, Industrial IOT... Why Connected Devices are the Future of Design", *KNE Engineering*, 2(1), 197-202.
- Muhuri, P.K., Shukla, A.K. ve Abraham, A. (2019). "Industry 4.0: A Bibliometric Analysis and Detailed Overview", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 78, 218-235.
- Obamawhitehouse. (2011). "President Obama Launches Advanced Manufacturing Partnership", <https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2011/06/24/president-obama-launches-advanced-manufacturing-partnership>, (Erişim Tarihi: 28.02.2020).
- Oesterreich, T.D. ve Teuteberg, F. (2016). "Understanding the Implications of Digitisation and Automation in the Context of Industry 4.0: A Triangulation Approach and Elements of a Research Agenda for the Construction Industry", *Computers in Industry*, 83, 121-139.
- Ovacı, C. (2017). "Endüstri 4.0 Çağında Açık İnovasyon", *Maliye Finans Yazıları*, (Özel Sayı), 113-132.

- Özden, A., Seheri, Ö. ve Ersan, Ö. (2019). "Beyaz Eşya Sektörü, A&T Bank Ekonomik Araştırmalar Departmanı", Ekim 2019, https://www.atbank.com.tr/documents/beyaz%20esya%20sektoru_ekim%202019.pdf, (Erişim Tarihi: 29.08.2021).
- Özdoğan, O. (2018). "Endüstri 4.0: Dördüncü Sanayi Devrimi ve Endüstriyel Dönüşümün Anahtarları", Pusula, İstanbul.
- Özsoylu, A.F. (2017). "Endüstri 4.0", *Çukurova Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 21(1), 41-64.
- Öztemel, E. ve Gürsev, S. (2018). "Türkiye'de Lojistik Yönetiminde Endüstri 4.0 Etkileri ve Yatırım İmkanlarına Bakış Üzerine Anket Uygulaması", *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, 30(2), 145-154.
- Öztürk, E. ve Koç, K.H. (2017). "Endüstri 4.0 ve Mobilya Endüstrisi", *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 6(3), 786-794.
- Pamuk, N.S. ve Soysal, M. (2018). "Yeni Sanayi Devrimi Endüstri 4.0 Üzerine Bir İnceleme", *Verimlilik Dergisi*, 1, 41-66.
- Prakash, K.S., Nancharaih, T. ve Rao, V.S. (2018). "Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing-an Overview", *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 3873-3882.
- Reel Sektör. (2016). "Ev Elektronik & Beyaz Eşya Eki", 19 Mayıs 2016, http://www.turkbesd.org/userfiles/files/sayfa_1.pdf, (Erişim Tarihi: 28 Ağustos 2021).
- Roy, D., Mittag, P. ve Baumeister, M. (2015). "Industrie 4.0-Einfluss der Digitalisierung Auf Die Fünf Lean-Prinzipien-Schlank vs. Intelligent", *Productivity Management*, 20(2), 27-30.
- Rupp, M., Schneckenburger, M., Merkel, M., Börret, R. ve Harrison, D.K. (2021). "Industry 4.0: A Technological-Oriented Definition based on Bibliometric Analysis and Literature Review", *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 7(1), 68.
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P. ve Harnisch, M. (2015). "Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries", *Boston Consulting Group*, 9(1), 54-89.
- Rüttimann, B.G. ve Stöckli, M.T. (2016). "Lean and Industry 4.0-Twins, Partners, or Contenders? A Due Clarification Regarding the Supposed Clash of Two Production Systems", *Journal of Service Science and Management*, 9(6), 485-500.
- Saatçioğlu, Ö., Kök, G. ve Özısapa, N. (2018). "Endüstri 4.0 ve Lojistik Sektörüne Yansımalarının Örnek Olay Kapsamında Değerlendirilmesi", *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, Endüstri 4.0 ve Örgütsel Değişim Özel Sayısı, 1675-1696.
- Safar, L., Sopko, J., Bednar, S. ve Poklemba, R. (2018). "Concept of SME Business Model for Industry 4.0 Environment", *Tem Journal*, 7(3), 626-637.
- Sarwono, R. ve Bernarto, I. (2020). "Leading Millennials to 4.0 Organization", *Management Science Letters*, 10(4), 733-740.
- Schumacher, A., Erol, S. ve Sihm, W. (2016). "A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises", *Procedia CIRP*, 52, 161-166.
- Schwab, K. (2017). "Dördüncü Sanayi Devrimi" (Z. Dicleli, Çev.), Optimist, İstanbul.
- Siemens. (2016). "Siemens: Endüstri 4.0 Yolunda", İstanbul.
- Sindhuja, C.V. ve Akhilesh, K.B. (2020). "Millennials at Industry 4.0—Opportunities and Challenges", *Smart Technologies*, Editörler: Akhilesh, K.B. ve Möller, D.P.F., Springer, Singapur, 121-136.
- Sklyar, A., Kowalkowski, C., Tronvoll, B. ve Sörhammar, D. (2019). "Organizing for Digital Servitization: A Service Ecosystem Perspective", *Journal of Business Research*, 104, 450-460.
- Ślusarczyk, B. (2018). "Industry 4.0: Are We Ready?", *Polish Journal of Management Studies*, 17(1), 232-248.
- Sony, M. ve Naik, S. (2020). "Key Ingredients for Evaluating Industry 4.0 Readiness for Organizations: A Literature Review", *Benchmarking: An International Journal*, 27(7), 2213-2232.
- Soylu, A. (2018). "Endüstri 4.0 ve Girişimcilikte Yeni Yaklaşımlar", *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 32, 43-57.
- Stake, R.E. (1995). "The Art of Case Study Research: Perspective in Practice", Sage, Londra.
- Suyanto, U.Y., Purwanti, I. ve Sayyid, M. (2019). "Transformational Leadership: Millennial Leadership Style in Industry 4.0", *Manajemen Bisnis*, 9(1), 53-63.
- Sürmen, Y. E. ve Güler, E. (2021). "Endüstri 4.0 ve Bursa Otomotiv Sanayi: SWOT (GZFT) Analizi ile Bir Değerlendirme", *Dicle Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 27, 328-347.
- Şahin, H. ve Topal, B. (2019). "Examination of Effect of Information Sharing on Businesses Performance in the Supply Chain Process", *International Journal of Production Research*, 57(3), 815-828.
- Şekelli, Z.H. ve Bakan, İ. (2018). "Endüstri 4.0'ın Etkisiyle Lojistik 4.0", *Journal of Life Economics*, 5(2), 17-36.

- Tarasov, I.V. (2018). "Industry 4.0: Technologies and Their Impact on Productivity of Industrial Companies", *Strategic Decisions and Risk Management*, 2, 62-69.
- Taş, H.Y. (2018). "Dördüncü Sanayi Devrimi'nin (Endüstri 4.0) Çalışma Hayatına ve İstihdama Muhtemel Etkileri", *Opus Uluslararası Toplum Araştırmaları Dergisi*, 9(16), 1817-1836.
- Timurcanday Özmen, Ö.N., Eriş, E.D., Süral Özer, P. ve Zerey, H. (2019). "Endüstri 4.0'a Bütüncül Bir Yaklaşım: Örnek Olay Analizi ve Stratejik Yol Haritası", *Dokuz Eylül Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi*, 20(2), 499-520.
- Toker, K. (2018). "Endüstri 4.0 ve Sürdürülebilirliğe Etkileri", *İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi İşletme İktisadi Enstitüsü Yönetim Dergisi*, 29(84), 51-64.
- Trademap. (2020). <https://www.trademap.org/index.aspx>, (Erişim Tarihi: 13.03.2020).
- Tschandl, M. ve Mallaschitz, C. (2016). "Industrie 4.0: Controller Als Treiber Einer Strategischen Neuausrichtung", *Controlling und Industrie*, 4, 85-106.
- TÜBİTAK. (2017). "Yeni Sanayi Devrimi Akıllı Üretim Sistemleri Teknoloji Yol Haritası", V2, http://www.tubitak.gov.tr/sites/default/files/akilli_uretim_sistemleri_tyh_v2-03ocak2017.pdf, (Erişim Tarihi: 29.08.2021).
- Türkel, S. ve Bozağaç, F. (2018). "Endüstri 4.0'ın İnsan Kaynakları Yönetimine Etkileri", *Toros Üniversitesi İİSBF Sosyal Bilimler Dergisi*, 5(9), 419-441.
- Tvenge, N. ve Martinsen, K. (2018). "Integration of Digital Learning in Industry 4.0", *Procedia Manufacturing*, 23, 261-266.
- UNIDO. (2018). "Industry 4.0-The Opportunities Behind the Challenge", Viyana, https://www.unido.org/sites/default/files/files/2018-11/unido_gc17_industry40.pdf, (Erişim Tarihi: 29.08.2021).
- Vogel-Heuser, B. ve Jumar, U. (2019). "Scientific Fundamentals of Industry 4.0", *At-Automatisierungstechnik*, 67(6), 502-503.
- Von Haartman, R., Bengtsson, L. ve Niss, C. (2016). "Lean Practices as Requisites for the Use of Digital Technology in Production", *Proceedings of the 23rd Euroma Conference*, 17-22 Haziran, Trondheim, Norveç.
- Von Leipzig, T., Gamp, M., Manz, D., Shöttle, K., Ohlhausen, P., Oosthuizen, G., Palm, D. ve Von Leipzig, K. (2017). "Initialising Customer-Orientated Digital Transformation in Enterprises", *Procedia Manufacturing*, 8, 517-524.
- Wagner, T., Herrmann, C. ve Thiede, S. (2017). "Industry 4.0 Impacts on Lean Production Systems", *Procedia CIRP*, 63, 125-131.
- Waibel, M.W., Steenkamp, L. P., Moloko, N. ve Oosthuizen, G. A. (2017). "Investigating the Effects of Smart Production Systems on Sustainability Elements", *Procedia Manufacturing*, 8, 731-737.
- Walendowski, J., Kroll, H. ve Schnabl, E. (2016). "Industry 4.0. Advanced Materials (Nanotechnology)", Technopolis, Brüksel.
- Wübbeke, J., Meissner, M., Zenglein, M.J., Ives, J. ve Conrad, B. (2016). "Made in China 2025", Mercator Institute for China Studies, Papers on China, 2.
- Yıldız, A. (2018). "Endüstri 4.0 ve Akıllı Fabrikalar", *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(2), 546-556.
- Yin, R. K. (2002). "Case Study Research: Design and Methods", 3. Baskı, Sage, Thousand Oaks, CA.
- Yin, R. K. (2017). "Durum Çalışması Araştırması Uygulamaları", 3. Baskı (İ. Günbayı, Çev.), Nobel Yayınevi, Ankara.
- Yoşumaz, İ. ve Özkara, B. (2019). "Endüstri 4.0 Sürecinin Hazır Giyim İşletmeleri Üzerindeki Etkileri: Hugo Boss Türkiye Örneği", *İşletme Araştırmaları Dergisi*, 11(4), 2587-2600.
- Yudkowsky, E. (2008). "Artificial Intelligence as a Positive and Negative Factor in Global Risk", *Global Catastrophic Risks*, 1(303), 184.
- Zainal, Z. (2007). "Case Study as a Research Method", *Jurnal Kemanusiaan*, 5(1), 1-6.
- Zhang, L., Tan, J., Han, D. ve Zhu, H. (2017). "From Machine Learning to Deep Learning: Progress in Machine Intelligence for Rational Drug Discovery", *Drug Discovery Today*, 22(11), 1680-1685.

HAVACILIKTA DİJİTALLEŞME VE VERİMLİLİK İLİŞKİSİ ÜZERİNE BİR İÇERİK ANALİZİ

Volkan YAVAŞ¹

ÖZET

Amaç: Bu çalışma, havacılıkta dijitalleşme ve verimlilik ilişkisini ele alan akademik çalışmaların analizi ile Endüstri 4.0 ve elementlerinin havacılıkta verimlilik üzerine katkısını ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Yöntem: Dijital dönüşüm sürecinin çok yeni olması, uygulamadaki kısıtlı imkânlar ve sektörde bu etkiyi doğrudan araştırmak için yeterli veri olmadığı düşünüldüğü için akademik araştırmalar üzerinden bir içerik analizi yapılmıştır. Web of Science ve Scopus veri tabanlarında 'Havacılık, Dijital ve Verimlilik' kelimeleri üzerinden yapılan aramada listelenen sonuçlar içerisinde anahtar kelimelerin eş-birlikteliğine dayalı eşleşmeyi görselleştirmek için VOSViewer yazılımı kullanılmıştır.

Bulgular: Alfabetik sıra ile 'Dijital İkiz, Nesnelerin İnterneti, Teknoloji, Yapay Zekâ, Yenilik' anahtar kelimeleri sonuçlarda öne çıkmaktadır. İlgili çalışmalar teknolojik, çevresel ve yönetsel ana başlıklarında sınıflandırılmıştır. Teknoloji kümesini oluşturan çalışmalar 'aerodinamik, havaaracı, motor, kalite, yenilikçi' gibi kelimeleri içermektedir. Çevresel kümeyi oluşturan çalışmalar "yakıt, emisyon, enerji gibi kelimeleri" içerirken yönetsel kümeyi oluşturan çalışmalar 'Çevresel' ve rekabet, havalimanı, havayolu, kalkınma gibi kelimeleri içermektedir. Tüm çalışmaların odağındaki "dijital ikiz" kavramı üzerinden değerlendirmeler yapılmış ve kavramın yönetim ve pazarlama açısından yaklaşımlarına dikkat çekilmiştir.

Özgünlük: Çalışma bu alanda yapılan ilk ve tek içerik analizi olması sebebiyle özgün bir çalışma iken elde edilen sonuçların da araştırmacılar ve profesyonellere yol gösterici olabileceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Havacılık, Dijital, Dijital İkiz, Verimlilik, Hizmet Pazarlaması.

JEL Kodları: L93, O33, D24, M31.

A CONTENT ANALYSIS ON THE RELATIONSHIP BETWEEN DIGITALIZATION AND PRODUCTIVITY IN AVIATION

ABSTRACT

Purpose: This study aims to demonstrate the contribution of Industry 4.0 and its elements on efficiency in aviation by analysing academic studies on the relationship between digitalization and productivity in aviation.

Methodology: Since the digital transformation process is very new and the limited opportunities in practice, and the lack of data to directly investigate this effect in the sector, a content analysis has been made through academic research. VOSViewer software was used to visualize the matches based on the co-occurrence of keywords among the results listed in the search made on the words 'Aviation, Digital and Productivity'in Web of Science and Scopus databases.

Findings: The keywords 'Digital Twin, Internet of Things, Technology, Artificial Intelligence, Innovation' stand out in alphabetical order. Related studies are classified under the main headings of technological, environmental, and managerial. The studies that make up the technology cluster include words such as 'aerodynamics, aircraft, engine, quality, innovative.' While the studies that make up the environmental cluster include "words such as fuel, emissions, energy, etc.", the studies that make up the administrative cluster include 'Environmental' and competition, airport, airline, development, etc. contains words. In the focus of all these studies, the concept of "digital twin" stands out. In the study, evaluations were made in this sense, and attention was drawn to the approaches of the 'digital twin' concept in terms of management and marketing.

Originality: The study is the first and only content analysis in this field. the results obtained may also be a guide for researchers and professionals.

Keywords: Aviation, Digital, Digital Twin, Productivity, Service Marketing.

JEL Codes: L93, O33, D24, M31.

¹ Öğr. Gör. Dr., Ege Üniversitesi Havacılık Meslek Yüksekokulu, Sivil Hava Ulaştırma İşletmeciliği Programı, İzmir, Türkiye, volkan.yavas@ege.edu.tr, ORCID: 0000-0002-4237-6386.

1. GİRİŞ

İşletmelerde ve bağlı buldukları sektörlerde performansı ölçmek, takip etmek ve sürdürülebilirliği sağlamak adına ele alınan bazı kavramlar olduğu bilinmektedir. Bu anlamda etkinlik (efficiency) ve verimlilik (productivity) kavramları bu performans göstergeleri arasında en bilinenleri iken aynı zamanda anlam açısından da en çok karıştırılan kavramlardır (Yükçü ve Atağan, 2009). Aynı çalışmada ifade edildiği üzere en öz haliyle etkinlik, “doğru işlerin” yapılmasını ifade ederken, verimlilik “işlerin doğru” yapılmasını yani işletmenin mevcut kaynaklarını kullanarak elde ettiği çıktı arasındaki durumu, bir başka ifadeyle üretkenlik gücünü ifade etmektedir.

Tüm sektörlerde olduğu gibi havacılık sektöründe de rekabetin giderek arttığı son yıllarda verimlilik en baskın ve üzerine düşünülen konu haline gelmektedir (Alam, 2016). Verimlilik, havacılık sektöründe geleneksel anlamda bir başarı faktörü iken bunu geliştirmenin iki yolu olarak teknik değişiklikler ve etkinlik gösterilmektedir (Budd ve diğerleri, 2020: 73). İlgili çalışmada teknik değişiklikler ile sektörde düşük girdi kullanımıyla yüksek çıktı hedefine doğru bir dönüşüm ifade edilirken, etkinlik ile herhangi bir havayolu firmasının kendi operasyonlarında en iyi üretimi/çıktıyı sağlama yeteneğini ortaya çıkarabilmesine vurgu yapılmaktadır. Geleneksel anlamda performans göstergesi olan bu kavramlar, sanayideki değişim ve dönüşüme bağlı olarak da her dönemde farklı ‘girdi’ ve ‘çıktılar’ üzerinden değerlendirilmektedir. Havacılık sektörü her ne kadar küresel ve dev bir ekonomiye sahip olsa da tarihsel olarak diğer sektörlerle kıyasla daha kısa bir geçmişe sahiptir. Ancak yine de havacılık sektörü de modern havacılığın miladı olarak kabul edilen 1903 yılından günümüze çeşitli değişim ve dönüşümlere ayak uydurmak durumunda kalmıştır. Günümüzde ise hemen her sektörün yüzleştiği ve adaptasyon süreçlerine başladığı 4. Sanayi Devrimi (Endüstri 4.0) ile dijitalleşme süreçlerine uyum sağlamak durumundadır.

İlk olarak 2011 yılında Almanya’da duyurulan Endüstri 4.0 kavramı, devamında hızla endüstriyel ve akademik anlamda yayılmıştır (Xu ve Duan, 2019). Geçen süre zarfında literatürde farklı isimlerle çağrışımları olsa da temel anlamda fiziksel süreçlerin dijital dönüşümünü kapsadığı belirtilmektedir (Yıldırım, 2019). Önceki dönemlerdeki teknolojik ve yenilikçi dönüşümlerden farklı olarak Endüstri 4.0 ile yapay zekâ, otonom araçlar, büyük veri, nesnelerin interneti, akıllı sensörler ve siber güvenlik gibi farklı dijital dönüşümler öne çıkmakta ve bunların sanayiden hizmet sektörüne birçok farklı sektörde katma değer ve verimlilik artışı anlamında olumlu etki yaratacağı tahmin edilmektedir (Gökalp ve diğerleri, 2019).

Endüstri 4.0 kavramı ile ortaya çıkan dijitalleşme ya da dijital dönüşüm, fiziksel süreçlerin dijital süreçlere adaptasyonu olarak basit şekilde ifade edilebileceği gibi işletmelerin bu dönüşüme adapte olurken ürün/hizmetlerinin değişiminin yanı sıra iş modelleri, iş süreçleri ve organizasyonların dönüşümünü de ifade etmekte ve bu sayede dijital teknolojiye ve pazara ayak uydurabilmesini öne çıkarmaktadır (Klein, 2020a). Dijitalleşme sürecine olan adaptasyon, işletmeler için ulusal kalkınma, uluslararası rekabet, verimlilik ve istihdam gibi birçok açıdan bir zorunluluk olarak karşılırlarına çıkmakta iken süreçte başarıyı belirleyecek faktörler olarak da teknolojik ve yenilikçi yaklaşımın geliştirilmesi, iş gücünün eğitimi, altyapı ve üstyapı entegrasyonunun sağlanması ve mevcut duruma yönelik planlama yapılması gösterilmektedir (Gülseren ve Sağbaş, 2019: 5).

Dijital dönüşüm birçok işletme, sektör ve hatta araştırmacılar için yeni bir kavram olması sebebiyle dönüşümün adımlarına dair net bir çerçeve de söz konusu değildir. Farklı sektörlerde farklı işletmeler, birbirlerinden farklı dönüşüm süreçleri geçirebilmekte, dijital dönüşümün mikro anlamda işletmelerin tüm süreçlerini ve makro anlamda ise tüm tedarik zincirini ilgilendiren kapsamlı ve zorlayıcı bir süreç olduğu ifade edilmektedir (Klein 2020b).

Havacılık sektöründe de benzer şekilde dijital dönüşüm kaçınılmaz olarak gerçekleşmeye başlamaktadır. Havacılık sektöründe yaşanan bu dönüşümün de sektörde zincirleme etki yaparak ticari operasyonlardan tedarik zincirine birçok anlamda ‘zorlayıcı’ olumlu etkisi olacağı, ayrıca büyük veri gibi Endüstri 4.0 temelli unsurların da havacılık süreçlerinin takibi, kontrolü ve iyileştirilmesi anlamında hem verimliliği hem de emniyeti artırabileceği öne sürülmektedir (Türkay ve Artar, 2021). Endüstri 4.0’ın havacılık sektöründe yolcular açısından havalimanlarında yön bulma ve bagaj takibi gibi; havalimanı personeli açısından uçak/bagaj yükleme gibi işlemler için yer (ramp) hizmetlerine, check-in, boarding işlemler için yolcu hizmetlerine ve uçak içi yerleşim hizmeti gibi işlemler için kabin hizmetlerine yönelik uygulamalar; teknik personel için ise uçak üretim, bakım ve onarımdan operasyonel süreçlere yönelik çeşitli uygulamalar geliştirilmeye başlanmışken, tüm bu uygulamaların yaygın kullanımıyla havayolu ve havalimanları için süreçlerde etkinlik ve verimlilik, yolcular açısından ise memnuniyet düzeylerinde artış yaşanacağı tahmin edilmektedir (Atalık ve diğerleri, 2019). Havalimanları özelinde bir başka çalışmada ise dijitalleşme ile yolcu hizmetleri süreçlerinde yolcu ile iletişim, yolcunun takibi ve talep/sorunlarına yönelik sağlanabilecek çözümler ile daha verimli operasyonlar gerçekleştirilebileceği ve bu sayede müşteri deneyimi ve memnuniyetinin artabileceği öngörülmektedir (Cam ve Durmaz, 2018).

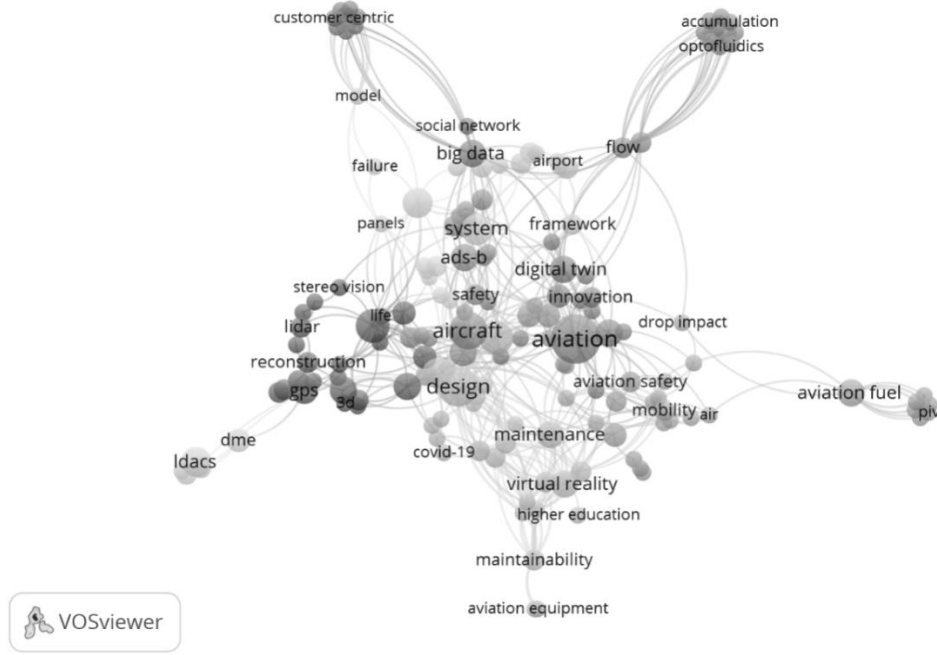
Genel anlamda, tüm sektörlerde olduğu gibi havacılık sektörü için de etkinlik ve verimlilik kavramları performans takibi ve sürdürülebilirliği açısından üzerine düşünülen konular olmakla birlikte, Endüstri 4.0 süreci ile birlikte dijitalleşme ya da dijital dönüşüm paradigmasının da bu performans göstergelerine olumlu düzeyde katkısı olacağı tahmin edilmektedir. Ancak bu noktada dijitalleşmenin 'kendiliğinden' olumlu katkı vereceğini varsaymak bir soru işareti olarak ele alınmalıdır. İşletmelerin beklediği düzeyde olumlu katkının olabilmesi adına da bir zaman gerekliliği olduğu dikkate alınmalı, ilgili sektördeki tüm paydaşlardan ülke/otoritelere dek desteklenmesi ya da teşvik edilmesi de gerekmektedir (Yılmaz, 2021). Ayrıca Endüstri 4.0 ve paralelinde dijitalleşmeyle beklenen performans artış hızının, dijitalleşmeye uyumluluk hızıyla paralel olduğu da unutulmamalıdır (Yılmaz, 2021).

