

**T.C.
HASAN KALYONCU ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İŞLETME ANABİLİM DALI**



**ENDÜSTRİ 4.0 UYGULAMALARI LİTERATÜRÜNÜN
BİBLİYOMETRİK ANALİZİ: EĞİLİMLER, ATIFLAR VE
YAYINLANMA MODELLERİNİN İNCELENMESİ**

Ferhat YILMAZ

DOKTORA TEZİ

GAZİANTEP – 2025



LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
DOKTORA TEZ KABUL VE ONAY FORMU

İşletme Anabilim Dalı Doktora Programı öğrencisi Ferhat YILMAZ tarafından hazırlanan “Endüstri 4.0 Uygulamaları Bibliyometrik Analizi: Eğilimler, Atıflar ve Yayınlanma Modellerinin İncelenmesi” başlıklı tez, 22/07/2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucu başarılı bulunarak jürimiz tarafından Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

<u>Görevi</u>	<u>Unvanı, Adı ve Soyadı</u>	<u>Kurumu/Üniversitesi</u>	<u>İmzası:</u>
Tez Danışmanı	Doç. Dr. Zeynep ÖZGÜNER	Hasan Kalyoncu Üniversitesi	
Jüri Başkanı	Doç. Dr. Mehmet AYTEKİN	Gaziantep Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Filiz ÇAYIRAĞASI	Gaziantep Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Filiz ÇOKAY ÇOPUROĞLU	Gaziantep Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Gül ÇIKMAZ	Hasan Kalyoncu Üniversitesi	

Bu tez Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen yukarıdaki jüri üyeleri tarafından uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Ufuk AKBAŞ

Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Ferhat YILMAZ

31/07/2025

**HASAN KALYONCU ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İŞLETME ANABİLİM DALI**

**ENDÜSTRİ 4.0 UYGULAMALARI LİTERATÜRÜNÜN
BİBLİYOMETRİK ANALİZİ: EĞİLİMLER, ATIFLAR VE
YAYINLANMA MODELLERİNİN İNCELENMESİ**

Ferhat YILMAZ

DOKTORA TEZİ

**Danışman
Doç. Dr. Zeynep ÖZGÜNER**

ÖZET

Bu araştırmada Endüstri 4.0 uygulamaları akademik literatürünü detaylı olarak incelemek amacıyla bibliyometrik analiz yapılmıştır. Dijitalleşme, yapay zekâ, nesnelerin interneti, büyük veri ve otomasyon gibi gelişmelerin üretim sistemlerine etkisi giderek artmakta, bu da akademik çalışmaların hızla çeşitlenmesine neden olmaktadır. Bu bağlamda, çalışmada Web of Science veri tabanından çeşitli anahtar kelimeler ile daraltılarak elde edilen veriler ışığında üretim süreçlerine dair yayınların bilimsel etkileri, atıf dinamikleri, yayınlanma modelleri ve iş birliği ağları kapsamlı biçimde incelenmiştir. Bibliyometrik analiz kapsamında VOSviewer, Gephi ve Tableau gibi görselleştirme araçları kullanılmış, anahtar kelime trendleri, bölgesel liderlik ve kurumlar arası etkileşimler detaylandırılmıştır. Elde edilen bulgular, literatürdeki eğilimlerin zaman içinde nasıl evrildiğini ortaya koymakta ve gelecekte yapılacak çalışmalara yönelik önemli öneriler sunmaktadır. İlgili literatürde üretim süreçlerinin Endüstri 4.0 ile birleşerek işletmelerin rekabet avantajı kazandığı, verimlilik, kapasite, kalite, inovasyon ve müşteri memnuniyeti gibi unsurlarda iyileşmeler sağladığı vurgulanmaktadır. Araştırma bulgularına göre de özellikle 2018 sonrasında yıllık yaklaşık %40'lık bir artışla bilimsel çalışma çıktılarının önemli ölçüde arttığını ortaya koyulmaktadır. Ortak yazarlık ağlarının da büyüyerek Çin, Amerika Birleşik Devletleri ve Batı Avrupa'daki kurumlar arasında artan küresel iş birliğini vurgulamaktadır. Tematik analiz, erken dönem çalışmaların siber-fiziksel sistemler ve otomasyon gibi alanlara odaklandığını işaret ederken son yıllardaki akademik çalışmalarda yapay zekâ (AI), nesnelerin interneti (IoT), dijital ikizler ve açıklanabilir YZ gibi daha uzmanlaşmış konulara yönelindiği görülmüştür. Araştırmada akademik çalışmalara Endüstri 4.0 literatürünün mevcut durumu ve potansiyel gelişim alanları hakkında yön gösterici bilgiler sağlanmaktadır. Bu yönüyle araştırmanın, üretim teknolojileri ve dijital dönüşüm alanlarında yapılacak yeni akademik çalışmalar için değerli bir katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Endüstri 4.0, üretim süreçleri, teknoloji tabanlı üretim, bibliyometrik analiz.

HASAN KALYONCU UNIVERSITY
GRADUATE EDUCATION INSTITUTE
DEPARTMENT of BUSINESS ADMINISTRATION

BIBLIOMETRIC ANALYSIS OF INDUSTRY 4.0 APPLICATIONS
LITERATURE: ANALYSIS OF TRENDS, CITATIONS AND PUBLICATION
MODELS

Ferhat YILMAZ

PHD THESIS

Advisor

Assoc. Prof. Dr. Zeynep OZGUNER

ABSTRACT

In this study, a bibliometric analysis was conducted to examine the academic literature on Industry 4.0 applications in detail. Developments such as digitalisation, artificial intelligence, the Internet of Things, big data, and automation are increasingly affecting production systems, which leads to a rapid diversification of academic studies. In this context, the study comprehensively examined the scientific impact, citation dynamics, publication patterns, and collaboration networks of publications related to production processes based on data obtained from the Web of Science database by using various keywords for narrowing down the scope. Visualisation tools such as VOSviewer, Gephi, and Tableau were used in the bibliometric analysis to detail keyword trends, regional leadership, and inter-institutional interactions. The findings reveal how trends in the literature have evolved over time and offer important recommendations for future studies. The relevant literature emphasises that production processes, when combined with Industry 4.0, provide businesses with a competitive advantage and improvements in efficiency, capacity, quality, innovation, and customer satisfaction. According to the research findings, scientific output has increased significantly, with an annual increase of approximately 40% since 2018. Co-authorship networks have also grown, highlighting increasing global collaboration between institutions in China, the United States and Western Europe. Thematic analysis indicates that early studies focused on areas such as cyber-physical systems and automation, while recent academic studies have shifted towards more specialised topics such as artificial intelligence (AI), the Internet of Things (IoT), digital twins and explainable AI. The research provides academic researchers with guiding information on the current state of Industry 4.0 literature and potential areas for development. In this regard, the study is expected to provide valuable contributions to new academic research in the fields of production technologies and digital transformation. **Keywords:** industry 4.0, production processes, technology-based production, bibliometric analysis.

ÖNSÖZ

Bu tez uzun ve zorlu bir yolculuğun ürünüdür. Danışmanım olduğu andan itibaren bana rehberlik eden, yön gösteren ve her adımda desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Zeynep Özgüner'e en derin teşekkürlerimi sunuyorum. Onun akademik birikimi, sabrı ve yapıcı yaklaşımı olmasaydı bu tez bu haliyle ortaya çıkamazdı. Kendisine minnettarlığımı ifade etmekte kelimeler yetersiz kalır. Ayrıca, Doç. Dr. Filiz Çayırağası ve Dr. Öğr. Üyesi Gül Çıkmaç hocalarıma, Tez İzleme Komitesi (TİK) sürecinde sundukları çok kıymetli görüşler, öneriler ve yönlendirmeler için teşekkürü bir borç bilirim. Onların katkıları, çalışmamın bilimsel derinliği açısından çok önemli bir rol oynamıştır. Bu yolculuk boyunca yalnızca akademik değil, fiziksel olarak da birçok zorlukla karşılaştım. Geçirdiğim rahatsızlıklar ve hastane süreçlerine rağmen, azmimi kaybetmeden devam edebildiğim için kendime de teşekkür etmek istiyorum. Pes etmeden, dirençli yönüme duyduğum gururu ve saygıyı burada paylaşmak istiyorum. Son teşekkürü de maddi ve manevi olarak hep yanımda olan bu dünyadaki en sevdiğim arkadaşım Halil Kaçmaz'a ayırmak isterim. Aklıma gelmeyen ama bu çalışmayı destekleyen tüm kişi ve kurumlara şükranlarımı sunar, bu yolculukta yanımda olan herkese içtenlikle teşekkür ederim.