Bu anlamda çalışmanın araştırma sorusu, havacılıkta dijitalleşmenin verimliliğe olan etkisini araştıran akademik çalışmalarda odak alanları ortaya koymak üzerine inşa edilmiştir. Hâlihazırda havacılık sektörü teknolojinin en yoğun kullanıldığı sektörlerden biri olmakla birlikte, Endüstri 4.0'ı takiben süreçlerinde de dijitalleşmeye yönelik adımların atıldığı bilinmektedir. Ancak akademik yazında, havacılık sektöründe dijital dönüşümün sektörel operasyonlara yönelik verimliliğini ölçen çalışma sayısı sınırlıdır. Birçok alanda olduğu gibi havacılık alanında da sanayide/sektörde yaşanan dönüşümleri takiben akademik çalışmaların varlığı ve sayısı da paralel olarak artmakta ve mevcut uygulamaları değerlendirme fırsatı ortaya konmaktadır. Bu çalışmanın da en büyük motivasyonu çok yeni bir dönüşüm süreci olan havacılıkta dijitalleşmenin verimliliğe olan etkisini akademik anlamda ortaya koyabilmektir. Havacılık sektöründe üretimden tedarik zincirine, ticari hava taşımacılığı operasyonlarından havalimanı hizmetlerine dek yaşanan dönüşümün sektördeki verimliliğe olan etkisini ortaya koymak temel amaçtır. Bu amaçla havacılık, dijitalleşme ve verimlilik ile ilgili akademik çalışmalar derlenmiş ve VOSViewer programı aracılığıyla bir içerik analizi yapılmıştır. Elde edilen veriler ışığında hem havacılık sektörü hem de yolcular açısından bir değerlendirme yapılarak öneriler sunulmuştur. Bu anlamda hem sektördeki çalışmaların tarafsız bir değerlendirmesinin yapılması hem de gelecekteki uygulamalara rehberlik edebilmek adına ortaya konan akademik çalışmaların bir arada incelenmesinin de genel anlamda önemli bir katkı sunacağı düşünülmektedir. Çalışmada, giriş bölümünü takiben içerik analizinin detaylarını aktaran yöntem bölümü ve bulguları aktaran değerlendirme bölümü gelmektedir. Çalışma, sonuç bölümü ile sonlandırılmaktadır.

2. YÖNTEM

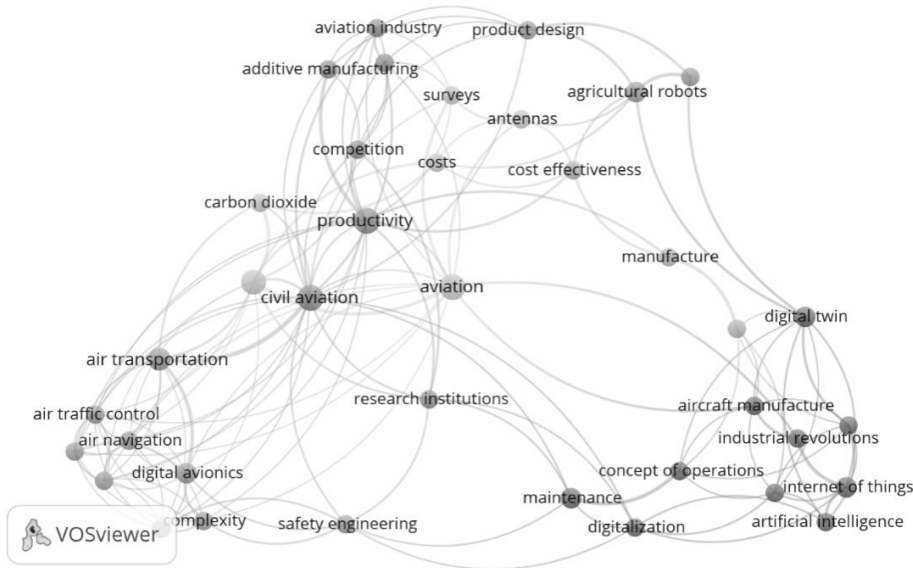
Çalışma temel anlamda bir derleme çalışması olsa da incelenen kaynaklar VOSViewer programıyla içerik analizine tabi tutulmaktadır. Buna paralel olarak Web of Science (WOS) ve Scopus veri tabanlarında Havacılık (Aviation), Dijital (Digital) ve Verimlilik (Productivity) anahtar kelimeleri temelinde araştırmalar yapılmıştır. Çalışmanın amacına uygun olması amacıyla Endüstri 4.0'ın ilk telaffuz edildiği yıl olan 2011 yılından günümüze 10 yıllık bir literatür incelenmiştir. Buna istinaden de tümdengelim yöntemi ile araştırma ve analiz 3 adımda planlanmıştır. Her bir adımda WOS ve Scopus veri tabanlarında "havacılık, dijital ve verimlilik" anahtar kelimelerinin çeşitli kombinasyonlarıyla inceleme yapılarak alandaki öz çalışmalara ulaşılmaya çalışılmıştır.

İlk olarak Web of Science veri tabanında 'Dijital ve Havacılık' kelimeleri üzerinden 2011-2021 tarih aralığında bir arama yapılmış ve 390 sonuç listelenmiştir. Listelenen ilgili çalışmalar VOSViewerde 'anahtar kelime' bağlamında incelenmek üzere dışa aktarılmıştır. VOSViewer yazılımı aracılığıyla anahtar kelimeler arasında eş-birliktelik (Co-occurrence) (Gürdin, 2020) analizi yapılmıştır. Şekil 1'de görüldüğü üzere 390 çalışmadaki anahtar kelimeler üzerinden yapılan analizde farklı kümeler ve bağlantılar ortaya konmaktadır. Şekil üzerinde hacim/boyut olarak daha büyük gözükken şekiller kelimelerin sıklığını ifade etmektedir. Şekilde görülen her renk bir kümeyi ifade ederken, kümelerin oluşumu da birbirleriyle yakın ilişki/anamlı anahtar kelimelerin bir araya getirilmesiyle oluşmaktadır. Kelimeler arasındaki çizgiler de birbirleriyle olan ilişkileri ifade etmektedir.



Şekil 1. WOS Veritabanı havacılık ve dijital ana teması eş-birliktelik ağ analizi

Şekil 1’de yer gösterilen ağ analizine göre en çok sıklığa sahip kelime olan ‘Havacılık (Aviation)’, mavi renk ile gösterilen üçüncü küme içerisinde yer almaktadır. Buna göre havacılık kelimesi ‘dijitalleşme’ bağlamında ‘Uçak Mühendisliği, Artırılmış Gerçeklik, Otomasyon, Havacılık Eğitimi, İletişim, Dijital İki, Gelecek, Endüstri 4.0, Yenilik, İnternet ve Teknoloji’ kelimeleri ile aynı küme içerisinde yer almaktadır. Bu noktada araştırma sorusu olan havacılık sektöründe dijitalleşmenin verimliliğe olan katkısını ölçmek için listelenen 390 kelimeye üçüncü anahtar kelime olarak ‘verimlilik (productivity)’ eklenmiş ve nihai sonuç olarak yalnızca 3 adet çalışmaya ulaşılabilmektedir. Bu çalışmalardan ikisi (Shunmugasundaram ve diğerleri, 2020; Pan ve diğerleri, 2016) üretim ve malzeme ile ilgili mühendislik ağırlıklı çalışmalar iken, üçüncü çalışma (Nicchiotti, 2014) havacılıkla ilgili olmakla birlikte yine bakım-onarım ve mühendislik odaklı bir yaklaşımı içermektedir. Ancak araştırmanın amacı doğrultusunda değerlendirildiğinde listelenen bu üç çalışmanın da ‘havacılık, dijital ve verimlilik’ odağında çalışmalar olmadığı görülmektedir.

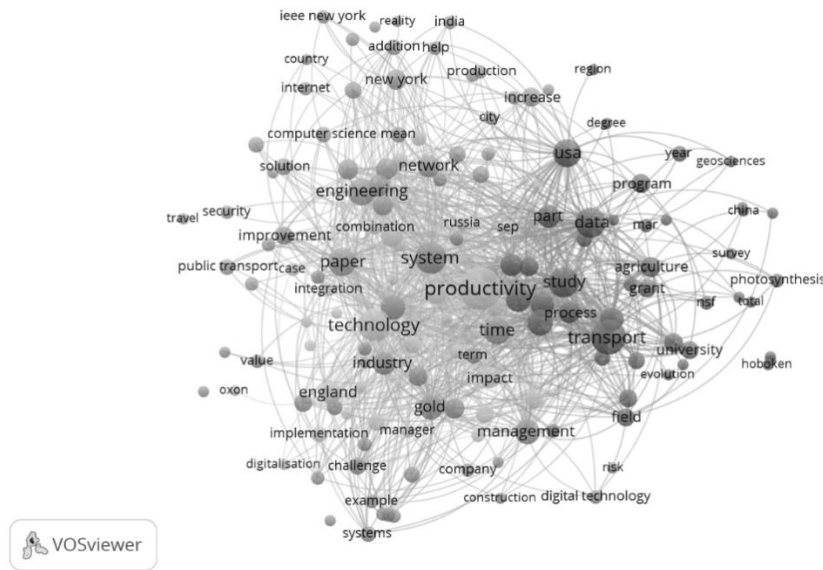


Şekil 2. Scopus veritabanı havacılık, dijital ve verimlilik ana teması eş-birliktelik ağ analizi

Birinci adımın ikinci aşamasında, WOS veri tabanında ‘havacılık, dijital ve verimlilik’ kelimeleri ile yalnızca 3 çalışmaya ulaşılması ve bunların da kapsam dışında olması sebebiyle daha geniş bir havuza sahip olan Scopus veri tabanında bir araştırma yapılmıştır. Benzer şekilde ilk olarak ‘havacılık ve dijital’ kelimeleri birlikte kullanılmış, 1580 sonuca ulaşılmıştır. Alanı ve anlamı daraltmak için ‘verimlilik’ kelimesi

de birlikte aramaya dâhil edilince 33 adet çalışmaya ulaşılmış ve bunların detayları VOSViewer'da değerlendirilmek üzere dışa aktarılmıştır. Şekil 2'de aktarıldığı üzere bu 33 çalışmada kullanılan anahtar kelimelerden benzer şekilde bir ağ analizi oluşturulmuştur. Buna göre yazılım tarafından kırmızı renk ile gösterilen kümenin dijitalleşme ile daha yoğun ilgili olduğu görülmektedir. Bu bağlamda da *'Dijital İkiz, Yapay Zekâ, Nesnelerin İnterneti (IoT), Havaaracı Üretim ve Bakımı ve Operasyonel Süreçlerin'* birbirleriyle yakın ilişkili olduğu söylenebilmektedir.

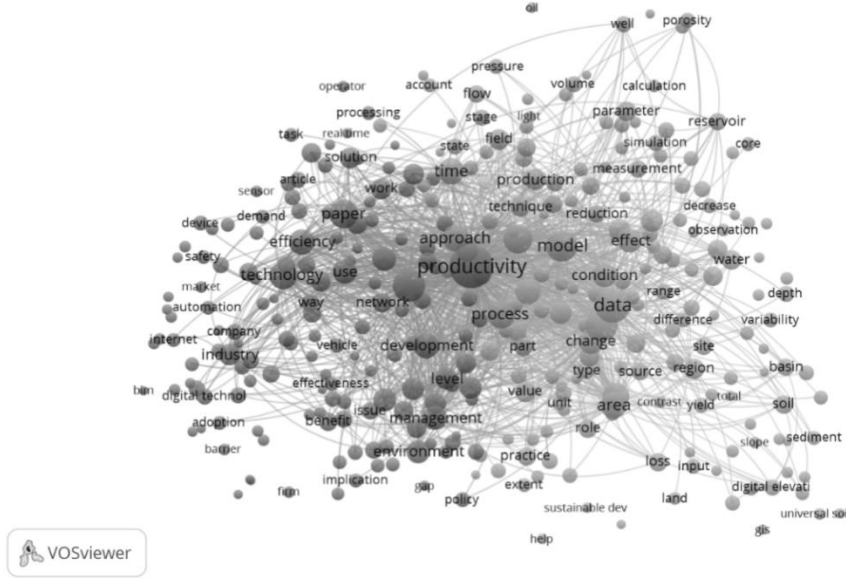
İkinci adımda farklı çalışmalara da ulaşabilmek adına kullanılan anahtar kelimelerde küçük bir değişiklik yapılmıştır. Birinci adımdan farklı olarak WOS veri tabanında havacılık kelimesi verimlilik kelimesi ile değiştirilerek 'verimlilik ve dijital' anahtar kelimelerini içeren araştırmalar listelenmiş ve 2570 toplam sonuca ulaşılmıştır. Birinci adımdaki sonuçlardan farklı sonuçlar elde etmek ve kapsamı genişletmek amacıyla da havacılık yerine daha genel bir kavram olan 'ulaştırma (transport)' anahtar kelimesi ilave edilmiş ve 'verimlilik, dijital ve ulaştırma' anahtar kelimelerinin birlikte aranması sonucu 40 adet sonuç listelenmiştir. Listelenen ilgili çalışmalar VOSViewerde 'metin içi tüm kelimeler' bağlamında incelenmek üzere dışa aktarılmıştır. VOSViewer yazılımı aracılığıyla kelimeler arasında eş-birliktelik ağ analizi yapılmış ve Şekil 3'teki görsel elde edilmiştir.



Şekil 3. WOS veri tabanı havacılık, dijital ve ulaştırma ana temalı eş-birliktelik ağ analizi

Şekil 3'te görüldüğü üzere 'verimlilik' kelimesi en çok tekrar edilen kelime olarak öne çıkmakta ve sarı küme içerisinde yer almaktadır. Diğer yandan 'ulaştırma' kelimesi de yüksek sıklık ile öne çıkan ve kırmızı küme içerisine alınan bir kelimedir. Her iki kelimenin ve kümenin birbirleriyle yakın bir ilişkisi olduğu görülse de sarı renkli kümede 'verimlilik' kelimesiyle yakın anlamda yer alan *'Dijital İkiz, Dijitalleşme, Teknoloji, Entegrasyon, Etkinlik ve Performans'* kelimeleri çalışmanın havacılık/ulaştırma bağlamında değerlendirildiğinde dikkat çeken bir şekilde öne çıkmaktadır.

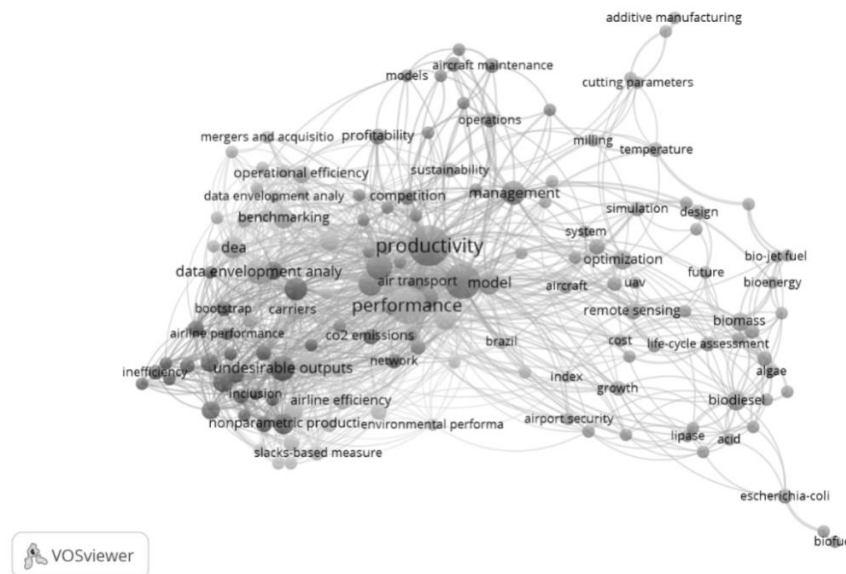
Metodolojinin ikinci adımının ikinci aşamasında Şekil 3'te WOS veri tabanından elde edilen sonuçlar itibarıyla ortaya konan analizin aynısı daha geniş kapsamlı değerlendirme amacıyla Scopus veri tabanından elde edilen sonuçlarla tekrar edilmiştir. Benzer şekilde 'Dijital ve Verimlilik' kelimeleri ile Scopus veri tabanında 4662 sonuca ulaşılırken, 'Ulaştırma' kelimesinin ilavesi ile 385 sonuç listelenmiş ve dışa aktarılmıştır. Bu 385 sonuçla yapılan 'metin içi tüm kelimeler' bağlamındaki analiz sonucu Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Scopus veri tabanı dijital, verimlilik ve ulaştırma ana temalı eş-birliktelik ağ analizi

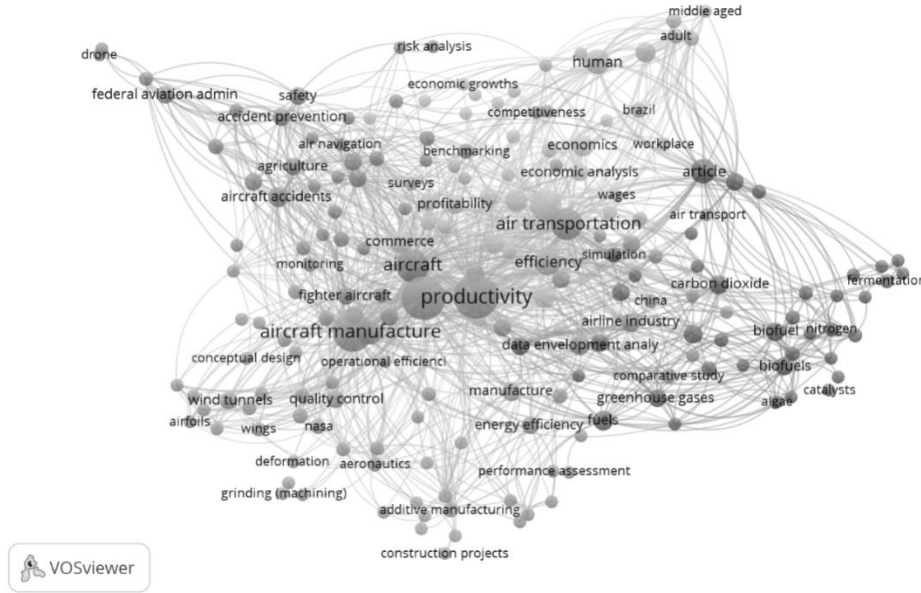
Şekil 4'te yer verilen ağ analizinde kırmızı renk ile gösterilen kümede 'verimlilik, dijital ve ulaştırma' kelimeleri birlikte yer almaktadır. Aynı küme içerisinde bu kavramlarla yakın ilişki içerisinde olan ve çalışma kapsamı içerisinde öne çıkan diğer kelimeler sırayla 'Adaptasyon, Araçlar (Taşıtlar), Uygulama, Yapay Zekâ, Otomasyon, Büyük Veri, Rekabet, Etkinlik, Gelecek, Bilgi ve İletişim, Yenilik, Entegrasyon, İnternet, Nesnelerin İnterneti, Sürdürülebilirlik ve Teknoloji' şeklindedir.

Metodolojinin son adımının ilk aşamasında yine WOS veri tabanında 'havacılık ve verimlilik' anahtar kelimeleri ile birlikte arama yapılmış ve 156 sonuca ulaşılmıştır. Elde edilen bu sonuçlar dışa aktararak VOSViewer programında analizi yapılmış ve Şekil 5'teki görsel oluşturulmuştur. Analiz, çalışmalarda "anahtar kelimeler" dikkate alınarak yapılmış ve sonuç olarak 10 farklı grupta 148 kelime ile ağ analizi oluşturulmuştur. Havacılık ve verimlilik anahtar kelimelerinden oluşturulan arama sonuçları sonucu elde edilen bu veriler içerisinde 'dijital ve dijitalleşme' anlamı taşıyan herhangi bir kelimeye/ilişkiye rastlanmamıştır. Havacılık ve verimlilik odaklı çalışmalar mavi renkli kümede de bir araya geldiği üzere "Havayolu, Havalimanı, Rekabet, Bölgesel Kalkınma" gibi kelimelerle yakın ilişkide olduğu ortaya konmuştur. Diğer yandan turuncu renkli kümede bir araya gelen "Yakıt, Emisyon, Enerji" gibi kelimeler de havacılık ve verimlilik ana temasındaki çalışma yoğunluğunun olduğu bir başka alt alanı göstermektedir. Dijital dönüşüm veya yenilik kavramına en yakın kelime olarak UAV (Unmanned Air Vehicle – İnsansız Hava Aracı) kavramının ortaya çıktığı ancak onun da zayıf bir anlam ilişkisi içerisinde yer aldığı görülmektedir.



Şekil 5. WOS veri tabanı havacılık ve verimlilik ana temalı eş-birliktelik ağ analizi

Metodolojinin son adımının ikinci aşamasında WOS veri tabanında 'havacılık ve verimlilik' kelimeleri ile yapılan aramanın aynı Scopus veri tabanında yapılarak daha kapsamlı sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. İlgili taramada 271 sonuca ulaşılmış ve sonuçlar VOSViewer programında analiz edilmek üzere dışarı aktarılmıştır. Şekil 6'da gösterilen ağ analizi, çalışmalardaki "anahtar kelimeler" dikkate alınarak yapılmış ve sonuç olarak 8 farklı grupta 198 kelime ile ağ analizi oluşturulmuştur. WOS veri tabanına benzer şekilde bu veriler içerisinde 'dijital ve dijitalleşme' ile ilgili kelimelere rastlanmamıştır. WOS veri tabanından farklı olarak Şekil 6'da yeşil renk ile ifade edilen ve içerisinde havacılık kelimesinin de yer aldığı kümede "yenilikçi teknolojiler" anahtar kelimesine rastlanmıştır. Yeşil küme içerisinde yer alan/ilişkili bulunan diğer kelimelerin ise 'Aerodinamik, Havacılık ve Uzay, Hava aracı, Hava aracı Üretimi, Hava aracı Motoru, Kanat ve Yapısı ve Kalite Kontrol' gibi mühendislik ağırlıklı bir temaya ait olduğu görülmektedir.