FERHAT YILMAZ
Gaziantep- 2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
KISALTMALAR LİSTESİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1.Araştırmanın Konusu ve Problemi	1
1.2. Araştırmanın Sorusu	3
1.3. Araştırmanın Amacı.....	3
1.4. Araştırmanın Önemi	4
1.5. Varsayımlar	4
1.6. Sınırlılıklar	5
1.7. Tanımlar	5
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE	7
2.1. Endüstri 4.0 ve Bileşenleri	7
2.1.1. Endüstri 4.0 tarihsel gelişimi ve bileşenleri	7
2.1.1.1. Akıllı fabrikalar.....	12
2.1.1.2. Nesnelerin interneti (IoT).....	14
2.1.1.3. Siber-Fiziksel sistemler.....	16
2.1.1.4 Büyük veri ve analitik	18
2.1.1.5. Yapay zeka ve robotik.....	20
2.1.1.6. Eklemeli imalat (3D baskı)	24
2.1.1.7. Bulut bilişim ve mobilite	26
2.1.2. Endüstri 4.0'ın kolaylıkları ve zorlukları	28
2.1.2.1. Sağladığı kolaylıklar	28
2.1.2.2. Karşılaşılan zorluklar	29
2.1.2.3. Stratejiler ve politikalar	31
2.1.2.4. Güçlü ve zayıf yönleri	40
2.1.3. Endüstri 4.0 ve uygulandığı sektörler	44
2.1.3.1. Otomotiv sektörü	44

2.1.3.2. Sağlık sektörü.....	46
2.1.3.3. Tarım ve gıda sektörü.....	48
2.1.3.4. Enerji ve altyapı sektörü	51
2.1.3.4. Ulaşım sektörü	53
2.2. Sektörel Üretim Süreçleri / Sistemleri	54
2.2.1. Akıllı üretim sistemleri	55
2.2.2. Robotik ve otomasyon sistemleri	57
2.2.3. Dijital ikiz ve simülasyon teknolojileri	58
2.2.4. Nesnelerin interneti ve veri analitiği	63
2.2.5. Büyük veri ve veri analitiği	65
2.2.6. Eklemeli imalat (3D baskı) teknolojileri.....	69
2.3. Dünya’da ve Türkiye’de Endüstri 4.0	72
2.3.1. Endüstri 4.0 dünyadaki öncüleri	72
2.3.1.1. Amerika Birleşik Devletleri	72
2.3.1.2. Çin	74
2.3.1.3. Almanya.....	75
2.3.1.4. Güney Kore.....	78
2.3.1.5. Japonya	79
2.3.1.6. İsviçre	81
2.3.1.7. Meksika	82
2.3.2. Türkiye’de Endüstri 4.0	83
2.3.2.1. Ar-Ge yatırımları.....	85
2.3.2.2. Politikalar.....	86
2.3.3. Endüstri 4.0. gelecek perspektifleri.....	87
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	89
3.1. Veri Toplama	89
3.1.1. Veri kaynakları ve arama stratejisi.....	89
3.1.2. Dahil etme ve dışlama kriterleri	90
3.1.3. Veri çıkarma	90
3.1.4. Veri işleme	91
3.1.4.1. Temizleme ve normalleştirme	91
3.1.4.2. Şebeke inşaatı.....	91
3.1.5. Analitik Teknikler	91