Şekil 6. Scopus veri tabanı havacılık ve verimlilik ana temalı eş-birliktelik ağ analizi

3. DEĞERLENDİRME

Endüstri 4.0 süreci ile hemen hemen tüm sektörlerde yaşanan dijital dönüşümün havacılık sektöründeki durumunu anlamaya yönelik yapılan bu çalışmada VOSViewer programı aracılığıyla yapılan analizler sonucu dikkat çekici bazı sonuçlara ulaşılmıştır. Yapılan 6 farklı analizde 'havacılık, dijitalleşme ve verimlilik' kelimeleri bağlamında öne çıkan ortak nokta ise mühendislik ve Ar-Ge odağında anahtar kelimelerin yoğunluğudur. İlk analizde de bahsedildiği üzere 3 ortak kelimenin birlikte aranması ile ortaya çıkan 3 çalışmanın da mühendislik odaklı konular olması bunu doğrular niteliktedir. Bunun yanı sıra Endüstri 4.0 ile hayatımıza giren çeşitli kavramlar da bu analizlerde dikkat çekmektedir. Tüm bu analizler sonucu elde edilen sonuçlar ve özellikle yöntem kısmında birinci aşamanın ikinci adımı olarak (Scopus: Havacılık + Dijital + Verimlilik) yapılan araştırma sonucu listelenen 33 çalışma detaylı bir şekilde incelenmiştir.

3.1. Havacılık Sektöründeki Kavramsal Çalışmalara Yönelik Değerlendirme

VOSViewer programı ile yapılan analiz sonucunda havacılıkta dijitalleşme ve verimlilik ilişkisinin sektörel açıdan değerlendirilmesinde bazı dikkat çekici kavramlar öne çıkmaktadır. Yapılan 6 farklı analizde sırasıyla alfabetik olarak 'Dijital İkiz, Nesnelerin İnterneti, Teknoloji, Yapay Zekâ, Yenilik' anahtar kelimelerin kesişim kümesinin elemanları olduğu görülmektedir. Genel bir ifadeyle 'aerodinamik, havaaracı, motor, kalite, yenilikçi' gibi kelimeleri içeren kümeler 'Teknolojik'; yakıt, emisyon, enerji gibi kelimeleri içeren kümeler 'Çevresel' ve rekabet, havalimanı, havayolu, kalkınma gibi kelimeleri içeren kümeler ise 'Yönetimsel' adı ile özetlendirilebilir.

Listelenen ve analizlere tabi olan çalışmalar içerisinde ise 'Havacılık ve Dijital' anahtar kelimeleriyle yapılan aramada 'Verimlilik' bağlamında değerlendirilen çalışmalarda elde edilen 33 sonuç detaylıca incelenmiştir. Çalışmaların bir kısmı konu ile ilgisiz iken, bir kısmı ise ilgili kavramları özet, anahtar kelime ya da metin içinde bir şekilde birlikte kullanmış ancak 'havacılıkta dijitalleşme ve verimlilik' ilişki odağında değerlendirildiğinde anlamlı bir sonuç elde edilememiştir. Bu sonuçlar ağırlıklı olarak uçak/havaaracı teknolojilerine yönelik teknik çalışmaları (Van Seeters ve diğerleri, 2011; Liu ve diğerleri, 2017; Devaev ve Makhanko, 2018; Ferrell, 2018, Kinard, 2018; Alexander ve diğerleri, 2020; Panzone ve diğerleri, 2020), havacılık ve uzay endüstrisine yönelik çalışmaları (Sciortino ve Bergamini, 2015; Lappas ve diğerleri, 2019)

ve bilgi ve iletişim teknolojilerine yönelik çalışmaları (Lakshman ve Byali, 2016; Chhaya ve diğerleri 2019) kapsamaktadır.

Konunun kapsamına yönelik çalışmalarda ise bazı ilgi çekici sonuçlar da elde edilmiştir. Sonraki nesil (NextGen) hava taşımacılığı sistemine dair bir çalışmada hava trafik sistemlerine yönelik yapılacak bir yatırımın hava trafik kontrolörlerinin uçaklarla bağlantı/iletişiminde artan etkinlikle azalan iş yüklerinin, hava trafik sisteminin bütününe yönelik verimliliğini artırabileceği öne sürülmektedir (Gormley ve diğerleri, 2011). Bir diğer dikkat çeken çalışmada havacılıkta amaçlara göre yönetim (Management by Objectives-MBO) anlayışının teknolojik yatırımlarla desteklenmesi durumunda öz hedeflere yönelme, çalışanlar arasında sinerjiyi artırma ve iş yükünü doğru kullanma gibi unsurlarla etkinlik ve verimlilik açısından önemli bir katkısı olduğu belirtilmektedir (Abdallah ve Elhoss, 2019).

Havacılık sektöründe son yılların popüler uygulama alanlarından biri olan insansız hava araçları (İHA), dijitalleşmenin de etkisiyle farklı bir boyuta ulaşmış ve neredeyse her sektör, kurum ve birey için erişilebilir hale gelmiştir. Bu noktada İHA'ların tarım sektöründe kullanımına yönelik bir çalışmada, tarım arazilerinin haritalandırılmasından kontrolüne dek birçok süreçte İHA'ların yenilikçi uygulamaları ile geleneksel yöntemlere kıyasla daha basit, erişilebilir ve verimli bir sonuç elde edildiği belirtilmektedir (Perz ve Wronowski, 2019).

Endüstri 4.0 ile birlikte gündeme gelen çeşitli yenilikçi yaklaşımların havacılık sektöründe kullanımına yönelik akademik çalışmalardan biri de sektördeki önemli kurumların üniversitelerle olan iş birlikleri sonucu uyguladıkları simülasyon yöntemidir. Havacılık işletmelerinin üniversitelerin de desteğiyle ortaya konan simülasyonlar ile iş gücü yönetiminden envanter yönetimine ya da bir 'dijital fabrika' örneği ile havacılık sektörüne yönelik ürünlerin eksiksiz üretilmesi ile verimliliği artırmaya yönelik çalışmalar da yapılmaktadır (Guyon ve diğerleri, 2019). Benzer şekilde bir başka çalışmada da dijitalleşmenin havacılık sektörünün en kritik süreçlerinden biri olduğu belirtilirken özellikle bakım onarım alanında dijital teknolojilerin yüksek verimlilik sağlayabileceği, bu dönüşümün tüm paydaşlar tarafından büyük bir hevesle beklendiği ancak bu süreçte dijitalleşme/yenilik vizyonu olan kişi ve kurumların avantajının daha yüksek olduğu öne sürülmektedir (Chang ve diğerleri, 2019). Havacılıkta dijitalleşme ve verimliliğe dair önemli çalışmalardan bir diğeri ise, fiziki ikizinin (uçak vb.) ultra gerçekçi bir kopyası olarak dijital bir yansımaları ifade eden "Dijital İkiz" kavramı ile ilgili iken, bu kavram havacılık sektöründe ağırlıklı olarak havaaracı bakım tahminlemesinde kullanılmakta ve oldukça verimli bir yol olarak ifade edilmektedir (Barricelli ve diğerleri, 2019).

3.2. Havacılıkta Verimlilik ve Dijitalleşme Üzerine Örnek Uygulamalar

Yapılan analizler sonucu kesişim kümesinin de dikkat çeken kavramlarından biri olan 'Dijital İkiz' kavramının, listelenen sonuçların detaylı analizi sonucunda da çalışmalarda anlamlı ve kavrama yakın anlamda kullanıldığı görülmektedir. Bu bağlamda havacılıkta dijitalleşme ve verimlilik ilişkisi üzerine bir değerlendirme yapıldığında yenilikçi teknolojiler, simülasyon, yapay zekâ gibi kelimelerin 'Dijital İkiz' ana kavramı üzerinde şekillendiği görülmektedir. Buna paralel olarak havacılıkta dijital ikiz uygulamaları üzerine içerik analizinden ayrı olarak literatürde bir araştırma daha yapmanın uygun olacağı düşünülmüş ve aşağıdaki gibi bazı çalışmalar öne çıkmıştır.

Dijital ikiz kavramı, fiziki ikizinin ömrünü/durumunu yansıtmak için birçok karmaşık ve entegre sistemi kullanarak oluşturulan ultra gerçekçi bir simülasyonu ifade ederken 'fiziksel ürün, dijital ürün ve aradaki bağlantı' olmak üzere 3 bölümden oluşmaktadır (Glaessgen ve Stargel, 2012). NASA'nın araştırmalarıyla dikkat çeken dijital ikiz kavramı, fiziksel ürünün/sistemin sağlığı, ömrü, başarılı olma ihtimali, karşılaşılabilecek sorunlar gibi birçok durum hakkında gerçekçi ve sürekli tahminler paylaşarak ilgili ürün/sistemin performansını artırmaya yönelik bir katkı sağlamaktadır. Birçok farklı sektörde birçok süreç ve ekipman için dönüşümün/adaptasyonun hızlandığı dijital ikiz kavramı fiziksel kaynaklardan gelen bilgileri gerçek zamanlı olarak dijital anlamda görselleştirerek o fiziksel ürünün durumunu anlık takip etmeyi kolaylaştıran bir uygulamadır.

Havacılık sektöründe de popüler konulardan biri haline gelen dijital ikiz, uçağın yapısal ömrünü tahmin etmek, uçakta hasar/arızanın yeri, boyutu ve yönünü tahmin etmek; hasar/arızayı gerçek zamanlı olarak tespit ve takip etmek ve havacılık operasyonları ve bakım planlamalarını sağlıklı yürütmek gibi amaçlarla sıklıkla kullanılmaktadır (Tao ve diğerleri, 2019). Havacılık sektöründe dijital ikiz bir uçak örneği üzerinden ele alınırsa motor içindeki türbin kanadının ömründen uçak gövdesine ve aviyonik sistemlere dek tüm uçağa dair bilgilerin aşırı hassasiyetle tahminini sağlayarak yakıt verimliliği ve emniyetin en üst düzeyde uygulanması gibi birçok aşamada etkin ve verimli bir endüstriyel hizmet sağlamaktadır (Augustine, 2020: 11). Dijital ikiz ve havacılıkla ilgili çalışmalardan bir başka örnek olarak hava kargo süreçlerinde yükleme tipinden rotaya 5 farklı senaryo üzerinde bir çalışma yapılmış ve dijital ikiz uygulamaların kargo yükleme süreçlerinden, konteynerlerin konumuna hava kargo süreçlerinden özellikle aksaklık yaşanması muhtemel

durumların çözümünde performansı artırmaya yönelik avantaj sağlayabileceği belirtilmektedir (Wong ve diğerleri, 2020).

Akademik ve teorik çalışmaların yanı sıra havacılıkta mevcut uygulamalardan biri Hollanda Schiphol havalimanı üzerinde uygulanırken, dijital ikizin tüm havalimanı boyunca potansiyel tüm problemler üzerinde senaryolar sunduğu ve bunun havalimanı için hem zaman hem de para tasarrufu sağladığı belirtilmektedir (Bauman, 2019). Havacılık sektörünün önemli paydaşlarından SITA, geleceğin havalimanları için önümüzdeki 10 yıllık tahminde tüm paydaşların gerçek zamanlı operasyonlar tasarlamak, operasyonel verimliliği artırmak ve yolcu deneyimini geliştirmek adına dijital ikiz teknolojisine başvuracağını tahmin etmektedir (Ubudu, 2020). Bir başka örnek çalışmada ise dijital ikiz ile yolculara havalimanlarında bir sanal tur imkânı ile hem eğlence/boş zaman için bir öneri hem de bir rehberlik/yönlendirme hizmeti olarak alternatif yaratması ve havalimanlarının herkes için erişilebilir olmasına yönelik çalışmalar söz konusudur (Airport Industry Review, 2019).

Dijital ikiz kavramının ürün/hizmetler ve süreçlere dair kullanımın yanı sıra insan üzerinden de çeşitli kullanımlarının olduğunu aktaran çeşitli akademik çalışmalar da söz konusudur. Bir spor takımındaki sporcular üzerinde yapılan bir araştırmada (Barricelli ve diğerleri, 2020: 26658) dijital ikizin performans ve fiziksel durumu izlemedeki başarısı vurgulanmış ve tıp dâhil diğer alanlara yönelik kullanımı önerilmiştir. Diğer sektörlerdeki benzer uygulamaların havacılık sektöründe havayolu ve havalimanları için de yolcular açısından ilham verici bazı ipuçları sağlayabileceği de dikkate alınmalıdır. Fiziksel ürünler için kullanılan dijital ikiz teknolojisinin, insan merkezli çalışmalarda kullanılması ile ilgili bir teknik olarak Dijital İnsan Modelleme (Digital Human Modeling), havacılık sektöründe de kullanılmaktadır (Maurya ve diğerleri, 2019). Örnek çalışmada pilotlar için kokpit tasarımından yolcular için uçak koltuğu ve emniyet kemeri tasarımına kadar geniş bir yelpazede kullanım alanı sağlamanın yanı sıra çalışanların stres ve motivasyonunu artırarak örgütsel verimliliği, yolcuların konforuna etki ederek de müşteri memnuniyetini artırmanın bir yolu olarak dikkat çekmektedir. Dijital ikiz kavramının insan (yolcu) açısından değerlendirilmesine yönelik bir tren istasyonunda yapılan çalışma havalimanları ve yolculara adaptasyon açısından dikkat çekici sonuçlar ortaya koymaktadır. Dijital ikiz sayesinde yolculara daha özelleştirilmiş yolcu hizmeti, akıllı ve hızlı biletleme hizmeti, istasyon içi dinamik/anlık rehberlik hizmeti ve yolcular için istasyonlarda daha konforlu bekleme alanları sağlamak gibi amaçlar için kullanılabilirliği belirtilmiştir (Li ve diğerleri, 2020).

İnsanlarda dijital ikiz uygulamalarının çalışanların işe ve fiziksel ortama uyumuna dair ergonomik tahminlemenin ötesinde doğrudan müşteriler/tüketiciler için de mümkün olabileceği bu örnek dikkate alınmalıdır. Buna göre dijitalleşme sayesinde tüketicilerin davranışlarını tahminleme ile işletmeler tüketicilere mümkün olan en uygun şartlarda (yer, zaman, fiyat vb.) ihtiyaç olan ürün/hizmeti sunabilecekken, tüketiciler de çeşitli ürün/hizmetlere yönelik 'kişiselleştirilmiş' öneriler sunulabilecek olması yüksek oranda memnuniyetini artırarak, tüm paydaşlar açısından bir kazan-kazan durumu yaratabilecektir (Augustine, 2020: 25; Vijayakumar, 2020: 265). Dijital ikiz kavramının insan modellemesi için de örneklerinin birçok sektör ve alan için çoğaldığı görülmektedir. Günümüzde tüketicilerin son derece kişiselleştirilmiş ve dijital (yenilikçi, akıllı vb.) ürün/hizmetlere olan talebi artmış ve Endüstri 4.0 ile değişmeye başlayan iş süreçlerinin de zorlamasıyla bu kaçınılmaz hale gelmişken, bu şartlarda 'verimsiz' geleneksel iş ve pazarlama stratejileri yerini dijital ikiz gibi mevcut dijital yetenekleri müşteri odağında kullanabilme potansiyeline de dikkat almak bir zorunluluk olacaktır (Lim ve diğerleri, 2019).

4. SONUÇ

Havacılıkta teknolojik gelişmeler, yenilikler ve paralel olarak dijitalleşme havacılığın doğası gereği var olduğu günden bugüne devam eden bir süreçtir. Günümüze dek havacılık teknolojisinde çeşitli yenilikler, değişim ve dönüşümler hep söz konusu iken Endüstri 4.0 kavramı ile öne çıkan dijitalleşme bugüne dek yaşanan süreçte sektöre ve ilgili profesyonellere başka bir fırsat yaratma ya da bir meydan okuma olarak karşılıklarında durmaktadır. Bu anlamda başta üretim süreçleri olmakla birlikte Endüstri 4.0 kavramı ile dijitalleşme tüm sektörler için kaçınılmaz bir adım olarak görülmektedir.

Bu çalışmada, Endüstri 4.0 kavramının gündemde olduğu son 10 yıl içerisinde yapılan akademik çalışmalar, 'Havacılıkta Dijitalleşmenin' geleneksel performans göstergelerine kıyasla 'Verimlilik' üzerine olan etkisi bağlamında içerik analizi yöntemi ile incelenmiştir. Bu inceleme ile amaç 'Havacılıkta Dijitalleşme ve Verimlilik' kavramı üzerine dikkat çeken çalışmalar, konular ve ipuçlarını ortaya koyabilmektedir. Bu anlamda en kaliteli akademik çalışmaların tarandığı WOS ve Scopus veri tabanlarında anahtar kelimelerle 6 farklı arama yapılmış ve sonuçlar VOSViewer programı aracılığıyla 6 farklı analize tabi olmuştur. Analizde ortaya çıkan anahtar kelimeler, kümeler ve ilişkiler odağında 'Havacılıkta Dijitalleşme ve Verimlilik' odağında 3 farklı çalışma alanı olduğu söylenebilir. Genel bir ifade ile 'aerodinamik, havaaracı, motor, kalite, yenilikçi' gibi kelimelerin bir arada ve ilişkili olduğu görülmekte ve bunlar 'Teknoloji (Tasarım, Mühendislik)' gibi alanlarda çalışmaların yoğunluğunu ortaya çıkarmaktadır. Devamında 'yakıt, emisyon, enerji, performans' gibi kelimeleri içeren ilişki ve küme yoğunluğu yine teknolojik çalışmalarla paralel olmakla

birlikte 'Çevre' bakış açılı çalışmaların da sıklığını göstermektedir. Son olarak diğerlerine kıyasla oldukça az ancak yine de anlamlı bir ilişki içeren 'havayolu, havalimanı, kalkınma, ekonomi' gibi kelimeleri içeren kümeler de yer almakta ve bunların da 'Yönetim' bakış açısını yansıtmakta olduğu söylenebilir.

Teknoloji, Çevre ve Yönetim ana temalı üç çalışma konusunda ve ilgili anahtar kelimeler ile yapılan içerik analizinde çeşitli kavramlar öne çıkmakta iken bunların içinde en dikkat çeken 'dijital ikiz' kavramı olmuştur. Gerek sektörde kurumlar ve sistemler tarafından gerekse de sayıca az olsa da insan odağında dijital ikiz kavramının çeşitli çalışmalara konu olduğu görülmekte ve tüm paydaşlar açısından verimlilik anlamında dikkat çekici bir katkısı olabileceği belirtilmektedir. Ancak literatürde ve uygulamalardaki örneklerden farklı olarak dijital ikiz kavramının 'sosyal bilimler' bakış açısıyla ele alınması literatüre önemli ve farklı katkı sağlayacak unsurlardan biri olacaktır.

Farklı örneklerde görüldüğü üzere birçok sektörde uygulanabilir bir kavram olarak dijital ikizin özellikle üretim süreçlerinde geleceğin fabrikalarını inşa ederken kritik öneme sahip olacağı bir gerçektir. Dijital ikiz ile işletmeler kullanılan kaynakları ve maliyetleri azaltma ve etkinlik ve verimliliği de artırabilme imkânına sahipken adaptasyon sürecinde karşılaşacağı zorluklar sırasıyla sanal modelleme, işletmelerin organizasyon yapısı ve gerçek zamanlı veri ve senkronizasyonu sağlama olarak özetlenmektedir (Pires ve diğerleri, 2019). Olumlu anlamda ise örgütsel düzeyde dijital ikize dönüşüm sürecinin işletmeler için 'operasyonel maliyetleri azaltma, marka bütünlüğü ve müşteri deneyimini artırma, yeni gelir alternatifleri yaratma ve rekabetçi farklılık elde etme' amacıyla performans iyileştirici bir unsur olacağı öne sürülmektedir (Parmar ve diğerleri, 2020). Diğer yandan dijital ikiz kavramı ile nispeten düşük maliyetli bir çözümle rekabet gücünü artıranlar iken, aynı zamanda çalışanların daha proaktif bir rol üstlenmesine ve müşterilerden tedarik zincirine tüm paydaşların faydalanabileceği bir yapının sağlanmasına olanak verecektir (Lim ve diğerleri, 2019).

Dijital ikiz kavramının faydası ve avantajlarına yönelik çalışmaların yanı sıra olumsuz yönlerine dair bazı eleştirel çalışmalar da söz konusudur. Dijital ikiz kavramının bir fiziki ürün/sistemin ömrü boyunca karşılaşabileceği tüm olası senaryoları temsil edemeyeceği ve havacılık gibi yüksek emniyet/risk düzeyine sahip sektörlerde sistemin kendisinin de bir risk ve belirsizlik katabileceği iddia edilmektedir (Ibrion ve diğerleri, 2019). Tüm yenilikçi teknolojilerde karşılaşılabilecek sorunlar olabileceği de bu aşamada dikkate alınması gereken unsurlardan biridir.

Bu anlamda havacılık sektöründe de Ar-Ge, tasarım, mühendislik gibi konulardan bağımsız olarak havaalanı ve havayolu yönetimi gibi alanlarda dijital ikiz kavramının kullanılması pazarlama stratejileri ve yolcu memnuniyeti açısından dikkat çekici sonuçlar yaratma potansiyeline sahiptir. Hâlihazırda havalimanları özelinde kısıtlı sayıda örnek ve hedef çalışma söz konusu olsa da, tren istasyonlarında yapılan çalışmalar havalimanı adaptasyonu açısından örnek teşkil edebilir. Havalimanlarının karmaşık yapısı, çok farklı ve dinamik süreçleri, çok değişken yolcu profilleri gibi zor bir yönetim anlayışında dijital ikiz kavramı hem yöneticilere hem de yolculara önemli düzeyde katkı ve katma değer sağlayacak bir yenilik olacaktır. Havalimanlarındaki check-in, boarding, arrival gibi standart yolcu hizmetleri süreçlerinde, bagaj alım/takibinde, kapı tahsislerinde ve hatta slot süreçlerinde dahi dijital ikizin havalimanı operasyonlarında verimliliğe önemli katkı yapacağı düşünülmektedir. Aynı şekilde havayolları açısından uçuş sırası hizmetlerde yolcunun durumunu takip etmek, kabin hizmetlerinde anlık ve yolcuya özel hizmet verebilmek de yolcu memnuniyeti açısından dikkat çekici olacaktır. İleriki çalışmalarda dijital ikizin havalimanı ve havayolu operasyon süreçlerindeki etkisi üzerine yapılacak çalışmalar literatürdeki bu eksikliği giderecek ve aynı zamanda sektördeki profesyonellere de yol gösterici sonuçlar sağlayabilecektir. Dijital ikizin teknik (teknolojik) kullanımın yanı sıra yönetim ve pazarlama anlamında kullanımı da mutlaka dikkate alınmalıdır. Havacılık sektörü de özellikle havalimanları açısından bu yenilikçi teknolojinin kullanımı için uygun alanlar olduğu düşünülmektedir.

Bu çalışmada da çeşitli kısıtlar söz konusudur. Dijital dönüşüm sürecinin çok yeni olması ve havacılık sektöründe de uygulamaların henüz gündemde olması akademik çalışmalarda da benzer anlamda kısıtlı çalışmaların ortaya konmasına sebep olmuştur. Hem teorik hem de pratik anlamda havacılıkta dijitalleşme uygulamalarının artması verimliliğe olan etkinin değerlendirilmesi adına ileriki çalışmalarda daha dikkat çekici sonuçların ortaya çıkmasına olanak verecektir.

KAYNAKÇA

- Abdallah, F. ve Elhoss, W. (2019). "The Impact of Management by Objectives (MBO) on Organizational Outcome in a Digital World: A Case Study in the Aviation Industry", *International Conference on Digital Economy*, 15-28.
- Airport Industry Review (2019). "The Digital Twin: Creating Virtual Airport Tours with Ocean 3", https://airport.nridigital.com/air_aug19/the_digital_twins_creating_virtual_airport_tours_with_ocean3d, (Erişim Tarihi: 23.07.2021).
- Alam, M.A. (2016). "Techno-Stress and Productivity: Survey Evidence from the Aviation Industry", *Journal of Air Transport Management*, 50, 62-70.
- Alexander M, Gubbels A., Gowanlock D, Dones F, Rossi G. ve Spano M. (2020). "A Systems Engineering Approach for Enabling Research and Development in the Vertical Lift Autonomy Flight Sciences Domain", *Vertical Flight Society's 76th Annual Forum and Technology Display*.
- Atalık, Ö., Akan, A.G.Ş. ve Bakır, A.G.M, (2019). "Havacılık 4.0: Havayolu ve Havaalanı Endüstrisinde Güncel Endüstri 4.0 Uygulamaları", *Scientific Committee*, 879.
- Augustine, P. (2020). "The Industry Use Cases for the Digital Twin Idea, In Advances in Computers" *Advances in Computers*, 117(1), 79-105.
- Barricelli, B.R., Casiraghi, E. ve Fogli, D. (2019). "A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications", *IEEE Access*, 7, 167653-167671.
- Barricelli, B.R., Casiraghi, E., Gliozzo, J., Petrini, A. ve Valtolina, S. (2020). "Human Digital Twin for Fitness Management", *IEEE Access*, 8, 26637-26664.
- Bauman J. (2019). "Digital Twin Helps Airport Optimize Operations", <https://www.esri.com/about/newsroom/wp-content/uploads/2019/10/airport.pdf>, (Erişim Tarihi: 23.07.2021).
- Budd, T., Intini, M. ve Volta, N. (2020). "Environmentally Sustainable Air Transport: A Focus on Airline Productivity", *Sustainable Aviation*, Palgrave Macmillan, Cham.
- Cam, A.C. ve Durmaz, V. (2018). "Dijital Havacılık: Güncel Uygulamalarla Gelecekteki Yolcu Deneyimleri", *Electronic Turkish Studies*, 13(26), 251-266.
- Chang, S., Wang, Z., Wang, Y., Tang, J. ve Jiang, X. (2019). "Enabling Technologies and Platforms to Aid Digitalization of Commercial Aviation Support, Maintenance and Health Management", *2019 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE)*, 926-932.
- Chhaya, B N., Jafer, S. ve Durak, U. (2019). "Scenario-Based Development of DSL Models using Domain-Specific Scenario (DoSS) Framework", *AIAA Scitech 2019 Forum*, 1711.
- Defraeye, T., Shrivastava, C., Berry, T., Verboven, P., Onwude, D., Schudel, S. ve Rossi, R.M. (2021). "Digital Twins are Coming: Will We Need Them in Supply Chains of Fresh Horticultural Produce?", *Trends in Food Science & Technology*, 109, 245-258.
- Devaev, V.M. ve Makhanko, A. A. (2018). "Development of the Remotely Piloted Agricultural Aircraft (RPAA) Control System on the Basis of the Airplane MV-500", *Computer Research and Modeling*, 10(3), 315-323.
- Ferrell, U.D. (2018). "Mindful Application of Standards for Avionics-An Intentional, Systematic, and Measurable Transformation", *2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, 1-8. IEEE.
- Glaessgen, E. ve Stargel, D. (2012). "The Digital Twin Paradigm for Future NASA and US Air Force Vehicles", *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference, 14th AIAA*, 1818.
- Gökçalp, E., Gökçalp, M.O., Çoban, S. ve Eren, P.E. (2019). "Dijital Dönüşümün Etkisinde Verimli İstihdam Yönetimi: Yol Haritası Önerisi", *Verimlilik Dergisi*, 3, 201-222.
- Gormley, K.J., Kirkman, D.A., Giles, S. ve Narkus-Kramer, M.P. (2011). "Operational Preferences for ATC Data Link Equipped Aircraft: Severe Weather Reroutes", *2011 IEEE/AIAA 30th Digital Avionics Systems Conference*, 1B2-1-1B2-8, DOI: 10.1109/DASC.2011.6095963.
- Gülseren, A. ve Sağbaş, A. (2019). "Endüstri 4.0 Perspektifinde Sanayide Dijital Dönüşüm ve Dijital Olgunluk Seviyesinin Değerlendirilmesi", *European Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2(2), 1-5.
- Gürdin, B. (2020). "Yeşil Pazarlamanın Bilimsel Haritaların Görselleştirilmesi Tekniğiyle Bibliyometrik Analizi", *Econder International Academic Journal*, 4(1), 203-231.
- Guyon, I., Amine, R., Tamayo, S. ve Fontane, F. (2019). "Analysis of the Opportunities of Industry 4.0 in the Aeronautical Sector", *10th International Multi-Conference on Complexity, Informatics and Cybernetics: IMCIC 2019*, Mart 2019, Orlando, United States.
- Hannover Messe (2017). "The Better Passenger", <https://www.hannovermesse.de/en/news/news-articles/the-better-passenger>, (Erişim Tarihi: 23.07.2021).

- Ibrion, M., Paltrinieri, N. ve Nejad, A.R. (2019). "On Risk of Digital Twin Implementation in Marine Industry: Learning from Aviation Industry", *Journal of Physics: Conference Series*, 1357, DOI: 10.1088/1742-6596/1357/1/012009.
- Kinard, D.A. (2018). "F-35 Digital Thread and Advanced Manufacturing, The F-35 Lightning II: From Concept to Cockpit", *2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*, Haziran 25-29, Atlanta, Georgia.
- Klein, M. (2020a). "İşletmelerde Dijital Dönüşüm ve Etmenleri", *Journal of Business in the Digital Age*, 3(1), 24-35.
- Klein, M. (2020b). "İşletmelerin Dijital Dönüşüm Senaryoları-Kavramsal Bir Model Önerisi", *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*, 19(74), 997-1019.
- Lakshman D. ve Byali R.S. (2016). "Just-In-Time (JIT) Approach in Satellite Supply Chain Process", *Journal of Spacecraft Technology*, 27(1), 39-54.
- Lappas, V., Kostopoulos, V., Tsourdos, A. ve Kindylides, S. (2019). "Lunar in-situ Thermal Regolith Storage and Power Generation Using Thermoelectric Generators", *AIAA Scitech 2019 Forum*, 1375.
- Li, D., Yang, X. ve Xu, X. (2020). "A Framework of Smart Railway Passenger Station Based on Digital Twin", *CICTP 2020*, 2623-2634.
- Lim, K.Y.H., Zheng, P. ve Chen, C.H. (2020). "A State-of-the-Art Survey of Digital Twin: Techniques, Engineering Product Lifecycle Management and Business Innovation Perspectives", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31, 1313-1337.
- Liu, X., Zhou, D., Zhou, P. ve Wang, Q. (2017). "What Drives CO₂ Emissions from China's Civil Aviation? An Exploration Using a New Generalized PDA Method", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 99, 30-45.
- Maurya, C.M., Karmakar, S. ve Das, A.K. (2019). "Digital Human Modeling (DHM) for Improving Work Environment for Specially-Abled and Elderly", *SN Applied Sciences*, 1(11), 1-9.
- Nicchiotti, G. (2014). "Health Monitoring Requirements Elicitation Via House Of Quality", *2014 IEEE Aerospace Conference*, 1-15, DOI: 10.1109/AERO.2014.6836401.
- Pan, W.M., Li, G.H. ve Li, M.H. (2016). "Research on Computer Integrated Manufacturing of Sheet Metal Parts for Lithium Battery", *ITM Web of Conferences*, 7, 09009.
- Panzone, C., Philippe, R., Chappaz, A., Fongarland, P. ve Bengaouer, A. (2020). "Power-to-Liquid Catalytic CO₂ Valorization into Fuels and Chemicals: Focus on the Fischer-Tropsch Route", *Journal of CO₂ Utilization*, 38, 314-347.
- Parmar, R., Leiponen, A. ve Thomas, L.D. (2020). "Building an Organizational Digital Twin", *Business Horizons*, 63(6), 725-736.
- Perz, R. ve Wronowski, K. (2019). "UAV Application for Precision Agriculture", *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 91(2), 257-263.
- Pires, F., Cachada, A., Barbosa, J., Moreira, A.P. ve Leitão, P. (2019). "Digital Twin in Industry 4.0: Technologies, Applications and Challenges", *2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 1, 721-726.
- Sciortino, G.P. ve Bergamini, E. (2015). "Measuring the Socioeconomic Impacts of Italy's Space Sector Activities: ASI's Web Panel and Its Yearly Indexes for Monitoring the Drive toward the Market and the Ground Users-the Cases of Aeronautics and Software Production", *New Space*, 3(3), 191-203.
- Shunmugasundaram, M., Baig Maughal, A.A. ve Kumar, M.A. (2020). "A Review of Bio-Degradable Materials for Fused Deposition Modeling Machine", *Materials Today: Proceedings*, 27, 1596-1600.
- Tao, F., Sui, F., Liu, A., Qi, Q., Zhang, M., Song, B. ve Nee, A.Y. (2019). "Digital Twin-Driven Product Design Framework", *International Journal of Production Research*, 57(12), 3935-3953.
- Türkay, U. İ. ve Artar, O. (2021). "Havacılık Sektöründe Havalimanlarının Dijital Dönüşümü", *Working Paper Series*, 2 (1), 86-97.
- Ubudu (2020). "Leveraging the Digital Twin to Reduce Flight Delays by Optimising Airside Operations", <https://www.ubudu.com/leveraging-the-digital-twin-to-reduce-flight-delays-by-optimising-airside-operations/>, (Erişim Tarihi: 23.07.2021).
- Van Seeters, P., Crossley, W. ve Ko, A. (2011). "Revisiting the Boeing B-47 and AVRO Vulcan Configuration Comparison with Observations Relevant to New Aircraft Concepts-Part 2", *11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference, Including the AIAA Balloon Systems Conference and 19th AIAA Lighter-Than*, 6934.
- Vijayakumar, D.S. (2020). "Digital Twin in Consumer Choice Modeling", *Advances in Computers*, 117(1), 265-284.
- Wong, E.Y., Mo, D.Y. ve So, S. (2020). "Closed-Loop Digital Twin System for Air Cargo Load Planning Operations", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 34(7-8), 801-813.

- Xu, L.D. ve Duan, L. (2019). "Big Data for Cyber Physical Systems In Industry 4.0: A Survey", *Enterprise Information Systems*, 13(2), 148-169.
- Yıldırım, Y. (2019). "Endüstri 4.0'a Kapsamlı Bir Bakış: 2011'den Bugüne", *Bilgi Dünyası*, 20(2), 217-249.
- Yılmaz, Y. (2021). "Dijital Ekonomiye Geçiş Süreci, Ölçümü ve Dijitalleşme Verimlilik İlişkisi", *İstanbul İktisat Dergisi*, 71(1), 283-316.
- Yükçü, S. ve Atağan, G. (2009). "Etkinlik, Etkililik ve Verimlilik Kavramlarının Yarattığı Karışıklık", *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 23(4), 1-13.

YAPI ENDÜSTRİSİNDEKİ ÜRETİM BAŞARISININ SORGULANMASI: YENİLEŞİM, OTOMASYON, DİJİTAL DÖNÜŞÜM¹

Seçkin KORALAY², Fahriye Hilal HALICIOĞLU³

ÖZET

Amaç: Bir endüstrinin üretim başarısı, kaynaklarını ne kadar etkin bir biçimde dönüştürebildiği ve katılımcılarına maliyet, zaman, kalite ve kapsam gibi yönlerden ne kadar değer katabildiği ile ilişkilidir. Yapı endüstrisi, küresel düzeydeki önemine ve büyüklüğüne rağmen genel üretkenlik ortalamalarının altında kalmaktadır. Çalışmanın sorgu alanı bu durumun sebeplerini endüstrinin özgün özellikleri üzerinden değerlendirmektir. Bu kapsamda; yapı endüstrisinin üretimini diğer endüstrilere kıyasla ne kadar başarılı bir biçimde yürütebildiği, başarımlarını yükseltmeye yönelik son yüzyılda ne tür yenilikçi gelişmelerin yaşandığı ve bu gelişmelerin çözüm sağlamakta neden yetersiz kaldığı irdelenmektedir.

Yöntem: Çalışmada eleştirel bir inceleme yapılmaktadır.

Bulgular: Yapım sektörünün karmaşık ve özgün doğasından kaynaklı dağınık ve parçalı üretim mekanizması, robotik ve dijitalleşme gibi yenilikçi konseptlerin geliştirilmesini ve uyarlanmasını güçleştirmektedir. Başarımlarını yükseltmek için inşaat sektörüne özgü yenilikçi gelişmelerin radikal ve bütüncül bir yaklaşımla ele alınması gerekmektedir.

Özgünlük: Çalışma inşaat endüstrisi alanında inovasyon literatürüne katkıda bulunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yapı Endüstrisi, Yenileşim (İnovasyon), Teknoloji, Otomasyon, Dijital Dönüşüm.

JEL Kodları: L23, L74, O32, Q55.

QUESTIONING the PRODUCTION SUCCESS in the CONSTRUCTION INDUSTRY: INNOVATION, AUTOMATION, DIGITAL TRANSFORMATION

ABSTRACT

Purpose: The production success of an industry is related to how efficiently it can transform its resources and add value to its participants in terms of cost, time, quality, and scope. Despite its global importance and scale, the construction industry underperforms in productivity compared to general averages. This study questions the reasons for this issue regarding the peculiarities of the industry. In this context; how successfully the construction industry can carry out its production compared to other industries, what kind of innovative developments have been experienced in the last century to increase the level of success, and why these developments are insufficient to provide solutions at the desired level are examined.

Methodology: A critical examination is conducted in this study.

Findings: Complex and unique nature of the construction industry results in a decentralized and fragmented production mechanism and also hinders the development and adaptation of innovative concepts such as robotics and digitalization. In order to increase the level of success, innovative developments specific to the construction industry should be handled with a radical and holistic approach.

Originality: The study contributes to the construction innovation literature.

Keywords: Construction Industry, Innovation, Technology, Automation, Digital Transformation.

JEL Codes: L23, L74, O32, Q55.

¹ Bu çalışma, Seçkin KORALAY tarafından Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Doç. Dr. Fahriye Hilal HALICIOĞLU danışmanlığında yürütülen "Yapı Projelerinde Karmaşıklık Üzerine Bir Araştırma" başlıklı Yüksek Lisans tezinden türetilmiştir.

² Yüksek Mimar, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Bölümü, İzmir, Türkiye, seckinkoralay@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3965-6245.

³ Doç. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, İzmir, Türkiye, hilal.halicioglu@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-8797-2595 (Sorumlu Yazar-Corresponding Author).

1. GİRİŞ

İnsanların en eski ve temel uğraşlarından birisi olan yapı üretim faaliyeti; barınma, eğitim, kültürel, tıbbi, dini, askeri ve altyapı gibi birçok amaca yönelik olarak yürütülen önemli bir endüstridir (Ngowi ve diğerleri, 2005). Günümüzde küresel düzeydeki iş gücü ve üretim miktarı açısından önemli bir paya sahip olan bu endüstri (Tablo 1), diğer taraftan ise ne kadar başarılı bir üretim sergileyebildiği konusunda eleştiri altında bulunmaktadır (Winch ve diğerleri, 1998; Saidi ve diğerleri, 2016). Bir endüstrinin üretim başarısı, kaynaklarını ne kadar etkin bir biçimde dönüştürebildiği ile ilişkilidir ve yapı endüstrisi bu konuda benzer büyüklükteki endüstrilere kıyasla verimlilik, kalite, maliyet ve hızlilik gibi yönlerden beklentileri karşılayabilmekte güçlük çekmektedir (Höök ve Stehn, 2008; Janipha ve diğerleri, 2015).

Tablo 1. Yapı endüstrisinin bölgesel büyüklükleri

	<i>Bölgeler (veri yılı)</i>			
	<i>ABD (2012)</i>	<i>AB (2009)</i>	<i>Japonya (2011)</i>	<i>Çin (2011)</i>
Yapı endüstrisinin üretilen milli değerdeki oranı (%)	5	7	10	7
Yapı endüstrisi iş gücünün sayısı (milyon)	5,6	19,25	6,3	39,2
Yapı endüstrisi iş gücünün toplam milli iş gücüne oranı (%)	5	11	10	5

Kaynak: Saidi ve diğerleri (2016: 1494)

Belirtilen soruna çözüm sağlayabilmeye yönelik modern çağ içerisinde üretim sürecini destekleyebilecek çeşitli teknolojiler ve bu teknolojilerin gelişmiş endüstrilerce etkin bir biçimde kullanıldığı üretim modelleri bulunsa da (Li ve He, 2013), yapı endüstrisi tüm bunlardan sınırlı düzeyde faydalanabilmektedir. Bu durum için gösterilen temel sebep, yapı endüstrisindeki üretim ağının kendisine özgü karmaşık doğasıdır. Endüstrinin kendisine özgü özellikleri yalnızca yapım faaliyetini zorlu bir sürece büründürmemekte, aynı zamanda bu sürecin iyileştirilebilmesi konusunda hem yenilikçi çözümlerin geliştirilebilmesini hem de diğer endüstrilerden doğrudan bir teknoloji veya üretim yaklaşımı aktarımını güçleştirmektedir (Jensen ve diğerleri, 2014). Endüstrinin doğasının kapsamlı ve derinlikli olarak anlaşılabilmesinden kaynaklı olarak kendi gerekleri ile örtüşebilen ilerici çözümlerin elde edilememesi ise üretim biçiminin modernize alternatiflerine kıyasla daha verimsiz olan konvansiyonel yöntemlere bağlı kalmasına yol açmaktadır (Koskela ve diğerleri, 2002; Wood ve Gidado, 2008). Oysaki günümüz konvansiyonel yapım yöntemlerinin sağlayabileceği fayda açısından en üst limitlerine ulaştığı ve bu tür yöntemleri daha da geliştirmenin marjinal faydasının oldukça azaldığı belirtilmekte, dolayısıyla da yapım otomasyonuna doğru radikal bir değişimin kaçınılmaz olup bu tür sistemlerin de gelecekte daha yaygın olacağı öngörülmektedir (Delgado ve diğerleri, 2019; Chea ve diğerleri, 2020; de Soto ve Skibniewski, 2020). Aslında bu beklenti aynı zamanda sürdürülebilir bir gelişim ve daha yüksek kalitede bir yapı üretimi/kullanımı için gerekliliktir (Pan ve diğerleri, 2018).

Çalışma kapsamında yapı endüstrisinin üretim etkinliğinin bu düşünceler altında sorgulandığı bir literatür incelemesi yürütülmekte, mevcut sorunların sebepleri üzerine olan görüşleri saptayabilmek amaçlanmaktadır. Çalışmanın ikinci bölümünde, üretim başarısı kavramı alt unsurları ile birlikte tanımlanmakta ve yapı sektörünün başarı düzeyi endüstri raporları üzerinden irdelenmektedir. Üçüncü bölümde, yapı endüstrisinin kendisine özgü özellikleri üzerinden mevcut üretim etkinliği sorununun sebepleri ve bu sorunun üstesinden gelmeye yönelik son yüzyıldaki teknolojik gelişmelerin neden yeterli ilerlemeyi sağlayamadığı tartışılmaktadır. Dördüncü ve son bölümde ise bir sonuç değerlendirmesi yapılmaktadır.

2. YAPI ENDÜSTRİSİNİN DİĞER ENDÜSTRİLERE KIYASLA ÜRETİM BAŞARISI DÜZEYİ

Üretimin başarısı hem üreticiye hem de tüketiciye ekonomiklik, hızlilik, kalite, estetik, fonksiyonellik, sürdürülebilirlik, verimlilik ve üretkenlik gibi yönlerden ne kadar değer katılabildiği ile ilişkilidir (Dvir ve diğerleri, 1998; Williams, 2016). Önem dereceleri ve ele alınış biçimleri farklı tür üretim alanları için değişiklik gösterebilen bu alt kavramlardan bazıları öznel yargılara dayanırken, verimlilik ve üretkenlik kavramları ise hesaplanabilirlik sağladıkları için üretimin başarı ve etkinlik düzeyini ölçebilme konusunda öne çıkmaktadır (Aparicio, 2016: 4-5). Bu açıdan, üretim olgusunun bu iki kavram ile birlikte tanımlanıp değerlendirilmesinde fayda bulunmaktadır.

Üretim, girdi olarak kullanılan insan, ekipman, malzeme ve zaman gibi kaynakların sonuç çıktılara dönüştürüldüğü bir süreçtir. Üretkenlik; bir çıktı ürünün miktarının bir girdi kaynağın miktarına oranıdır ve bu oran sermaye üretkenliği (yatırılan sermaye başına elde edilen parasal kazanç), malzeme üretkenliği

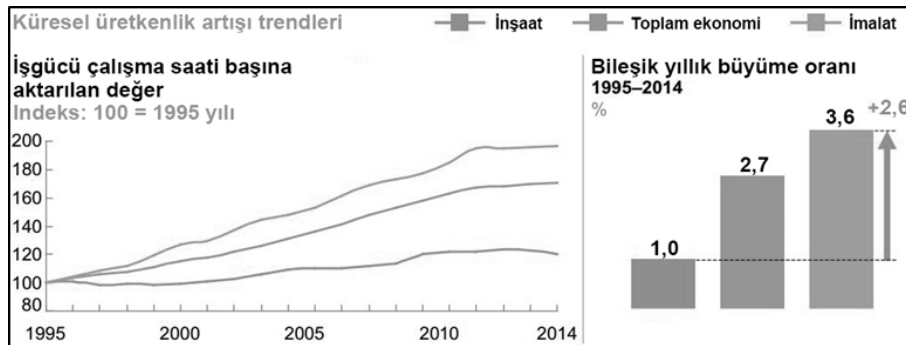
(girdi malzeme başına elde edilen ürün) ve iş gücü üretkenliği (çalışma miktarı başına elde edilen ürün) gibi birçok ekonomik ve tekniksel yönden ele alınabilir (Linner, 2013: 51). Verimlilik kavramı altında ise üretime ilişkin tüm girdiler ile elde edilen tüm sonuçlar arasında bir ilişkinin kurulduğu daha bütüncül bir yaklaşım izlenmekte (Coelli ve diğerleri, 2005: 2-6), bu doğrultuda da girdilere ve çıktılara ilişkin gözlenen değerler ile optimal olduğu düşünülen değerler karşılaştırılarak bir çıkarım yapılmaktadır (Fried ve diğerleri, 2008: 31-33).

Yapı endüstrisinin üretim etkinliği, belirtilen tüm bu niceliksel ve niteliksel alt kavramlar üzerinden endüstri raporlarınınca desteklenerek uzun bir dönemden bu yana eleştirilmektedir. Örneğin Latham Raporu (Latham, 1994), yapı endüstrisini "yetersiz, uzlaşa bulunmayan, parçalı ve üretim becerisi düşük" olarak tanımlamakta ve bu endüstrinin hem kaynaklarını savurgan kullandığını hem de paydaşları için yeterli değeri üretmediğini belirtmektedir. Egan Raporu (Egan, 1998) da sektörün düşük üretim performansına yönelik olarak radikal çözümler ile birlikte diğer endüstrilerde olduğu gibi modernleşmesi gerektiğini fakat bu noktada hem gelişime yönelik yatırımların az olduğunu hem de endüstrinin parçalı yapısından dolayı mevcut gelişmelerin yaygınlaşmadığını ifade etmektedir.

Modernleşmenin nasıl gerçekleştirilebileceğine yönelik olarak yapı üretim sürecinde ne tür teknolojilerin hangi amaçlarla kullanılabileceği hakkında da bazı raporlar bulunmaktadır. Örneğin "Modernising Construction" Raporu (National Audit Office, 2001) satın alma, tedarik ve teslimat safhalarına yoğunlaşmakta ve proje katılımcılarının bütünleşik bir biçimde hareket edebileceği bilgi teknolojilerini öne çıkarmaktadır. "ICT and Automation (ICTA) Scoping Study" Raporu (National Platform for the Built Environment, 2008), yapının tasarımından inşaatına tüm yaşam döngüsü boyunca gerekli olan bilgi, iletişim ve otomasyon teknolojilerini tanımlayarak bir yol haritası çizmektedir. Benzer biçimde, "Construction 2025" raporu da (HM Government, 2013) endüstrinin ileriye dönük başarısı için "verimli ve teknolojik olarak üstün" hedefini koymaktadır.

Üretkenlik açısından endüstriler arası karşılaştırmalı bir inceleme üzerine ise raporlar içerisindeki iki tür bilgi göze çarpmaktadır; (1) hedeflenen üretkenlik düzeyi nedir, (2) üretkenliği artırmaya yönelik teknolojilerin yayılım düzeyi nedir? Karşılaştırma için genellikle imalat endüstrilerinin yakaladığı yüksek gelişmişlik düzeyi bir referans çizgisi olarak alınmaktadır. Yapı endüstrisinin üretim etkinliği değerlendirilirken ise özellikle imalat endüstrilerinden birisi olan otomotiv sektörü ile bir kıyaslama yapılmaktadır. Bu durumun sebebi olarak otomobil ve konut arasındaki bazı ürünel benzerlikler gösterilebilir. Otomobil; diğer imalat ürünlerine göre (örneğin elektronik cihazlar) daha yüksek fiyatlı ve büyük hacimlidir, ayrıca geniş kitlelerce talep edilir ve birçok çeşitlilikte piyasaya sürülür.