3.1.5.1. <i>Bibliyometrik Göstergeler</i>	91
3.1.5.2. <i>Ağ Analizi</i>	92
3.1.5.3. <i>Tematik Evrim</i>	93
3.1.5.4. <i>Araçlar ve Yazılımlar</i>	93
3.1.5.5. <i>Etik Hususlar</i>	93
3.1.5.6. <i>Sınırlamalar</i>	93
3.2. <i>Analiz</i>	94
3.2.1. <i>Literatür analizi ve eğilimler</i>	94
3.2.1.1. <i>Araştırma ortamına genel bakış</i>	94
3.2.1.2. <i>Ana temalar ve konular</i>	95
3.2.1.3. <i>Yayınların Yıllar İçindeki Trendlerinin Evrimi</i>	96
3.2.1.4. <i>İş birliği Ağı Dinamikleri</i>	98
3.2.1.5. <i>Etkili çalışmalar ve kilit katkıda bulunanlar</i>	101
3.2.2. <i>Atıf analizi</i>	103
3.2.2.1. <i>Atıf ağlarının ve ilişkilerinin şekillenmesi</i>	103
3.2.2.1.1. <i>Erken atıf zirveleri</i>	103
3.2.2.1.2. <i>Zaman içinde eğilimler</i>	103
3.2.2.1.3. <i>Ağ yapısı</i>	104
3.2.2.1.4. <i>Önde gelen dergiler</i>	104
3.2.2.1.5. <i>Önde gelen konferanslar</i>	105
3.2.2.1.6. <i>Yayın modelleri</i>	105
3.2.2.1.7. <i>Açık erişim yayınların yaygınlaştırma ve atıf oranları üzerindeki etkileri</i>	106
3.2.2.1.8. <i>Atıf analizinden çıkarımlar ve içgörüler</i>	106
3.2.3. <i>Bölgesel ve kurumsal analiz</i>	107
3.2.3.1. <i>Önde gelen ülkeler ve kurumlar</i>	107
3.2.3.1.1. <i>Asya</i>	107
3.2.3.1.2. <i>Avrupa</i>	107
3.2.3.1.3. <i>Kuzey Amerika</i>	108
3.2.3.1.4. <i>Afrika</i>	108
3.2.3.2. <i>Temel Gözlemler</i>	109
3.2.4. <i>Bölgesel yayın ve atıf eğilimleri</i>	109
3.2.4.1. <i>Yayın hacmi</i>	109

3.2.4.2. <i>İşbirlikçi modeller</i>	110
3.2.5. <i>İş birliği ve disiplinler arası çalışmalar</i>	111
3.2.5.1. <i>Yazar iş birliği düzeyi</i>	111
3.2.5.1.1. <i>Ortak yazarlık ağ yapısı</i>	111
3.2.5.1.2. <i>Disiplinler arası bağlantı</i>	113
3.2.5.1.3. <i>Uluslararası iş birliklerinin etkisi</i>	115
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	118
4.1. Bulgular	118
4.1.1. Araştırma çıktılarında hızlı büyüme	118
4.1.1.1. <i>Yayın dalgalanması</i>	118
4.1.1.2. <i>Ağ boyutunun genişletilmesi</i>	118
4.1.1.3. <i>Teknolojik eğilimler ve çığır açan katkılar, önemli yenilikler</i>	119
4.1.2. Anahtar kelime trendleri	122
4.1.3. İşbirliği ağları ve atıf dinamikleri ortak yazarlık yapısı	122
4.1.4. Atıf kalıpları	122
4.1.5. Kurumsal ve bölgesel liderlik	124
4.1.6. Yayın modelleri ve ekonomik değerlendirmeler	124
4.1.7. Gelecekteki araştırma yönelimleri ve boşluklar	124
4.2. Tartışma	126
4.2.1. Temel bulguların yorumlanması	126
4.2.2. Mevcut literatürle karşılaştırma	127
4.2.3. Bulguların çıkarımları	127
4.2.4. Gelecekteki araştırma yönelimleri	128
4.2.5. Disiplinler arası iş birliğinin güçlendirilmesi	130
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	139
KAYNAKÇA	142
ÖZGEÇMİŞ	156