Üretkenlik düzeyi açısından Balaguer ve Abderrahim'in (2008: 3) Euroconstruct, Eurostat ve ACEA raporlarından derlediği Avrupa verilerine göre 1990-2000 yılları arasında otomotiv endüstrisi yaklaşık %37, yapı endüstrisi ise yalnızca %4 artış sağlamaktadır. ABD Ticaret Bakanlığının raporuna göre ise 1964-2004 yılları arasında tarım-dışı sanayinin iş gücü üretkenliği %100'den fazla artış gösterirken yapı endüstrisinin üretkenliğinde azalma dahi görülmektedir (Bock ve Linner, 2015a: 55). Benzer biçimde 2017 McKinsey Küresel Enstitü' nün 2017 yılında yayınladığı inşaat endüstrisindeki verimliliğe ilişkin raporundaki (MGI, 2017) küresel iş gücü üretkenliği artışı diyagramlarına göre (Şekil 1) 1995-2014 yılları arasında imalat endüstrisi genel ekonomi ortalamasının üzerinde, inşaat endüstrisi ise oldukça altında kalmaktadır.



Şekil 1. 1995-2014 yılları arası endüstrilere göre küresel üretkenlik artışı (MGI, 2017: 2)

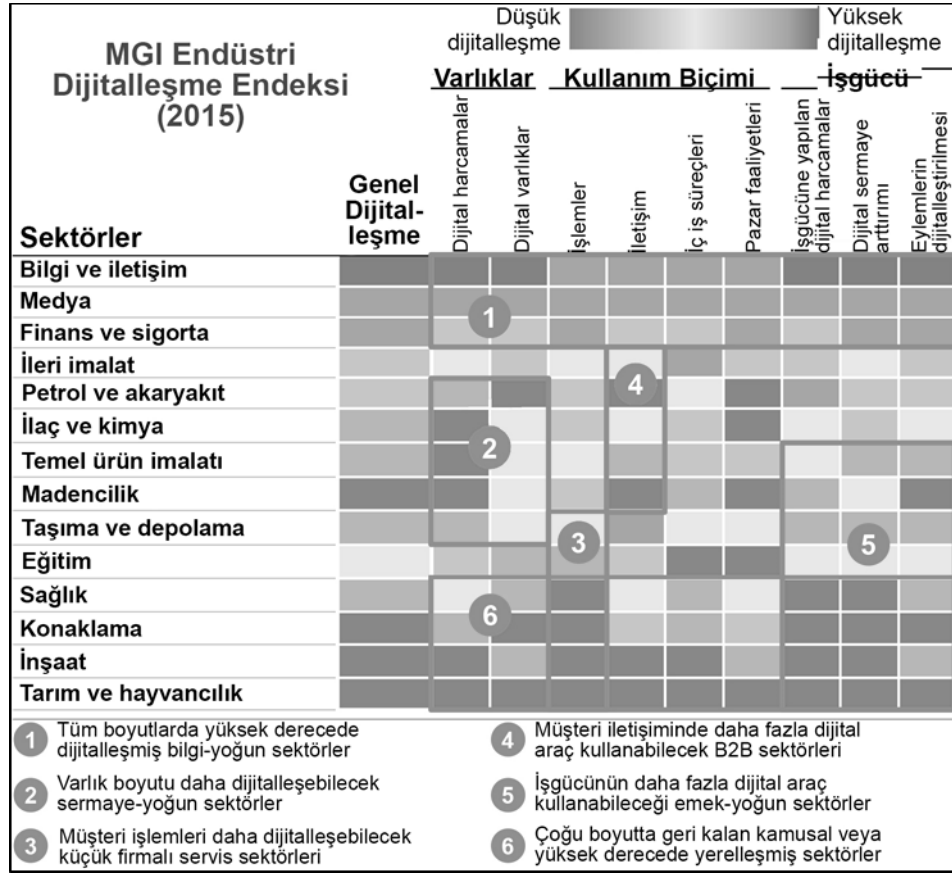
Teknoloji yayılım düzeyine ilişkin olarak dijitalleşme ve robotikleşme seviyeleri önemli göstergelerdir. McKinsey Küresel Enstitü' nün 2015 yılında yayınladığı Digital America Raporu'ndaki dijitalleşme endeksine göre (MGI, 2015) (Şekil 2) inşaat faaliyeti tüm endüstriler arasında dijitalleşme düzeyi en düşük sektörlerden birisidir ve iş gücünden müşteri işlemlerine her bir boyutta geride kalmış olarak gösterilmektedir. Benzer biçimde 2018 World Robotics idari raporuna göre (IFR, International Federation of Robotics, 2018) 2017 yılında otomotiv endüstrisindeki robot satış miktarı 125.700 birim iken (toplam yıl

içi endüstriyel robot satış miktarının %33'ü), bu miktar yapım ve yıkım faaliyetleri için yalnızca 900 birimdir. IFR (2021) mevcuttaki son yayımladığı raporunda ise Covid-19 pandemisinin endüstrilerin üretkenliği üzerindeki olumsuz etkilerine değinmekte, kısa vadede otomasyon sistemlerine ağırlık veren sektörlerin üretim biçimini belirsizliklerle dolu yeni koşullara daha hızlı ve esnek bir biçimde adapte edebildiğini (ilişkin sistemlerin faydalarının yanında üretim alanlarında insan iş gücüne ilişkin sosyal mesafe koşullarının daha kolay sağlanabiliyor olması da bu konuda bir etken), uzun vadede de bu durumun dijitalleşme ve robotikleşme doğrultusunda tetikleyici bir unsur olacağını belirtmektedir.

1994'ten 2021 yılına kadar olan tüm bu raporlar göz önünde bulundurulduğunda endüstrinin sorunlarına yönelik uzun süredir bir farkındalığın bulunduğu, çözüm önerilerinin sunulduğu, fakat gelinen noktada ise üretim etkinliğinin artırılmasından birçok yönden fayda sağlanabilecek olmasına rağmen ilerlemenin de sınırlı olduğu görülmektedir. Üretim etkinliği düzeyinin düşüklüğü ile üretim etkinliğini yükseltebilecek teknolojilerin yaygınlık düzeyinin düşüklüğü arasında bir bağıntı bulunmaktadır. Mevcut durumda yapı endüstrisi teknolojik ilerlemenin bir öncüsü değil takipçisi durumundadır ve bu durum da üretkenlik açısından imalat endüstrilerinin oldukça gerisinde kalınıyor olmasının doğal bir sonucudur (Van Gassel ve Maas, 2008; Aziz ve Hafez, 2013).

Endüstrinin bu sorunun üstesinden gelebilmek için çağın olanaklarını mekanikleşmeye, robotikleşmeye ve otomatikleşmeye yönelik olarak değerlendirmesi beklenirken, bu tür çabaların da yetersiz kaldığı görülmektedir. Buradan hareketle, yeterli düzeyde ilerleme sağlanamamasının sebeplerinin neler olduğuna ilişkin olarak temelde şu soruların cevaplarını aramak gereklidir:

- Yapı endüstrisi, soruna yönelik olarak neden yenilikçi çözümler üretememektedir?
- Eğer kendi içerisinde yenilikçi çözümler üretiliyor ise neden bu konuda başarılı olan endüstrilerin (özellikle imalat endüstrilerinin) üretim modellerini kendisine uyarlayamamaktadır?
- Başarılı sonuçlar sağlayan yenilikçi çözümler veya uyarlamalar var ise, bunlar neden endüstri içerisinde yaygınlaşmamaktadır?



Şekil 2. MGI 2015 Endüstri Dijitalleşme Endeksi (MGI, 2015: 5)

3. YAPI ÜRETİM FAALİYETLERİNİN KENDİSİNE ÖZGÜ ÖZELLİKLERİ VE BU ÖZELLİKLERİN ÜRETİMİN BAŞARISINI İYİLEŞTİRME KONUSUNDAKİ SINIRLANDIRICI ETKİLERİ

Yapı endüstrisi, yerleşik bir fabrika ortamında üretim yapan imalat endüstrilerinden birçok yönden farklılıklar barındırır. Dolayısıyla üretim etkinliği sorununa ilişkin belirtilen soruları sağlıklı bir karşılaştırma ile cevaplandırabilmek için, öncelikle yapı üretiminin kendisine özgü özelliklerinin (construction peculiarities) tanımlanması gerekmektedir. Bu özellikleri Nam ve Tatum (1988) "hareketsizlik, karmaşıklık, sağlamlık, maliyetlilik, yüksek sosyal sorumluluk"; Koskela (1992) "bir defaya özgünlük, arazi çalışmasının varlığı, geçici organizasyon, düzenleyici kurumların müdahaleleri"; Ballard ve Howell (1998) "sabit konumlu imalat ve konumun yerleşikliği" şeklinde sıralamaktadır. Sıralanan bu kavramlardan bazıları oldukça göreceli olsa da, temel bir fikir oluşturmaktadır. Vrijhoef ve Koskela (2005) yapı üretimini "üretilebilir ürün, üretim biçimi ve endüstrinin yapısı" yönlerinden ele alarak bu özellikleri daha düzenli ve kapsamlı bir diyagram (Şekil 3) altında toparlamaktadır.



Şekil 3. Yapı üretiminin kendisine özgü özellikleri (Vrijhoef ve Koskela, 2005)

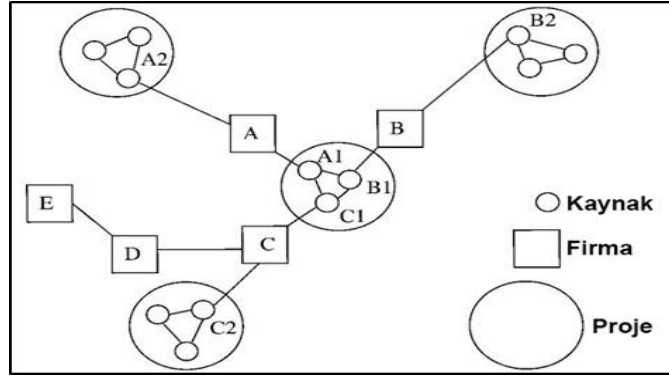
Bu özelliklerin her biri ile elbette ki yalnızca yapı endüstrisinde karşılaşmamaktadır. Bir defaya özgünlük özelleştirilmiş araçların imalatında, arazi çalışması tarım ve madencilik gibi alanlarda, büyük ve sabit bir ürün üzerinde çalışma ise gemi ve uçak üretiminde yer almaktadır. Yapı endüstrisindeki üretim biçimini özel kılan, tüm bu özelliklerin bir bileşimi olmasıdır (Ballard ve Howell, 1998), örneğin uçaklar ve gemiler devasa büyüklükte üretilmelerine rağmen sonradan bir bütün olarak hareket ettirebildikleri için araziye bağlı değildir. Dolayısıyla, endüstriye yönelik üretim yaklaşımlarının da bu kendine özgü özellikler bileşimi ile örtüşür biçimde olmalıdır.

Öncelikli olarak, yapım sürecini tariflemek ve üretim ihtiyacının endüstri düzeyinde nasıl karşılandığını ele almak gereklidir. Bir yapı üretimi oldukça dağınık noktalardan birçok çeşitlilikte ve büyüklükte malzemenin, bileşenin ve sistemin tedarikini gerektirir ve sağlanan kaynaklar da farklı mekânlarda ve farklı zamanlarda çalışıyor olabilen birçok farklı iş kolundan çok sayıda insanın iş birlikteliği dâhilinde çeşitli araçlarca işlenir, tüm bu karmaşık organizasyon planlanmasından tasarımına ve inşaatına kadar tüm safhaları boyunca yönetilmesi ve uygulanması zorlu bir süreçtir (Cox ve Goodman, 1956; Howard ve diğerleri, 1989; Wood ve Ashton, 2010). Üretimin etkin bir biçimde yürütülebilmesi karşısındaki başlıca sebeplerden birisi olan bu zorluluk, çağın ilerlemesiyle beliren yeni ihtiyaçlar, beklentiler ve talepler doğrultusunda giderek daha da artış göstermektedir (Williams, 1999). Gidado (1996) bu durumu sebepleri ile birlikte şu şekilde açıklamaktadır, "Sürekli bir hızlilik talebi, maliyete ve kaliteye yönelik kontroller, iş alanlarındaki güvenlik gereksinimleri ve ayrıca teknolojik gelişmeler, ekonomik serbestlik, küreselleşme, çevresel konular ile endüstri içerisindeki parçalılık bir sarmala ve yapım sürecinin karmaşıklığının artışına sebep olmaktadır."

Tariflenen yapım süreci, endüstri içerisinde birçok uzmanlık alanından bağımsız firmanın geçici olarak bir araya gelip sanki tek bir firmaymış gibi çalıştığı bir faaliyet ağı dâhilinde yürütülmektedir (Winch, 1989; Austin ve diğerleri, 2002). Dubois ve Gadde (2002), oluşan bu faaliyet ağını "gevşekçe bağlı bir sistem" (a loosely coupled system) şeklinde tanımlamaktadır (Şekil 4). Firmalar ağ içerisinde belirli bir proje için geçici sıkı bağlar kurmakta, fakat üretim tamamlandığında ise belki de bir daha hiçbir araya gelmemek üzere birbirlerinden ayrılmaktadır.

Björnfot ve Sardén (2006), bu gevşek ağ yapısının sebebini üretimin "araziye bağlı" ve "bir defaya özgün" olma niteliklerinden dolayı merkezi bir mekanizmanın olanaksızlığına bağlamaktadır. Her bir yeni proje; doğal ve beşerî çevre, arazi durumu, malzeme tedariki, sosyo-kültürel yapı, yerel yönetmelikler gibi bölgesel koşullara ve özgün ihtiyaçlara uygun olarak üretime geçirilmek durumundadır. Ayrıca, üretimde gerekli olan uzmanlık alanlarının kapsamı ve çeşitliliği farklı tipteki veya büyüklükteki projeler için de değişebilmektedir. Tüm bu esnekliği sağlayabilmek için ise gerekli olan karmaşık üretim organizasyonu projeyi gerçekleştirmek üzere davet edilmiş olan, kendi alanlarında yetkin, küçük ve yerel çalışma gruplarına bölüştürülmektedir. Proje

tamamlandığında da bu gruplar kendilerine uygun olan başka organizasyonlara dağılmaktadır. Bu durum, endüstri içerisinde yüksek düzeyde parçallığa ve dağınık bir üretim mekanizmasına sebep olmaktadır.



Şekil 4. Gevşekçe bağlı bir sistem olarak yapı endüstrisi (Dubois ve Gadde, 2002)

Endüstrinin belirtilen yapısı üretimin gereklerine yönelik olarak kısa vadede fayda sağlarken, diğer taraftan ise yenilikçi çözümlerin geliştirilmesini güçleştirmektedir. Gelişimin biçimi genellikle köklü (radikal) değil artımsaldır (inkremental) ve bu durumun sebeplerinden bazıları şunlardır (Memari ve diğerleri, 2014; Bertelsen ve diğerleri, 2007):

- Üretimin birbiriyle iletişimi zayıf çalışma gruplarına bölüştürülmüş olması, projenin bütünü yerine parçalarına odaklanılmasına sebep olmaktadır. Çünkü her bir grup kendi iş bölümünden sorumludur ve dolayısıyla yalnızca o bölümün iyileştirilmesi için çaba göstermektedir.
- Endüstrinin parçalı yapısı, büyük araştırma yatırımları yapabilecek düzeyde firmaları olanaklı kılmamaktadır. Yapı, yaşam döngüsü uzun olan bir üründür ve bu yüzden bir yatırımın geri dönüşü ciddi zaman almaktadır. Dolayısıyla küçük firmalar da yalnızca kısa dönemli kârlarını düşünmektedir.
- Firmaların geçici olarak bir araya geliyor olmaları, yenileşim için gerekli olan deneyimden öğrenmeyi desteklememektedir. Bu yüzden, projenin bütününe yönelik olarak yürütülen faaliyetten edinilen bilgi, bir sonraki projeye taşınmamakta ve kaybolmaktadır.

Endüstrideki üretim biçiminin özgü özellikleri, kendi içerisindeki gelişimini sınırlandırmasının ötesinde gelişmiş endüstrilerin üretim modellerinin veya teknolojilerinin birebir kopyalanmasını da zorlaştırmaktadır (Höök ve Stehn, 2008; Björnfort ve Sardén, 2006). İmalat endüstrilerinin üretim etkinliğindeki başarısı, modern çağın olanaklarını değerlendirebilmesi ile ilişkilendirilmektedir (Balaguer ve Abderrahim, 2008) ve dolayısıyla yapı endüstrisinin neden görece geride kaldığını anlayabilmek için bu olanakların endüstri içerisindeki yansımalarının da ele alınması gerekmektedir. Bu noktada, özellikle 20.yy'ın başından bu yana olan gelişmelere odaklanılmalıdır. Bu dönemin önemi, hem bir ürünün endüstriyel olarak nasıl üretilebileceğine ilişkin düşüncelerin geliştirildiği hem de teknolojik açıdan devrimsel ilerlemelerin kaydedildiği bir zaman aralığı olmasıdır.

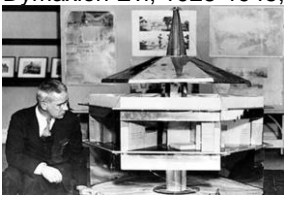
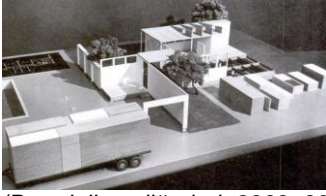

Modern çağın endüstriyel üretime yönelik ana yaklaşımı "otomasyon"dur, dolayısıyla ilişkin teknolojik gelişmelerin bu yaklaşım üzerinden ele alınmasında fayda vardır. Castro-Lacouture (2009) otomasyon kavramını kapsamlı bir tanım ile şöyle açıklamaktadır, "iş gücünü ve üretim süresini azaltmak, üretkenliği artırmak, çalışma ortamını iyileştirmek ve iş kazalarını önlemek amacıyla üretimin işletilmesi ve kontrolü sırasında kullanılan üretim teknikleri ve ekipmanları ile yürütülen eylem." Yapı endüstrisinin insan faaliyetlerinin yoğun olarak kullanıldığı, tehlikeli eylemler barındıran ve verimliliğin de düşük olduğu bir sektör olduğu göz önünde bulundurulursa, bu tür bir yaklaşımın akılcı bir çözüm olabileceği söylenebilir.

Otomasyona yönelik 20.yy'daki ilk önemli gelişme, Henry Ford'un T-Model arabaları ile öncülüğünü yaptığı kitlesel üretim devrimidir (Caneparo, 2014: 12-16). Üretimin ileri iş gücü deneyimi gerektirmeyen basit aşamalara bölünerek montaj hatları üzerinde sürekli tekrarına dayanan yöntemin getirdiği başarı, dönemin mimarlarına da esin kaynağı oldu. Öncesinde mimari bir çalışmanın değeri el emeği ile orantılı iken, modernist düşüncenin en büyük hayali yapı üretimini önceki yüzyıllardan kalma geleneksel yöntemlerden makina ile üretime geçirebilmek oldu (Kieran ve Timberlake, 2004: 5-9).

Dönem içerisindeki dünya savaşlarının yarattığı konut talebi de ayrıca bir tetikleyici unsur oldu ve yapıların nasıl sistematik olarak üretilebileceği üzerine imalat endüstrilerinin tekniklerini referans alan birçok denemelerde bulunuldu. Amaç fabrika ortamında kitlesel olarak üretilmeye elverişli, kolaylıkla yerine taşınıp kurulabilecek prefabrike konutlar tasarlamaktı. Bu doğrultuda öne çıkan çalışmalardan bazıları ve

karşılaştıkları güçlükler, Tablo 2’de sıralanmaktadır. Her ne kadar belirtilen çalışmalarca yenilikçi çözümler sunulmuş olsa da bulunulan dönem içerisindeki teknik imkânların kısıtlılığının ve mali engellerin başarısızlıklara sebep olduğu görülmektedir. Çağın devamında bu tür sorunlar daha aşılabilir hale gelmekte, benzer bir üretim modelinin devamı olarak 1960-70’lerde Habitat-67 ve Nakagin Kapsül Kulesi gibi eş hacimsel modüllerin üst üste yığılmasından meydana gelen ikonik tasarımlar ortaya çıkmaktadır (Lin, 2011). Fakat yine de kitlesel olarak üretilen konutların yarattığı monotonluk izlenimi, prefabrike üretim yaklaşımının yapı endüstrisinde yaygınlaşabilmesinin önünde büyük bir engel teşkil etmektedir. Ayrıca estetik kaygıların ötesinde, her yapı üretimi işverenlerin veya kullanıcıların farklı ihtiyaçlarına ve önceliklerine uygun olarak bir defaya özgü üretilir. Bu çeşitlilik talebi de kitlesel üretimin tektip standart üretim modeli ile çelişmektedir. Dolayısıyla ekonomik ve teknolojik faktörlere ek olarak sosyal açıdan bu tür sistemlere yönelik toplum tavrı ve kullanıcı kabulleri de olumsuz yönde etkilenmektedir (Lu ve diğerleri, 2018).

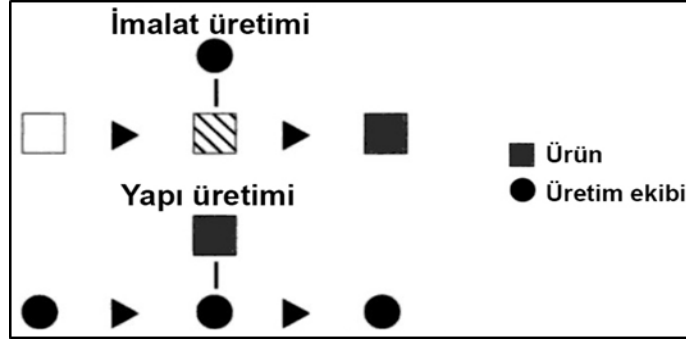
Tablo 2. Kitlesel yapı üretimini hedefleyen öncül çalışmalardan bazıları

Proje İsmi/Sürdürüldüğü Tarih/Tasarımcı/ Resim Kaynağı	Tasarım-Üretim İlkeleri ve Karşılaşılan Güçlükler
<p>Dymaxion Evi, 1928-1945, Buckminster Fuller</p>  <p>(Bergdoll ve diğerleri, 2008: 58)</p>	<p>Verimli strüktür ve geometri ilkelerine dayanan, korozyon dayanımlı alüminyum paneller ve ıslak hacim modülleri gibi modern malzemeler ve teknolojiler barındıran yapı, uçak üretim hangarlarında imal edilmek üzere tasarlandı (Fuller, 1999: 84). Yapının çağının ötesinde sistemler gerektirmesinin gerektirdiği ilk yatırım maliyetleri ve farklı ihtiyaçları karşılayabilme esnekliğini sağlayamayan dairesel formu başarısızlığın ana sebepleri oldu (Baldwin, 1997: 23-24).</p>
<p>Paket Ev, 1940-1952, Gropius ve Wachsmann</p>  <p>(Bergdoll ve diğerleri, 2008: 80)</p>	<p>Temel fikir; tek tür bir ahşap panel birim ve bu birimleri birbirine istenildiği gibi bağlayabilen tek bir ara eleman ile yapının tüm ana sistemlerini (iç ve dış duvarlar, döşemeler ve çatı) oluşturabilmek, böylelikle de tasarım esnekliği ve üretim kolaylığı sağlamaktı (Imperiale, 2012). Teknik imkânsızlıklar sebebiyle paneller yeterli ölçü toleransları dâhilinde üretilmedi ve maliyetler de beklenen düzeye indirilemedi (Bergdoll ve diğerleri, 2008).</p>
<p>Lustron Evi, 1947-1950, Carl Strandlund</p>  <p>(Inhabitat, 2018)</p>	<p>Çelik kiriş ve makaslar ile oluşturulan bir strüktür üzerine iç ve dış panellerin monte edilmesi prensibine dayanan ve ABD hükümetince de savaştan dönen askerlere yönelik olarak desteklenen proje; üretimdeki zaman ve maliyet aşmaları, üretilen yapıların tedarikindeki sorunlar, yerel yasalar ve ihtiyaçlar için gerekli olan esnekliğin karşılanamaması gibi sebepler ile başarısızlıkla sonuçlandı (Wolfe ve Garfield, 1989).</p>

Tüm bu sebepler prefabrike yapı üretim sistemlerinin yaygınlaşmamasına ve tekrardan konvansiyonel yöntemlere ağırlık verilmesine sebep oldu, dolayısıyla da endüstriyel üretimin bu sektörde konvansiyonel üretim ile baş edemeyeceği algısı oluşmaya başladı. Bu noktada, dönemsel kitlesel üretim eğilimlerini göz önünde bulundurmak da bazı ek fikirler sağlayabilir. Turner’a (2008: 1) göre firmalar 1960’larda kaliteden ödün vererek yüksek üretim oranlarını, 1970’lerde ürün çeşitliliğini azaltarak yine yüksek miktarlarca fakat kaliteli ürünleri, 1980’lerde fark yaratmak adına esnek imalat sistemleri geliştirerek çeşitliliği, 1990’larda ürün geliştirme sürelerini kısaltarak yenileşimi ve günümüzde ise farklı işlevleri tek bir üründe sunarak fonksiyonelliği hedeflediler. Kalite, çeşitlilik ve fonksiyonellik gibi unsurlar özellikle yapı üretimi konusunda vazgeçilmezdir ve bu unsurların kitlesel üretimde henüz yeterli seviyede yakalanamadığı dönem ile yapı endüstrisinde bu tür bir yaklaşıma olan ilginin azaldığı dönem birbiri ile örtüşmektedir.

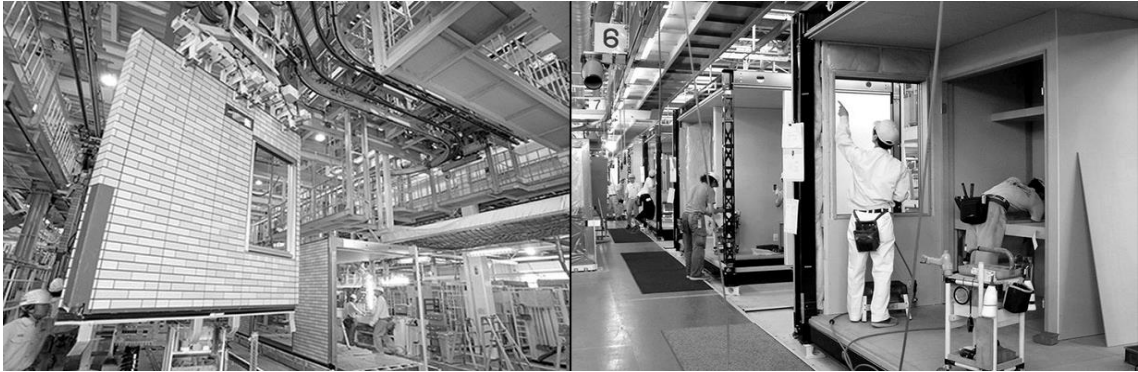
Yapı üretimini tıpkı bir imalat üretimi gibi bütünüyle fabrika ortamında gerçekleştirilebilmesini zorlaştıran diğer ana etmenler, yapı ürününün diğerlerinden farklı olarak büyük hacimli ve yerleşik konumlu olmasıdır. Bir ürün büyüdükçe hareket ettirilmesi güçleştiğinden, bütünü üretim istasyonlarında hareket ettirilmesi yerine üretim istasyonlarının bütün içerisinde hareket ettirilmesi tercih edilir. Şekil 5’de gösterildiği gibi imalatta ürün üretim birimlerini ziyaret ederken yapımda ise tam tersidir (Cousineau ve Miura, 1998: 6) ve bu durum ekipler arası zaman ve mekân koordinasyonunu tamamıyla farklılaştırır. Ayrıca üretim ne kadar prefabrike olursa olsun, son aşama muhakkak arazi üzerinde gerçekleştirilmek durumundadır (Salem ve diğerleri, 2006). Genellikle yapının inşasına uygun olarak yapılandırılması gereken bu arazi içerisindeki

çalışma da belirsizlikler ile doludur. Çünkü bu dış ortam hem jeolojik yapı, eğim ve bitki örtüsü gibi nedenlerle bölgeden bölgeye değişiklik gösterebilmektedir hem de güneş, rüzgâr ve yağış gibi çevresel etmenlere maruz kalmaktadır. Dolayısıyla bu belirsizlikleri aşabilmek için yine insan iş gücüne ihtiyaç duyulmakta ve saha dışı üretim otomasyonu konusunda sınırlı bir fayda sağlanabilmektedir.



Şekil 5. İmalat ve yapı üretiminde ürün ile üretim ekibi arasındaki ilişki (Cousineau ve Miura, 1998: 6)

Günümüzde modüler prefabrikasyon/konstrüksiyon (Bertram ve diğerleri, 2019; Gharehbaghi ve diğerleri, 2021) ve kitlesel özelleştirilebilirlik (mass customization) (Larsen ve diğerleri, 2019) gibi konseptler ile birlikte ele alınan yapı endüstrisindeki prefabrikasyon (saha-dışı yapım otomasyonu) sistemleri için şu tür amaçlar da güdülmektedir; sürdürülebilirlik için atık ve karbon ayak izi azaltımı (Hao ve diğerleri, 2020, Lu ve diğerleri, 2021; Yuan ve diğerleri, 2021), saha içinde üretimi zor karmaşık geometri bileşenlerin imalatı (Mostafa ve diğerleri, 2020; Anton ve diğerleri, 2021) ve yüksek teknoloji bileşenlerinin üretimi (Alim ve diğerleri, 2019; Sivaram ve diğerleri, 2020; Attia ve diğerleri, 2020). Prefabrikasyon sistemleri başlıca iki alanda sınıflandırılabilir (Delgado ve diğerleri, 2019); (1) Yapı bileşenlerinin imalatı (Building Component Manufacturing), (2) Büyük ölçekli prefabrikasyon (Large Scale Prefabrication). İlk tür dâhilinde düşük-seviye bileşenler (çimento, toprak, ahşap, çelik gibi ham maddeler) yüksek-seviye yapı bileşenlerine (betonarme prefabrik bileşenler, çelik kafesler, ahşap strüktürel elemanlar, kaplamalar vb.) dönüştürülmektedir, konvansiyonel yöntemler ile birlikte yaygın olarak kullanılmaktadır. İkinci türde yüksek-seviye bileşenler bitirilmiş bütün yapı modüllerine (banyo, mutfak modülleri vb.) dönüştürülmektedir, yüzeysel ve hacimsel sistemlerin imal edildiği bu tür ise prefabrikasyona ilişkin belirtilen sebeplerden dolayı daha az yaygındır. Sonuncu türe ilişkin bilinen örnekler bakıldığında (Şekil 6), bu tür faaliyetlerin daha çok yüksek teknolojiye rağbet gösteren bir toplumda (Japonya) imalat tecrübesi olan firmalarca (Sekisui - petrokimya; Toyota - otomotiv) yürütüldüğü görülmektedir.



Şekil 6. Sırasıyla; Sekisui Heim duvar sistemi ve Toyota Home yapı modülü imalatı (Abd Rashid ve diğerleri, 2019)

Otomasyona yönelik bir başka ilerleme alanı, 1940'larda ilk bilgisayarların geliştirilmeye başlanması ile birlikte ortaya çıkan dijital sistemlerdir (Gibson ve diğerleri, 2014: 36). Bu tür sistemlerin zamanla işlem güçlerinin ve erişilebilirliklerinin artması, başlıca iki alanda fayda sağladı. Bunlardan ilki bilgi ve iletişim teknolojileridir, ikincisi ise bu teknolojilerin siberetik alanındaki çalışmalara eklenmesiyle geliştirilen robotik sistemlerdir (Maurer, 2017).

Öncelikle, arazi üzerinde ihtiyaç duyulan insan iş gücünü ikame ederek otomasyonun saha dışından saha içine olan devamlılığını sağlayabilme potansiyeline sahip olan robotik sistemleri ele almakta fayda vardır. Robotik sistemler; yeniden programlanabilirlik, otonomluk, esneklik, durumsal farkındalık gibi

yeteneklere sahip olan ve çeşitli görevleri üretkenlikle yerine getirebilen ileri düzeyde gelişmiş makinalardır (Gupta ve Arora, 2009: 309; Bock ve Linner, 2015b: 7). Uluslararası Robot Federasyonu (IFR, 2012), bu özellikleriyle robotik sistemleri üretken, esnek ve kaliteli bir üretim için otomasyonun anahtar bileşeni olarak tanımlamaktadır. İnsan iş gücü ile karşılaştırılacak olursa, Linner (2013: 3) şu ifadelerle yer vermektedir, "İnsan iş gücünün aksine, makina teknolojisi (otomasyon ve robotik teknolojileri de içeren modern versiyonları ile birlikte) hesaplanabilir ve zaman, maliyet, kalite garantisi veren bir üretim biçimi sunmaktadır. Ayrıca yine insanların aksine, üretim kapasitesinin geliştirilmesi konusundaki potansiyeli sınırsızdır."

Yapı endüstrisinde robotik sistemler saha-dışı otomasyonda (robotik prefabrikasyon) imalat benzeri kontrollü bir çevre dâhilinde kullanılmakla birlikte (Kasperzyk ve diğerleri, 2017) saha-içi otomasyona yönelik ilk ciddi çalışmalar ise 1978 yılından itibaren Japonya'da başladı (Linner, 2013: 131). Amaç, ülkedeki genç nesilce "zorlu, kirli ve tehlikeli" olarak tanımlanıp artık tercih edilmeyen bu sektörün imajını ve çalışma koşullarını iyileştirmektir (Cousineau ve Miura, 1998: 7). Ülkedeki robot sektörüne olan kültürel eğilim ve Ar-Ge çalışmalarına yatırım yapan büyük inşaat firmalarının ("büyük beşli" olarak tanımlanan Shimizu, Taisei, Kajima, Obayashi ve Takenaki) varlığı, bu tür öncü çalışmaları olanaklı kıldı (Yoshida, 2006). Fakat yine de dünya üzerinde geliştirilen ilk robotun 1959 yılında üretilen Unimate olduğu düşünülürse, aradaki 20 yıllık süre aralığı yapı endüstrisinin teknolojiyi ne kadar geriden takip ettiğinin önemli bir göstergesidir.

Yapımda robotikleşmeye yönelik ilk yaklaşım, inşaat esnasındaki belirli eylemlerde insanları ikâme etmeyi hedefleyen "tek görevli yapım robotları" (single task construction robots) oldu (Bock ve Linner, 2016a: 14) (Şekil 7). Bu tür eylemlerin bazıları şu şekilde sıralanabilir:

- Strüktürel işlemler; betonarme demirinin işlenmesi ve yerleştirilmesi, betonun dağıtılması, yayılması, seviyelendirilmesi ve sıkıştırılması, çelik bileşenlerin kaynaklanması vb.,
- İç ve dış mekân işlemleri; tuğla ve fayans döşenmesi, yangın koruyucu malzeme kaplanması, cephe elemanlarının kurulumu, cephe kaplama ve boyama vb.,
- Yapım öncesinde ve esnasında destek-kontrol işlemleri; otomatik saha ölçümü ve süreç takibi, arazi düzenlemesi, saha-içi lojistik faaliyetler vb.



Şekil 7. Sırasıyla; Taisei cephe kaplama ve boyama robotu, RIEGL Ricopter saha gözlem robotu ve Beton seviyeleme robotu (Bock, 2015: 115; Bock ve Linner, 2016a: 21, 96)

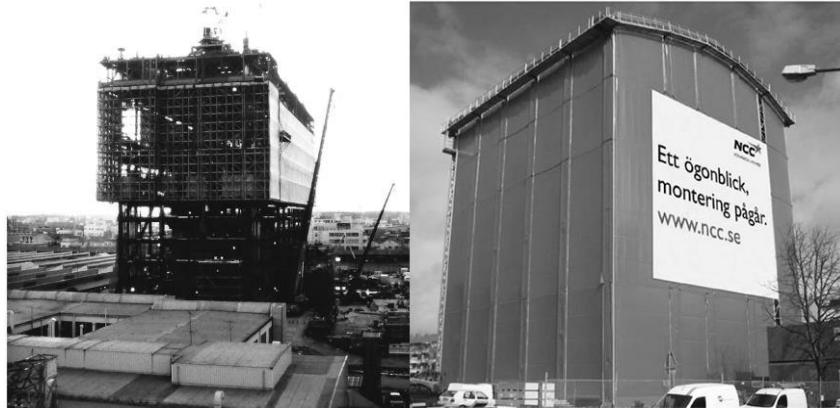
Bu tür sistemler, tamamıyla spesifik bir eylem için tasarlandıkları için yüksek verimlilik ve kalite sunabilmektedirler. Yalnızca belirli bir işin iyileştirilmesi için kullanıldıkları için tüm inşaat sahasının robotlara uygun olarak yapılandırılması gerekmemekte ve konvansiyonel yöntemler ile birlikte kullanılabilirler. Bu durum hem esneklik sağlamakta hem de ilk yatırım maliyetlerinin aşırı yükselmesini önlemektedir (Saidi ve diğerleri, 2016). Bu noktada yalnızca tuğla yerleştirmek için geliştirilen SAM100 robotunun satış fiyatının 500.000 dolar olduğu düşünülürse (Bogue, 2018), tüm faaliyetlerin otonom hale getirilmesinin maliyeti daha iyi anlaşılabilir. Diğer taraftan ise sahanın parçalı ve dağınık bir biçimde robotikleştirilmeye çalışılması, verimlilik açısından bazı olumsuzluklara da yol açmaktadır (Bock ve Linner, 2016a: 291). Robotlar, ek güvenlik önlemleri gerektirmekte ve aynı ortamda insanların eş zamanlı olarak başka bir işi yürütmesi tehlikeli olabilmektedir. Ayrıca robotların bir yerden diğerine taşınımı ve kurulumu işi karmaşıklığa katmakta, ek zaman ve yeni tür kalifiye elemanlar gerektirmektedir.

İlk yaklaşımın olumsuz yönlerinin ana sebebi, sahanın bütününe kapsamlı bir biçimde ele alınmamasıdır. Buradan hareketle ikinci tür bir yaklaşım olarak 1980'li yıllardan itibaren geliştirilen "saha içi

bütünleşik oto-yapım sistemleri" (integrated site automation) (SMART, ABCS, Big Canopy vb. Şekil 8) ise tıpkı bir fabrika ortamının olanaklarını sunmaktadır (Bock ve Linner, 2016b: 11, 119, 205). Bu tür bir yaklaşım dâhilinde birçok tek görevli yapım robotu koordineli bir biçimde tam yapılandırılmış bir ortamda tam otomasyonu sağlamak üzere çalışmaktadır. Dışa kapalı bir ortam sağlandığı için hem üretimi aksatabilecek yağış, rüzgâr ve güneş gibi çevresel faktörlerden daha az etkilenilmekte hem de çevreye gürültü ve kirlilik açısından daha az etkide bulunmaktadır (Maeda, 1994; Pachon, 2012).

Diğer taraftan ise ilk robotik yaklaşımın aksine projenin bütününün (tasarımdan planlamaya ve yapıma kadar tüm faaliyetlerin ve bunlar için gerekli olan uzman iş gücü ve araçların) tam otomasyona yönelik yapılandırılması gerekmektedir. Bu durum zorlu bir adaptasyon sürecine yol açmakta ve ilk yatırım maliyetlerinin oldukça yükselmesinden dolayı konvansiyonel yöntemler ile olan rekabeti güçleştirmektedir. Dolayısıyla otomotiv veya elektronikteki gibi büyük, köklü ve kurumsal firmaların ve uzun vadeli yatırımların görece az olduğu yapı endüstrisinde bilindik yöntemlerin yerine hem maliyetli hem de sektör içerisinde yaygınlığı olmadığı için uyum sorunları yaşanabilecek bir sisteme geçiş yapmak riskli bir tercih olabilmektedir. Sonuç olarak tek görevli yapım robotları bile yaygınlık kazanmamışken (yukarıda belirtilen IFR (2018) raporundan da anlaşılacağı üzere), bu tür sistemler de Japonya'daki yüksek katlı yapıların inşası dışında dünya genelinde oldukça nadir kullanım alanı bulabilmektedir. Cai ve diğerleri (2019) bu duruma yönelik üç boşluk alanı tanımlamaktadır:

- Akademik araştırmalar ve ürünler arasındaki boşluk; önerilen otomasyon çözümlerinin bazıları konsept veya erken gelişim aşamasındadır ve yapımın tüm süreçlerini etkileyen bu tür inovasyonların doğrudan uygulamada kabul görececek bir ürüne dönüştürülmesi güçtür.
- Ürünler ve saha-içi uygulama arasındaki boşluk; robotik sistemlerin yüksek yatırım maliyetlerinin ötesinde pazardaki ilişkin bilgi asimetrisi de mevcut uygulamaların geliştirici büyük firmaların yer aldığı belirli ülkelerde yoğunlaşmasına sebep olmaktadır. Yeterli büyüklüğe, finansa veya bilgiye sahip olmayan firmalarca yürütülen bölgelerin bu sistemlere erişimi sınırlı kalmaktadır.
- İnşaat endüstrisi ile robotik endüstrisi arasındaki boşluk; yapı sektörü dağınık durumdaki çeşitli disiplinlerden oluşmasından ve bunlar arasındaki iletişimin de güçlü olmamasından dolayı endüstriye ilişkin bilgi toplayıp robotik sistemleri geliştirmek ve yaygınlaştırmak güçleşmekte ve iki endüstri arasındaki geçişkenlik zorlaşmaktadır.

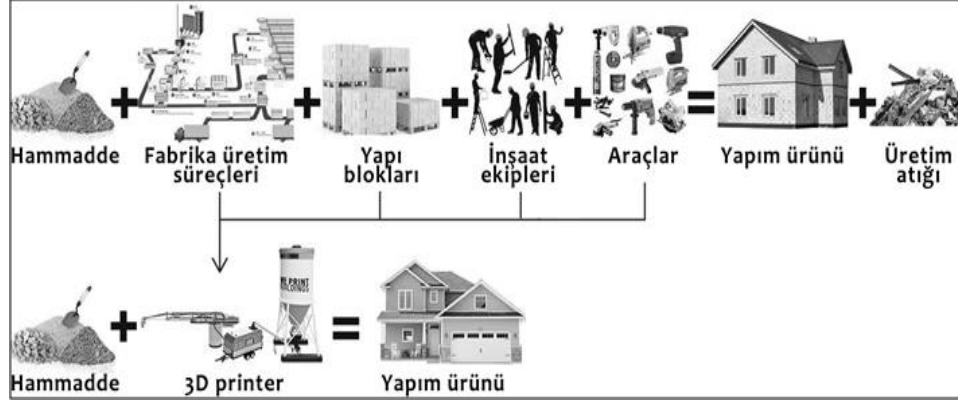


Şekil 8. Sırasıyla; Obayashi ABCS ve NCC-Komplett bütünleşik oto-yapım sistemleri (Bock ve Linner, 2016b: 11, 205)

Bir başka robotik yaklaşım, yapı endüstrisinde ilk olarak Khoshnevis'in (1996) "Contour Crafting" metodu ile ortaya çıkan ve son dönemlerde ilişkin patentlerin sürelerinin dolmasıyla da daha fazla firmanın yatırım yaptığı eklemeli üretim (additive manufacturing) yöntemidir (Gibson ve diğerleri, 2014: 36; Kietzmann ve diğerleri, 2015). 3-boyutlu baskı (3d-printing) olarak da bilinen bu yöntem, kitlesel üretimin aksine bir defaya özgü üretimlerde daha etkindir (De Beer, 2006; Campbell ve diğerleri, 2012) ve bu niteliğiyle de yapı endüstrisinde kullanım için oldukça elverişlidir (Halicioglu ve Koralay, 2019).

Eklemeli üretim, verimlilik artışı sağlayabilecek radikal bir üretim anlayışı sunmaktadır (Berman, 2012; Halicioglu ve Koralay, 2020). Pegna (1997), oto-yapım sistemlerinin yalnızca konvansiyonel yöntemlerin yeni teknolojilerce taklit edilmesinden ibaret olduğu şeklinde bir eleştiride bulunmakta ve eklemeli üretimi şu şekilde öne çıkarmaktadır; "devasa yapım makinalarıyla devasa yapı bileşenlerini bir araya getirmenin karmaşasındansa, her defasında bir kum tanesi yerleştiren karıncaların yaptığı gibi basit ve temel eylemleri art arda eklemek daha akılcıdır." Eklemeli üretim, Şekil 9' da gösterildiği gibi ham maddenin daha kısa bir üretim zincirinden geçerek atıksız bir biçimde ürüne dönüştürülmesini ve böylelikle malzeme, enerji, zaman ve işçilik gibi yönlerden daha az kaynak tüketilmesini sağlamakta (Apis Cor, 2018), bu yönüyle de yalın,

verimli ve sürdürülebilir bir yapım alternatifi sunmaktadır (Tay ve diğerleri, 2017). Farklı bir üretim konseptinin ortaya koyuluyor olmasının dışında ölçek olarak da eklemeli yapı üretimi alanındaki çalışmaların yapı katı büyüklüğündeki baskı makinalarından daha mobil ve daha küçük olanlarına (örneğin Minibuilders (IAAC, 2018) gibi swarm sistemlere) doğru evriliyor olması, Pegna'nın bu düşüncelerini kısmen doğrulamaktadır. Eklemeli üretim, uzay çalışmalarında Ay ve Mars yüzeyindeki regolit malzemesi ile yapı inşasında kullanılabilmesi düşünülen bir yaklaşımdır (Cesaretti ve diğerleri, 2014; Liu ve diğerleri, 2021) ve bu yaklaşım dâhilinde sürü böceklerinin yuva yapımından ilham alınarak geliştirilen otonom (kendiliğinden organize olabilen) swarm robotik sistemler sağladıkları esneklik ve çok yönlülük ile öne çıkmaktadır (Gerling ve Von Mammen, 2016; Irawan ve diğerleri, 2019). Bir başka gelişme alanı, akıllı malzemelerin baskısı ile yapı bileşenlerine uyarın altında nasıl davranış göstermesi gerektiği bilgisini ekleyerek zaman boyutu kazandıran 4-boyutlu baskı yöntemleridir (Zhang ve diğerleri, 2019), bu sayede örneğin kendiliğinden kurulabilen çatı sistemleri üretilebilmektedir.



Şekil 9. Eklemeli üretim ve konvansiyonel üretim biçimlerinin karşılaştırılması (Apis Cor, 2018)

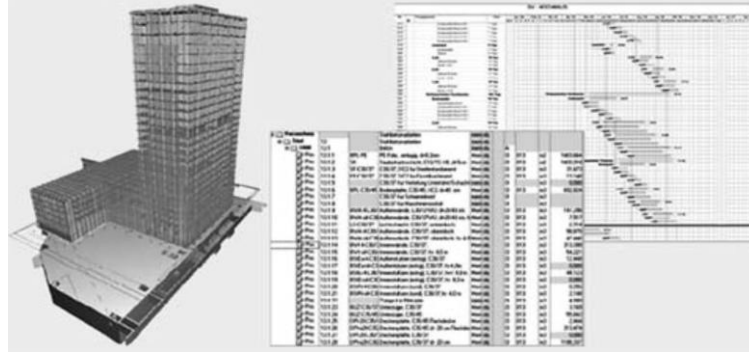
Tüm bu olumlu yönlerine karşın, eklemeli yapı üretimi prefabrikasyonun ve oto-yapım sistemlerinin tam bir ikamesi de değildir. Her ne kadar giderek daha fazla baskı yönteminin yapı endüstrisine adapte edilip geliştirilmesi ile birlikte metal (Buchanan ve Gardner, 2019), geopolimer (Xia ve diğerleri, 2019) ve köpük (Bedarf ve diğerleri, 2021) gibi malzemelerin de kullanılmaya başlanmasına rağmen günümüzde daha çok iç ve dış duvarların beton benzeri malzemeler ile üretiminde kullanılmaktadır (Bogue, 2013; Holt ve diğerleri, 2019: 349; Mechtcherine ve diğerleri, 2019). Malzemenin basılabilirliği, inşanın strüktürel dayanımı ve ölçeklendirilebilirlik gibi mevcut tekniksel sınırlılıklar aşılrsa dahi her tür materyal tipi, ürün tipi, büyüklüğü veya miktarı için bu yöntem alternatiflerinden daha pratik ve ekonomik olmayabilmektedir. Bu nedenle her bir üretim metodunun kendi avantajlarının öne çıkarılıp birlikte kullanıldığı bütünleşik bir yaklaşım, daha gerçekçi bir hedef olarak görülmektedir (Khoshnevis, 2004; Perkins ve Skitmore, 2015). Diğer bir önemli nokta, eklemeli üretimin radikal bir yöntem olmasının aynı zamanda yayılımını da zorlaştırıyor olmasıdır. Yapı endüstrisindeki üretim standartlarını belirleyen yasa düzenleyici kurumlar, sektör içerisindeki yenileşim düzeyinin düşük olmasından da dolayı konvansiyonel yöntemlerin dışında kalan ve belirli prosedürlerden geçmemiş metotlara kuşkuyla yaklaşabilmektedir (El-Sayegh ve diğerleri, 2020). Bu durumdan kaynaklı onaylama süreçlerine ilişkin belirsizlikler, firmaların yenilikçi teknolojilere yönelmesinde caydırıcı bir unsur olabilmektedir.

Son olarak dijital sistemlere ilişkin diğer alan olan bilgi ve iletişim sistemleri ise saha-içi ve saha-dışı üretimde gerekli olan bilginin daha kolay, hızlı ve isabetli bir biçimde işlenip aktarılabilmesini sağlayan teknolojilerdir. Bu tür sistemler, yapım otomasyonunun bir uzantısı olarak gösterilen ve fiziksel inşa süreçleri ile dijital teknolojiler arasındaki bağlantıyı tariflemek için kullanılan 'dijital üretim' (dijital fabrication – dfab) altında öne çıkmaktadır (de Soto ve diğerleri, 2018; Gramazio ve Kohler, 2014: 22). Son dönemlerdeki çalışmaların robotik alanındaki araştırma/geliştirme faaliyetlerindeki maliyet ve performans sorunları sebebiyle otonom makina sistemlerinden (hard robotics) algısal veri toplama/işleme ve çip tabanlı süreç kontrolü gibi sistemlere (soft robotics) doğru kaydığı belirtilmektedir (Kim ve diğerleri, 2021).

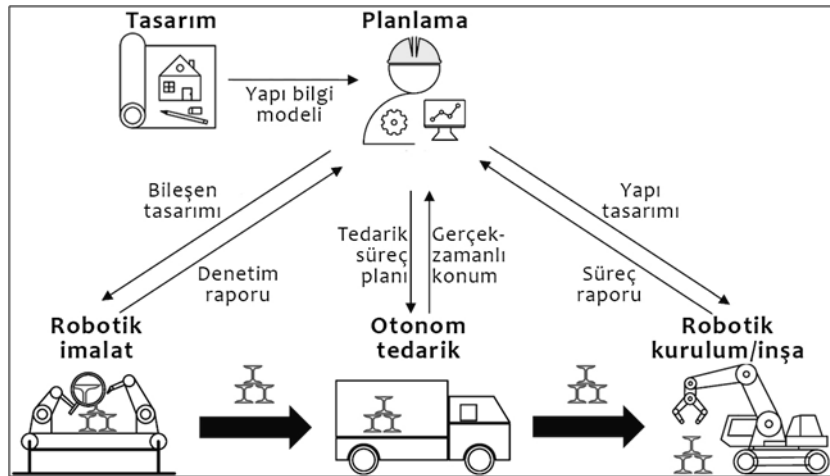
Tasarım bilgisi işlemeye yönelik olarak 1950'lerde geliştirilen Pronto ve Sketchpad ile başlayıp sonrasında giderek daha kapsamlı yazılımlara evrilen CAD teknolojileri; fiziksel üretime geçmeden önce hem tasarımcıların hem de mühendislerin ürünü iki veya üç boyutlu olarak modelleyip görselleştirebilmelerini sağlamakta, karmaşık analizleri ve hesaplamaları da olanaklı kılmaktadır (Castro-Lacouture, 2009: 1074; Kensek ve Noble, 2014: 29-42). Bu tür teknolojilerin endüstrisindeki kullanımına yönelik ilk dönemlerdeki eleştiriler, Pegna'nın (1996) oto-yapım sistemlerine yönelttiği eleştiriler ile benzerdir. William (1986), üretimi bir bütün olarak sorgulamak ve yeni konseptler geliştirmek yerine

konvansiyonel bir tasarım sürecindeki eylemler dizisini insanlardan bilgisayarlara devretmeyi hedeflemenin gelişimi sınırladığını, bu durumun yalnızca aynı karmaşık süreci daha üstün olduğu düşünülen bir sisteme aktarmaktan ibaret olduğunu ve dolayısıyla problemi çözmediğini belirtmektedir, örneğin el ile üretilen bir çizim yine aynı mantık dâhilinde bilgisayar ortamında üretilmektedir.

Radikal bir gelişim gereği otomasyon kapsamında saha içerisindeki ve dışarısındaki yapım faaliyetlerinin projenin tüm yaşam döngüsü boyunca bir bütün olarak bilgi ve iletişim sistemlerince desteklediği bir üretim modeli gereklidir (Howard ve diğerleri, 1989; Alfares ve Seireg, 1996) ve bu bağlamda da bilgisayarlaştırılmış yapım (William, 1986), bilgisayarla bütünleşik yapım (Jung ve Gibson, 1999), zeki yapım (Bulbul ve diğerleri, 2009), yapımda Endüstri 4.0 (Oesterreich ve Teuteberg, 2016; Jäger ve diğerleri, 2016), akıllı yapım (Wu ve Cai, 2017) ve yapım 4.0 (Sawhney ve diğerleri, 2020: 3-22) gibi konseptler ortaya koyulmaktadır. Bu tür konseptlerin yapı endüstrisinde gerçekliğe dönüştürülebilmesini sağlama potansiyeli ile günümüzde ön plana çıkan bilgi işleme platformu ise BIM (Building Information Modelling) sistemidir (Eastman ve diğerleri, 2011: 19). Tüm proje katılımcılarının iş birliği içerisinde hareket edebilmesini sağlayan BIM sistemleri (Şekil 10), yalnızca biçim bilgisi taşımanın ötesinde tasarlanan yapının performansına ilişkin simülasyonların oluşturulabilmesini (Sacks ve diğerleri, 2010), yapım faaliyetlerinin optimum biçimde planlanabilmesini (malzeme seçimi, robotik faaliyetler, süreç planlaması vb.) (Abrishami, 2016; Davtalab ve diğerleri, 2018), tüm bunların yanı sıra mevcut iletişim ve bilgi-işlem sistemleri (mobil cihazlar, internet, Wi-Fi, bulut sistemleri, büyük veri, simülasyonlar, yapay zeka, derin öğrenme vb.) (Bokor ve diğerleri, 2019; Bello ve diğerleri, 2021) aracılığıyla tedarik ve yapım sürecinin eş zamanlı takibini sağlayabilmektedir (Navon ve Goldschmidt, 2003; Babič ve diğerleri, 2010; Chu ve diğerleri, 2018). Şekil 11'de gösterildiği gibi üretim çerçevesi bu tür bir otonom sürece ilişkin basit bir örnek oluşturmaktadır; yapıya ilişkin bilgi modellemesi altında tasarım ve planlama oluşturulmakta, bu bilgi saha dışındaki (robotik imalat) ve içindeki (robotik kurulum) otomasyon sistemleri ile aralarındaki otonom tedarik zincirine aktarılıp gerçek-zamanlı olarak kontrol edilmektedir. Tüm fiziksel üretim sürecinin bilgisayar tabanlı bir algoritma tarafından yönetilip kontrol edildiği bu tür bir yaklaşım siber-fiziksel sistemler olarak da ele alınmaktadır (Volkov ve Shilova, 2020).



Şekil 10. Bir yapının dijital modeli ve ilişkin maliyet-zaman hesaplamaları (Castro-Lacouture, 2009: 1074)

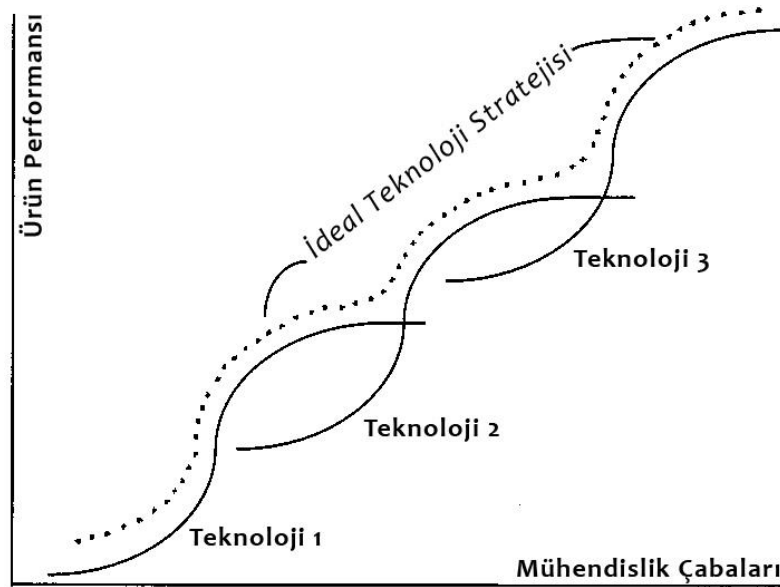


Şekil 11. Yapım otomasyonu için bir süreç çerçevesi (Chea ve diğerleri, 2020)

BIM sistemlerinin yapım otomasyonunu desteklemeye ve sektörün parçalılığı içerisinde daha sıkı iş birliklikleri oluşturmaya yönelik sağladığı fırsat alanları aynı zamanda sistemin karşısında sınırlandırıcı etmenler de oluşturabilmektedir. Her şeyden önce sistemden en üst düzeyde faydalanabilmek için yoğun insan iş gücü kullanımından ziyade robotik sistemlerin yaygınlaşması gerekmektedir. Tam bir iş birliklik için ise tüm ayrıık iş gruplarının BIM sistemini kullanıyor olması gerekmektedir, kullanılıyor olsa dahi farklı grupların farklı tür bir yazılımı tercih ediyor olması uyumsuzluklar doğurabilmektedir (Oh ve diğerleri, 2015). Ayrıca bu sistemlerin endüstrielleşme ve dijitalleşme kapsamında bir devlet politikası olarak desteklenmesi, yasa düzenleyici ve uygulayıcı kurumların bu doğrultuda hareket etmesi gerekmektedir (Zhang ve diğerleri, 2016; Leviäkangas ve diğerleri, 2017).

Otomasyon sistemlerine yönelik ele alınan tüm bu görüşlerden ve ilişkin gelişmelerden hareketle bir değerlendirme yapılacaktır; yapı üretimi ürün, süreç ve endüstri düzeylerinde kendisine özgü özellikler barındıran karmaşık bir üretim ağıdır ve bu durum daha etkin bir üretime yönelik gelişmelerin ortaya çıkmasını ve yayılımını sınırlandırmaktadır. Elbette ki çağın getirdiği olanaklardan belirli bir ölçüde faydalanılmaktadır (örneğin yapı bileşenleri büyük oranda kitlesel olarak üretilmekte veya tasarım süreci dijital sistemler aracılığı ile yürütülmektedir), fakat bunlar genellikle sürecin bütününe değil belirli parçalarının iyileştirilmesine yöneliktir. Bu bakımdan kapsamlı ve köklü bir üretim konseptinin geliştirilebilmesi, geliştirilse dahi sektörün parçalılığı içerisinde yaygınlaşabilmesi güçtür. Bir endüstri içerisindeki üretim modelinin veya teknolojilerin zaman içerisinde sürekli olarak daha etkin olanları ile S-Eğrileri (Şekil 12) altında ikame edilmesi beklenirken (Christensen, 1999: 3.Bölüm, 4), yapı endüstrisi ise konvansiyonel üretim yöntemlerinde ısrarcı bir sektör olduğu için bir teknoloji daha yaygınlaşmadan diğer endüstrilerde ikamesi bile ortaya çıkabilmektedir.

Çözüm odaklı olarak endüstrinin parçalılığını ve dağınıklığını göz önünde bulundurarak tüm katılımcıları (işveren, tasarımcılar ve mühendisler, tedarikçiler, ürün-teknoloji geliştiricileri, düzenleyici kurumlar vs.) kapsayan bir düşünce değişimi gerekmektedir (Memari ve diğerleri, 2017) ve bu bağlamda yapım faaliyetinin gerekliliklerini hem yönetsel hem de tekniksel yönlerden kapsamlı bir biçimde ele alınmasını sağlayacak bütüncül bir yaklaşıma ihtiyaç duyulmaktadır (Saurin ve diğerleri, 2013; Shadid, 2018). Yapı üretiminin özgü karmaşık doğasının daha derinlikli olarak anlaşılabilmesi üzerinden ele alınacak olan bu tür bir yaklaşım, mevcut teknolojik gelişmelerin doğru bir yönetim ile daha etkin bir biçimde kullanılabilmesini ve yapı üretim sürecinin bütününe yönelik radikal çözümlerin üretilmesini sağlayacaktır (Bertelsen ve Sacks, 2007).



Şekil 12. Bir endüstri içerisindeki yenilikçi teknolojilerin gelişiminin S-eğrisi ile gösterimi (Christensen, 1999)

4. SONUÇ

Yapı endüstrisi kalite, kapsam, hızlilik, maliyet ve verimlilik gibi niceliksel ve niteliksel yönlerden yeterli üretim etkinliğini sağlayamadığı gerekçesiyle uzun bir süredir eleştirilmektedir. Bu eleştirel görüşü destekleyen endüstri raporlarındaki veriler göstermektedir ki; sektör hem üretkenlik değerleri hem de üretkenliğini artıracak robotik ve dijital sistemler gibi yenilikçi teknolojilerin yayılımı açısından küresel ortalamaların altında yer almaktadır. Sorunun sebebi olarak endüstrinin kendi karmaşık doğasından

kaynaklı ürün, süreç ve endüstri düzeylerindeki özgü özellikler bileşimi gösterilmektedir. Yapı; araziye bağlı, büyük hacimli ve bir defaya özgü bir üründür ve üretimi de yüksek miktarda ve çeşitlilikte iş gücünün geçici iş birliklikleri dâhilindeki zorlu ve karmaşık bir süreci gerektirir. Endüstri içerisinde küçük bölgesel firmalardan veya iş gruplarından oluşan, merkezi olmayan, dağınık ve parçalı bir üretim mekanizması tarafından yürütülen yapım süreci, bir taraftan gerekli olan bireysel ve yerel ihtiyaçları karşılamak için gerekli olan esnekliği yakalayabilmekte başarı sağlarken diğer taraftan ise radikal yenileşim için gerekli olan sermaye ve düşünce birikimini sınırlandırdığı için insan iş gücüne ve konvansiyonel tekniklere bağlı, modern çağı geriden takip eden bir üretim anlayışına sebep olmaktadır.

İmalat endüstrilerinin 20. yüzyılın başından bu yana otomasyona ilişkin öncülüğü sayesinde sürekli bir sıçrama halinde olması üretim başarısında belirgin bir farkın oluşmasını sağlamaktadır. Buna bağlı olarak çağın gerisinde kaldığının farkına varmaya başlayan yapı endüstrisi, kendi yenilikçi çözümlerini de üretmediği için yüzyıl boyunca takipçisi olduğu imalat endüstrilerinin üretim modellerini kendisine taşımaya çalışmakta fakat bu tür bir aktarımdan kendi doğasının gerekleri ile örtüşmediği için sınırlı düzeyde faydalanabilmektedir. Uygulamaya geçirilmiş başarılı çözümler bulunsa dahi çeşitli sebeplerle (yeni bir üretim modeline geçişin getirdiği yüksek ilk yatırım maliyetleri, yeterli uygun uzman iş gücünün bulunamama ihtimali, yerel yasa düzenleyici kurumların yeni tür yöntemleri destekleyici olmaması, kalite, kapsam ve estetik gibi yönlerden kişiye ve bölgeye göre değişebilen talepleri karşılayabilecek kadar esnek olamama vb.) bunların yerine daha verimsiz fakat hâlihazırda deneyim sahibi olunan, sektör içerisinde bilinirliği olan ve dolayısıyla risk faktörü düşük konvansiyonel yöntemler tercih edilebilmektedir.

Her ne kadar yapım otomasyonu konusunda istenilen düzeyler yakalanamamış olsa da, hem akademik çevrelerce konuya ilişkin sahip olunan farkındalık doğrultusunda çalışmalar yürütülmekte hem de tarihsel süreçte yapım sürecinin birçok safhasına yönelik araştırma geliştirme deneyimi bulunmaktadır. İlk olarak 1900'lerin başından itibaren geliştirilen saha dışı ve sonrasında 1970'lerden itibaren geliştirilen saha içi otomasyon sistemlerine ek olarak son dönemde tüm bunları kesintisiz ve kusursuz bir biçimde bağlayacak olan bilgi-iletişim sistemlerinin geliştirilmesi ağırlık kazanmaktadır.

Daha etkin bir üretim sağlayabilmek için, yapım faaliyet ağının bir bütün olarak kapsamlı bir biçimde ele alınması gerekmektedir (örneğin tasarım ekibi sahip olduğu bilgi ve iletişim sistemleri ile tam-otomasyon potansiyeline sahip iken saha içerisindeki üretim ekibinin insan iş gücüne dayalı yöntemler kullanıyor olması hem iş grupları hem de süreçler arasında düşünsel ve tekniksel kopukluklara sebep olmaktadır ve ilerleme konusunda birbirlerini sınırlandırmaktadır). Dolayısıyla endüstrinin başarısı için tüm proje katılımcılarının tüm proje süreci boyunca ortak bir paydada buluşabildikleri bir yenilikçi üretim konseptine ve bu tür bir konseptin de yaygın ve ortak kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır. Bunu sağlayabilecek yenilikçi teknolojik olanaklar giderek artmaktadır ve bunların uygun yenilikçi yönetimsel yaklaşımlar ile birlikte yapı üretim ağının doğasına uygun olarak şekillendirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKÇA

- Abd Rashid, M.N., Abdullah, M.R., Ismail, D. ve Saberi, M.H. (2019). "Automation and Robotics in Industrialized Building System (IBS): The Potential Criteria for Measurement", *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, 9(7), 1020-1034.
- Abrishami, S. (2016). "Conceptual Design Automation: Consideration of Building Materials Impact at Early Stages of AEC Design", *Advances in Civil, Architectural, Structural and Constructional Engineering*, Editörler: Kim, D.K., Jung, J. ve Seo, J., *Proceedings of the International Conference on Civil, Architectural, Structural and Constructional Engineering*, Dong-A University, Busan, South Korea, August 21-23, 2015, CRC Press, London, UK, 263-268.
- Alfares, M. ve Seireg, A. (1996). "An Integrated System for Computer-Aided Design and Construction of Reinforced Concrete Buildings Using Modular Forms", *Automation in Construction*, 5(4), 323-341.
- Alim, M.A., Tao, Z., Hassan, M.K., Rahman, A., Wang, B., Zhang, C. ve Samali, B. (2019). "Is It Time to Embrace Building Integrated Photovoltaics? A Review With Particular Focus on Australia", *Solar Energy*, 188, 1118-1133.
- Anton, A., Reiter, L., Wangler, T., Frangez, V., Flatt, R.J. ve Dillenburger, B. (2021). "A 3D Concrete Printing Prefabrication Platform for Bespoke Columns", *Automation in Construction*, 122, 103467.
- Aparicio, J., Lovell, C.K. ve Pastor, J.T. (2016). "Advances in Efficiency and Productivity", Springer International Publishing, Cham.
- Apis Cor (2018). "Company Presentation: Technical report", http://apis-cor.com/files/ApisCor_presentation.pdf (Erişim Tarihi: 01.12.2018).
- Attia, S., Lioure, R. ve Declaude, Q. (2020). "Future Trends and Main Concepts of Adaptive Facade Systems", *Energy Science & Engineering*, 8(9), 3255-3272.
- Austin, S., Newton, A., Steele, J. ve Waskett, P. (2002). "Modelling and Managing Project Complexity", *International Journal of Project Management*, 20(3), 191-198.
- Aziz, R.F. ve Hafez, S.M. (2013). "Applying Lean Thinking in Construction and Performance Improvement", *Alexandria Engineering Journal*, 52(4), 679-695.
- Babič, N.Č., Podbreznik, P. ve Rebolj, D. (2010). "Integrating Resource Production and Construction Using BIM", *Automation in Construction*, 19(5), 539-543.
- Balaguer, C. ve Abderrahim, M. (2008). "Trends in Robotics and Automation in Construction", *Robotics and Automation in Construction*, <https://www.intechopen.com>, (Erişim Tarihi: 01.12.2018).
- Baldwin, J. (1997). "BuckyWorks: Buckminster Fuller's Ideas for Today", John Wiley & Sons, New York.
- Ballard, G. ve Howell, G. (1998). "What Kind of Production is Construction", *Proceedings of 6th Annual Conf. Int'l. Group for Lean Construction*, 13-15.
- Bedarf, P., Dutto, A., Zanini, M. ve Dillenburger, B. (2021). "Foam 3D Printing for Construction: A Review of Applications, Materials, and Processes", *Automation in Construction*, 130, 103861.
- Bello, S.A., Oyedele, L.O., Akinade, O.O., Bilal, M., Davila Delgado, J.M., Akanbi, L.A., Ajayi, A.O. ve Owolabi, H.A., (2021). "Cloud Computing in Construction Industry: Use Cases, Benefits and Challenges", *Automation in Construction*, 122, 103441.
- Bergdoll, B., Christensen, P., Christensen, P.H. ve Oshima, K. (2008). "Home Delivery: Fabricating the Modern Dwelling", The Museum of Modern Art, New York.
- Berman, B. (2012). "3-D Printing: The New Industrial Revolution", *Business Horizons*, 55(2), 155-162.
- Bertelsen, S. ve Sacks, R. (2007). "Towards a New Understanding of the Construction Industry and the Nature of its Production", *15th Conference of the International Group for Lean Construction*, Michigan State University, East Lansing, Michigan, 46-56.
- Bertelsen, S., Henrich, G., Koskela, L. ve Rooke, J. (2007). "Construction Physics", *15th Annual Conference of the International Group for Lean Construction IGLC*, 15 Temmuz 2007, Michigan State University, East Lansing.
- Bertram, N., Fuchs, S., Mischke, J., Palter, R., Strube, G. ve Woetzel, J. (2019). "Modular Construction: From Projects to Products", *Capital Projects & Infrastructure*, McKinsey & Company. 1-34.
- Björnfot, A. ve Sardén, Y. (2006). "Prefabrication: A Lean Strategy for Value Generation in Construction", *Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, Catholic University of Chile, School of Engineering, 25-27 July, 265-277.
- Bock, T. (2015). "The Future of Construction Automation: Technological Disruption and the Upcoming Ubiquity of Robotics", *Automation in Construction*, 59, 113-121.
- Bock, T. ve Linner, T. (2015a). "Robot Oriented Design", Cambridge University Press, New York.
- Bock, T. ve Linner, T. (2015b). "Robotic Industrialization", Cambridge University Press, New York.

- Bock, T. ve Linner, T. (2016a). "Construction Robots (3): Elementary Technologies and Single-Task Construction Robots", Cambridge University Press, New York.
- Bock, T. ve Linner, T. (2016b). "Site Automation", Cambridge University Press, New York.
- Bogue, R. (2013). "3D Printing: The Dawn of a New Era in Manufacturing?", *Assembly Automation*, 33(4), 307-311.
- Bogue, R. (2018). "What are the Prospects for Robots in the Construction Industry?", *Industrial Robot*, 45 (1), 1-6.
- Bokor, O., Florez, L., Osborne, A. ve Gledson, B.J. (2019). "Overview of Construction Simulation Approaches to Model Construction Processes", *Organization, Technology & Management in Construction: An International Journal*, 11(1), 1853-1861.
- Buchanan, C. ve Gardner, L. (2019). "Metal 3D Printing in Construction: A Review of Methods, Research, Applications, Opportunities and Challenges", *Engineering Structures*, 180, 332-348.
- Bulbul, T., Anumba, C.J. ve Messner, J. (2009). "A System of Systems Approach to Intelligent Construction Systems", *Computing in Civil Engineering*, 2(4), 22-32.
- Cai, S., Ma, Z., Skibniewski, M.J. ve Bao, S. (2019). "Construction Automation and Robotics for High-Rise Buildings Over the Past Decades: A Comprehensive Review", *Advanced Engineering Informatics*, 42, 100989.
- Campbell, I., Bourell, D. ve Gibson, I. (2012). "Additive Manufacturing: Rapid Prototyping Comes of Age", *Rapid Prototyping Journal*, 18(4), 255-258.
- Caneparo, L. (2014). "Digital Fabrication in Architecture, Engineering and Construction", Editor: Cerrato, A., Springer, Dordrecht, Netherlands.
- Castro-Lacouture, D. (2009). "Construction Automation", *Springer Handbook of Automation*, Editor: Nof S. Y., Berlin Heidelberg: Springer, 1063-1078.
- Cesaretti, G., Dini, E., De Kestelier, X., Colla, V. ve Pambaguian, L. (2014). "Building Components for an Outpost on the Lunar Soil by Means of a Novel 3D Printing Technology", *Acta Astronautica*, 93, 430-450.
- Chea, C.P., Bai, Y., Pan, X., Arashpour, M. ve Xie, Y. (2020). "An Integrated Review of Automation and Robotic Technologies for Structural Prefabrication and Construction", *Transportation Safety and Environment*, 2(2), 81-96.
- Christensen C.M. (1999). "Innovation and Change: The Evolution of Innovation", *The Technology Management Handbook*, Editor: Dorf, R.C., CRC Press & IEEE Press, Florida, USA.
- Chu, M., Matthews, J. ve Love, P.E. (2018). "Integrating Mobile Building Information Modelling and Augmented Reality Systems: An Experimental Study", *Automation in Construction*, 85, 305-316.
- Coelli, T.J., Rao, D.S.P., O'Donnell, C.J. ve Battese, G.E. (2005). "An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis", Springer Science & Business Media, Berlin Heidelberg.
- Cousineau, L. ve Miura, N. (1998). "Construction Robots: The Search for New Building Technology in Japan", ASCE Publications, Reston, Virginia.
- Cox, R. ve Goodman, C.S. (1956). "Marketing of Housebuilding Materials", *Journal of Marketing*, 21(1), 36-61.
- Davtalab, O., Kazemian, A. ve Khoshnevis, B. (2018). "Perspectives on a BIM-Integrated Software Platform for Robotic Construction Through Contour Crafting", *Automation in Construction*, 89, 13-23.
- De Beer, N. (2006). "Advances in Three Dimensional Printing-State of the Art and Future Perspectives", *Journal for New Generation Sciences*, 4(1), 21-49.
- De Soto, B.G. ve Skibniewski, M.J. (2020). "Future of Robotics and Automation in Construction", *Construction 4.0: An Innovation Platform for the Built Environment*, Editors: Sawhney, A., Riley, M., & Irizarry, J., 1st Edition, Routledge, London, 289-306.
- De Soto, B.G., Agustí-Juan, I., Hunhevicz, J., Joss, S., Graser, K., Habert, G. ve Adey, B.T. (2018). "Productivity of Digital Fabrication in Construction: Cost and Time Analysis of a Robotically Built Wall", *Automation in Construction*, 92, 297-311.
- Delgado, J.M.D., Oyedele, L., Ajayi, A., Akanbi, L., Akinade, O., Bilal, M. ve Owolabi, H. (2019). "Robotics and Automated Systems in Construction: Understanding Industry-Specific Challenges for Adoption", *Journal of Building Engineering*, 26, 100868.
- Dubois, A. ve Gadde, L.E. (2002). "The Construction Industry as a Loosely Coupled System: Implications for Productivity and Innovation", *Construction Management & Economics*, 20(7), 621-631.
- Dvir, D., Lipovetsky, S., Shenhar, A. ve Tishler, A. (1998). "In Search of Project Classification: A Non-Universal Approach to Project Success Factors", *Research Policy*, 27(9), 915-935.
- Eastman, C.M., Eastman, C., Teicholz, P. ve Sacks, R. (2011). "BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors", John Wiley & Sons, New Jersey.
- Egan J. (1994). "Rethinking Construction", <http://constructingexcellence.org.uk>, (Erişim Tarihi: 01.12.2018).

- El-Sayegh, S., Romdhane, L. ve Manjikian, S. (2020). "A Critical Review of 3D Printing in Construction: Benefits, Challenges, and Risks", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 20(2), 1-25.
- Fried, H.O., Lovell, C.K. ve Schmidt, S.S. (2008). "The Measurement of Productive Efficiency and Productivity Growth", Oxford University Press, Oxford.
- Fuller, R.B. (1999). "Your Private Sky: R. Buckminster Fuller: The Art of Design Science", Springer Science & Business Media, Berlin, Heidelberg.
- Gerling, V. ve Von Mammen, S. (2016). "Robotics for Self-Organised Construction", *2016 IEEE 1st International Workshops on Foundations and Applications of Self Systems (FASW)*, 12-16 September, Augsburg, Germany, IEEE, 162-167.
- Gharehbaghi, K., Mulowayi, E., Rahmani, F. ve Paterno, D. (2021). "Case Studies in Modular Prefabrication: Comparative Analysis and Discoveries", *Journal of Physics: Conference Series*, 1780, 1, 012009.
- Gibson, I. Stucker, B. ve Rosen, D. (2014). "Additive Manufacturing Technologies", Springer, New York.
- Gidado, K.I. (1996). "Project Complexity: The Focal Point of Construction Production Planning", *Construction Management & Economics*, 14(3), 213-225.
- Gramazio, F. ve Kohler, M. (Eds.), (2014). "Made by Robots: Challenging Architecture at a Larger Scale", John Wiley & Sons.
- Gupta, A.K. ve Arora, S.K. (2009). "Industrial Automation and Robotics", Laxmi Publications, New Delhi.
- Halicioğlu, F.H. ve Koralay, S. (2019). "Innovative Approaches to Automated Construction: Recent Advances and Future Visions on Three dimensional Printing", *Proceedings of CIB (International Council for Research and Innovation in Building and Construction) World Building Congress (CIB WBC 2019), CIB World Building Congress 2019: Constructing Smart Cities*, 17-21 June, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China.
- Halicioğlu, F.H. ve Koralay, S. (2020). "Applicability Analysis of Additive Manufacturing Methods in Construction Projects", *Gradevinar*, 72(4), 335-349.
- Hao, J.L., Cheng, B., Lu, W., Xu, J., Wang, J., Bu, W. ve Guo, Z. (2020). "Carbon Emission Reduction in Prefabrication Construction during Materialization Stage: A BIM-Based Life-Cycle Assessment Approach", *Science of the Total Environment*, 723, 137870.
- HM Government (2013). "Construction 2025: Industrial Strategy: Government and Industry in Partnership", https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/210099/bis-13-955-construction-2025-industrial-strategy.pdf (Erişim Tarihi: 01.12.2018).
- Holt, C., Edwards, L., Keyte, L., Moghaddam, F. ve Townsend, B. (2019). "Construction 3D Printing", Chapter 17, *3D Concrete Printing Technology*, Editors: Sanjayan, J.G., Ali Nazari, A. ve Nematollahi, B., Butterworth-Heinemann, 349-370.
- Howard, H.C., Levitt, R., Paulson, B.C., Pohl, J.G. ve Tatum, C.B. (1989). "Computer Integration: Reducing Fragmentation in AEC Industry", *Journal of Computing in Civil Engineering*, 3(1), 18-32.
- Höök, M. ve Stehn, L. (2008). "Applicability of Lean Principles and Practices in Industrialized Housing Production", *Construction Management and Economics*, 26(10), 1091-1100.
- IAAC, (2018). "Minibuilders", Institute for Advanced Architecture of Catalonia, <http://robots.iaac.net>, (Erişim Tarihi: 01.12.2018).
- IFR, International Federation of Robotics (2012). "History of Industrial Robots", <https://ifr.org/robot-history>, (Erişim Tarihi: 01.12.2018).
- IFR, International Federation of Robotics (2018). "Executive Summary World Robotics 2018 Industrial Robots", https://ifr.org/downloads/press2018/Executive_Summary_WR_2018_Industrial_Robots.pdf, (Erişim Tarihi: 01.09.2021).
- IFR, International Federation of Robotics (2021). "Executive Summary World Robotics 2021 Industrial Robots", https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive_Summary_WR_Industrial_Robots_2021.pdf, (Erişim Tarihi: 01.09.2021).
- Imperiale, A. (2012). "An American Wartime Dream: The Packaged House System of Konrad Wachsmann and Walter Gropius", *Offsite: Theory and practice of Architectural Production, Association of Collegiate Schools of Architecture (ACSA) 2012 Fall Conference Proceedings*, 39-43.
- Inhabitat, (2018). "Get a Free Vintage Prefab", <https://inhabitat.com/get-a-free-vintage-prefab-deadline-april-12/> (Erişim Tarihi: 01.12.2018).
- Irawan, J., De Kestelier, X., Argyros, N., Lewis, B. ve Gregson, S. (2019). "A Reconfigurable Modular Swarm Robotic System for ISRU (In-Situ Resource Utilisation) Autonomous 3D Printing in Extreme Environments", *Proceedings of the Design Modelling Symposium, Berlin*, In: Gengnagel C., Baverel O., Burry J., Ramsgaard Thomsen M., Weinzierl S. (eds) *Impact: Design With All Senses*, Springer, Cham, 685-698.

- Jäger, J., Schöllhammer, O., Lickefett, M. ve Bauernhansl, T. (2016). "Advanced Complexity Management Strategic Recommendations of Handling the "Industrie 4.0" Complexity for Small and Medium Enterprises", *Procedia CIRP*, 57, 116-121.
- Janipha, N.A.I., Ahmad, N. ve Ismail, F. (2015), "Clients' Involvement in Purchasing Process for Quality Construction Environment", *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 168, 30-40.
- Jensen, T.C., Bekdik, B. ve Thuesen, C. (2014). "Understanding Complex Construction Systems through Modularity", *Proceedings of the 7th World Conference on Mass Customization, Personalization, and Co-Creation (MCPC 2014)*, Aalborg, Denmark, Şubat 4-7, 541-555.
- Jung, Y. ve Gibson, G.E. (1999). "Planning for Computer Integrated Construction", *Journal of Computing in Civil Engineering*, 13(4), 217-225.
- Kasperzyk, C., Kim, M.K. ve Brilakis, I. (2017). "Automated Re-Prefabrication System for Buildings Using Robotics", *Automation in Construction*, 83, 184-195.
- Kensek, K. ve Noble, D. (2014). "Building Information Modeling: BIM in Current and Future Practice", John Wiley & Sons.
- Khoshnevis, B. (1996). "U.S. Patent No. 5,529,471", Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Khoshnevis, B. (2004). "Automated Construction by Contour Crafting-Related Robotics and Information Technologies", *Automation in Construction*, 13(1), 5-19.
- Kieran, S. ve Timberlake, J. (2004). "Refabricating Architecture: How Manufacturing Methodologies are Poised to Transform Building Construction", McGraw-Hill, New York.
- Kietzmann, J., Pitt, L. ve Berthon, P. (2015). "Disruptions, Decisions, and Destinations: Enter the Age of 3-D Printing and Additive Manufacturing", *Business Horizons*, 58(2), 209-215.
- Kim, T., Lee, D., Lim, H., Lee, U.K., Cho, H. ve Cho, K. (2021). "Exploring Research Trends and Network Characteristics in Construction Automation and Robotics Based on Keyword Network Analysis", *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 20(4), 442-457.
- Koskela, L. (1992). "Application of the New Production Philosophy to Construction (72)", Stanford University, Stanford, CA.
- Koskela, L., Howell, G., Ballard, G. ve Tommelein, I. (2002). "The Foundations of Lean Construction", *Design and Construction: Building in Value*, 211-226.
- Larsen, M.S.S., Lindhard, S.M., Brunoe, T.D., Nielsen, K. ve Larsen, J.K. (2019). "Mass Customization in the House Building Industry: Literature Review and Research Directions", *Frontiers in Built Environment*, 5, 115.
- Latham S.M. (1994). "Constructing the Team", Final Report, July 1994, <https://constructingexcellence.org.uk/wp-content/uploads/2014/10/Constructing-the-team-The-Latham-Report.pdf> (Erişim Tarihi: 01.12.2018).
- Leviäkangas, P., Paik, S. M. ve Moon, S. (2017). "Keeping up with the Pace of Digitization: The Case of the Australian Construction Industry", *Technology in Society*, 50, 33-43.
- Li, Z. ve He, D. (2013). "Discussion of a Method of Collaborative Construction Project Information Management Based on BIM", *ICCREM 2013: Construction and Operation in the Context of Sustainability*, 492-498.
- Lin, Z. (2011). "Nakagin Capsule Tower: Revisiting the Future of the Recent Past", *Journal of Architectural Education*, 65(1), 13-32.
- Linner, T. (2013). "Automated and Robotic Construction: Integrated Automated Construction Sites", Doktora Tezi, Technische Universität München, Münih.
- Liu, J., Li, H., Sun, L., Guo, Z., Harvey, J., Lu, H. ve Jia, M. (2021). "In-Situ Resources for Infrastructure Construction on Mars: A Review", *International Journal of Transportation Science and Technology*, DOI: 10.1016/j.ijtst.2021.02.001.
- Lu, W., Chen, K., Xue, F. ve Pan, W. (2018). "Searching for an Optimal Level of Prefabrication in Construction: An Analytical Framework", *Journal of Cleaner Production*, 201, 236-245.
- Lu, W., Lee, W.M., Xue, F. ve Xu, J. (2021). "Revisiting the Effects of Prefabrication on Construction Waste Minimization: A Quantitative Study Using Bigger Data", *Resources, Conservation and Recycling*, 170, 105579.
- Luo, L., He, Q., Jaselskis, E.J. ve Xie, J. (2017). "Construction Project Complexity: Research Trends and Implications", *Journal of Construction Engineering and Management*, 143(7), 04017019.
- Maeda, J. (1994). "Development and Application of the SMART System", *Automation and Robotics in Construction XI*, 457-464.
- Maurer, M. (2017). "Complexity Management in Engineering Design—a Primer", <https://www.springer.com> (Erişim Tarihi: 01.12.2018).

- Mechtcherine, V., Nerella, V.N., Will, F., Näther, M., Otto, J. ve Krause, M. (2019). "Large-Scale Digital Concrete Construction–CONPrint3D Concept for On-Site, Monolithic 3D-Printing", *Automation in Construction*, 107, 102933, 1-16.
- Memari, A.M., Huelman, P.H., Iulo, L.D., Laquatra, J., Martin, C., McCoy, A., Nahmens, I., ve Williamson, T. (2014). "Residential building construction: State-of-the-art review", *Journal of Architectural Engineering*, 20(4), [B4014005], 1-38.
- MGI, McKinsey Global Institute (2015). "Digital America: A Tale of the Haves and Have-Mores" , Industry Report, December 2015, <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/technology%20media%20and%20telecommunications/high%20tech/our%20insights/digital%20america%20a%20tale%20of%20the%20haves%20and%20have%20mores/digital%20america%20full%20report%20december%202015.pdf> (Erişim Tarihi: 01.12.2018).
- MGI, McKinsey Global Institute (2017). "Reinventing Construction: A Route to Higher Productivity", Construction Industry Report, February 2017, <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/operations/our%20insights/reinventing%20construction%20through%20a%20productivity%20revolution/mgi-reinventing-construction-a-route-to-higher-productivity-full-report.pdf> (Erişim Tarihi: 01.12.2018).
- Mostafa, S., Kim, K.P., Tam, V.W.Y. ve Rahnamayiezekavat, P. (2020). "Exploring the Status, Benefits, Barriers and Opportunities of Using BIM for Advancing Prefabrication Practice", *International Journal of Construction Management*, 20(2), 146-156.
- Nam, C.H. ve Tatum, C.B. (1988). "Major Characteristics of Constructed Products and Resulting Limitations of Construction Technology", *Construction Management and Economics*, 6(2), 133-147.
- National Audit Office, (2001). "Modernising Construction", Report by the comptroller and auditor general, HC 87 Session 2000-2001: 11 January 2001, London, <https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/ukgwa/20170207052351/https://www.nao.org.uk/wp-content/uploads/2001/01/000187.pdf> (Erişim Tarihi: 01.12.2018).
- National Platform for the Built Environment, (2008). "ICT and Automation (ICTA) Scoping Study Report", <https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/ict-and-automation-icta-scoping-study-research-reports> (Erişim Tarihi: 01.12.2018).
- Navon, R. ve Goldschmidt, E. (2003). "Monitoring Labor Inputs: Automated-Data-Collection Model and Enabling Technologies", *Automation in Construction*, 12(2), 185-199.
- Ngowi, A.B., Pienaar, E., Talukhaba, A. ve Mbachu, J. (2005). "The Globalisation of the Construction Industry-A Review", *Building and Environment*, 40(1), 135-141.
- Oesterreich, T.D. ve Teuteberg, F. (2016). "Understanding the Implications of Digitisation and Automation in the Context of Industry 4.0: A Triangulation Approach and Elements of a Research Agenda for the Construction Industry", *Computers in Industry*, 83, 121-139.
- Oh, M., Lee, J., Hong, S.W. ve Jeong, Y. (2015). "Integrated System for BIM-Based Collaborative Design", *Automation in Construction*, 58, 196-206.
- Pachon, A.G. (2012). "Construction Site Automation: Guidelines for Analyzing its Feasibility, Benefits and Drawbacks", *Advanced Construction and Building Technology for Society*, 38.
- Pan, M., Linner, T., Pan, W., Cheng, H. ve Bock, T. (2018). "A Framework of Indicators for Assessing Construction Automation and Robotics in the Sustainability Context", *Journal of Cleaner Production*, 182, 82-95.
- Pegna, J. (1997). "Exploratory Investigation of Solid Freeform Construction", *Automation in Construction*, 5(5), 427-437.
- Perkins, I. ve Skitmore, M. (2015). "Three-Dimensional Printing in the Construction Industry: A Review", *International Journal of Construction Management*, 15(1), 1-9.
- Sacks, R., Koskela, L., Dave, B.A. ve Owen, R. (2010). "Interaction of Lean and Building Information Modeling in Construction", *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(9), 968-980.
- Saidi, K.S., Bock, T. ve Georgoulas, C. (2016). "Robotics in Construction", Springer Handbook of Robotics, Springer, 1493-1519.
- Salem, O., Solomon, J., Genaidy, A. ve Minkarah, I. (2006). "Lean Construction: From Theory to Implementation", *Journal of Management in Engineering*, 22(4), 168-175.
- Saurin, T.A., Rooke, J. ve Koskela, L. (2013). "A Complex Systems Theory Perspective of Lean Production", *International Journal of Production Research*, 51(19), 5824-5838.
- Sawhney, A., Riley, M. ve Irizarry, J. (2020). "Construction 4.0: Introduction and Overview", Construction 4.0, 1st Edition, Routledge: London, UK, 3-22.

- Shadid, W.K. (2018). "A Framework for Managing Organizations in Complex Environments", *Construction Management and Economics*, 36(4), 182-202.
- Sivaram, P.M., Mande, A.B., Premalatha, M. ve Arunagiri, A. (2020). "Investigation on a Building-Integrated Passive Solar Energy Technology for Air Ventilation, Clean Water and Power", *Energy Conversion and Management*, 211, 112739.
- Tay, Y.W.D., Panda, B., Paul, S.C., Noor Mohamed, N.A., Tan, M.J. ve Leong, K.F. (2017). "3D Printing Trends in Building and Construction Industry: A Review", *Virtual and Physical Prototyping*, 12(3), 261-276.
- Turner, J.R. (2008). "The Handbook of Project-Based Management: Leading Strategic Change in Organizations", Third Edition, McGraw-Hill ebooks, https://books.google.com.tr/books?id=Sqqem7PDnMIC&pg=PP1&dq=Handbook+of+Project-Based+Management&hl=tr&sa=X&ved=2ahUKEwj2pKOAqan0AhX9S_EDHeEVCCwQ6AF6BAgFEAl#v=onepage&q=Handbook%20of%20Project-Based%20Management&f=false (Erişim Tarihi: 01.12.2018).
- Van Gassel, F. ve Maas, G. (2008). "Mechanising, Robotising and Automating Construction Processes", *Robotics and Automation in Construction*, InTech.
- Volkov, A. ve Shilova, L. (2020). "Cyber-Physical Systems in Construction for Sustainable Urban Development", *2nd International Symposium on Architecture Research Frontiers and Ecological Environment*, E3S Web of Conferences, 143, 01019, EDP Sciences.
- Vrijhoef, R. ve Koskela, L. (2005). "Revisiting the Three Peculiarities of Production in Construction", *Proceedings of 13th International Group for Lean Construction Conference*, 19-27.
- William C.I. (1986). "Future Directions for Computerized Construction Research", *Journal of Construction Engineering and Management*, 112(3), 326-345.
- Williams, T. (2016). "Identifying Success Factors in Construction Projects: A Case Study", *Project Management Journal*, 47(1), 97-112.
- Williams, T.M. (1999). "The Need for New Paradigms for Complex Projects", *International Journal of Project Management*, 17(5), 269-273.
- Winch, G. (1989). "The Construction Firm and the Construction Project: A Transaction Cost Approach", *Construction Management and Economics*, 7(4), 331-345.
- Winch, G., Usmani, A. ve Edkins, A. (1998). "Towards Total Project Quality: A Gap Analysis Approach", *Construction Management & Economics*, 16(2), 193-207.
- Wolfe, T. ve Garfield, L. (1989). "A New Standard for Living: The Lustron House, 1946-1950", *Perspectives in Vernacular Architecture*, 3, 51-61.
- Wood, H. ve Ashton, P. (2010). "Modeling Project Complexity", *Proceedings of the 26th Annual ARCOM Conference*, 6-8 September, Leeds, UK, Association of Researchers in Construction Management, 1111-1120.
- Wood, H.L. ve Gidado, K. (2008). "An Overview of Complexity Theory and Its Application to the Construction Industry", *Proceedings of the 24th Annual ARCOM Conference*, 1-3 September, Cardiff, UK, Association of Researchers in Construction Management, 677-686.
- Wu, Y. ve Cai, J. (2017). "Research on New-Type Smart City in China Based on Smart Construction Theory", *ICCREM 2017-International Conference on Construction and Real Estate Management*, November 10-12, Guangzhou, China, ASCE, 347-354.
- Xia, M., Nematollahi, B. ve Sanjayan, J. (2019). "Printability, Accuracy and Strength of Geopolymer Made Using Powder-Based 3D Printing for Construction Applications", *Automation in Construction*, 101, 179-189.
- Yoshida, T. (2006). "A Short History of Construction Robots Research & Development in a Japanese Company", *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 188-193.
- Yuan, R., Guo, F., Qian, Y., Cheng, B., Li, J., Tang, X. ve Peng, X. (2021). "A System Dynamic Model for Simulating the Potential of Prefabrication on Construction Waste Reduction", *Environmental Science and Pollution Research*, 1-12.
- Zhang, J., Long, Y., Lv, S. ve Xiang, Y. (2016). "BIM-Enabled Modular and Industrialized Construction in China", *Procedia Engineering*, 145, 1456-1461.
- Zhang, Z., Demir, K.G. ve Gu, G.X. (2019). "Developments in 4D-Printing: A Review on Current Smart Materials, Technologies, and Applications", *International Journal of Smart and Nano Materials*, 10(3), 205-224.



STRATEJİK ARAŞTIRMALAR VE VERİMLİLİK GENEL MÜDÜRLÜĞÜ