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 3.1. En çok bağlantı kurulan 5 yazar	100
Çizelge 3.2. Üniversiteler ağındaki en büyük bağlantılı bileşen	110
Çizelge 3.3. Eşzamanlılık Sayılarına Sahip En İyi 5 Anahtar Kelime Alt Grafiği	114



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Araştırmanın örneklemindeki yıllık yayın sayısı	95
Şekil 3.2. Görülme sıklığına göre anahtar kelimeler	96
Şekil 3.3. Yıllara göre ortalama zaman serisi	97
Şekil 3.4. Anahtar kelime ağlarının genel yoğunluğunun zaman serisi	97
Şekil 3.5. Yazar ağının küme büyüklüğü histogramı	98
Şekil 3.6. Yazar Ağındaki en büyük bağlantılı bileşen.	99
Şekil 3.7. Yayın başına düşen ortalama yazar sayısının yıllara göre dağılımı.....	100
Şekil 3.8. Yayın başına düşen yazar sayısının dağılımı	102
Şekil 3.9. Yayın başına düşen ortalama atıf sayısının yıllara göre dağılımı	103
Şekil 3.10. Yayın sayılarına göre en iyi 10 dergi	105
Şekil 3.11. En fazla kenar sayısına sahip düğümler	109
Şekil 3.12. Üniversiteler ağındaki en büyük bağlantılı bileşen (2127 Üniversite).....	110
Şekil 3.13. Yazar ağındaki yıllık kenar sayısı dağılımı	112
Şekil 3.14. Yazar ağındaki yıllık düğüm sayısı	112
Şekil 3.17. Üniversite işbirliklerinin dağılımı	116
Şekil 3.18. Yayın başına üniversite işbirliği kutu grafiği	116
Şekil 3.19. Yayın başına düşen yıllık ortalama üniversite sayısı	117
Şekil 4.1. 2013 yılı ortak yazarlık ağı.....	118
Şekil 4.2. 2024 yılı ortak yazarlık ağı.....	119
Şekil 4.3. Zaman içinde en tutarlı ilk 15 yazar	120
Şekil 4.4. Yayın sayısı tahmini	121
Şekil 4.5. Ağa katılması beklenen tahmini yazar sayısı	121

KISALTMALAR LİSTESİ

- 3D:** 3 Boyutlu Yazıcı
- AB:** Avrupa Birliği
- ABD:** Amerika Birleşik Devletleri
- AI:** Yapay Zekâ
- APC:** Author Publishing Cost – Yazar Yayın Maliyeti
- AR-GE:** Araştırma-Geliştirme
- BCG:** Boston Consulting Group – Boston Danışma Grubu
- BİT:** Bilgi ve İletişim Teknolojileri
- BM:** Birleşmiş Milletler
- BRICKS:** Brezilya, Rusya, Hindistan, Çin ve Güney Afrika ülkelerinin ilk harflerinden oluşan bir kısaltmadır.
- BSTB:** Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı
- BTYK:** Bilim ve Teknoloji Yüksek Kurulu
- CCTV:** Closed Circuit Television – Kapalı Devre Televizyon
- CNRS:** Centre National de la Recherche Scientifique – Fransa Milli Bilimsel Araştırma Merkezi
- CPS:** Cyber Physical Systems - Siber Fiziksel Sistemler
- DFK:** Global Alliance of Accounting – Küresel Muhasebeciler Birliği
- DOE:** Department of Energy - Amerika da kullanılan Enerji Bakanlığı
- DT:** Digital Twin – Dijital İkiz
- DVSM:** Digital Value Streaming Mapping – Dijital Değer Akışı Haritalama
- EBSO:** Ege Bölgesi Sanayi Odası
- EMRAM:** Elektronik Sağlık Kayıtlarını Benimseme Modeli
- ERP:** Kurumsal Kaynak Planlaması
- EAI:** Explainable Artificial Intelligence – Açıklanabilir Yapay Zeka
- GPS:** Global Positioning System – Küresel Konumlandırma Sistemi
- GSYH:** Gayri Safi Yurtiçi Hâsıla
- GTAI:** Germany Trade & Invest – Almanya Ticaret ve Yatırım
- HES:** Hidroelektrik Santrali
- HIMSS:** Healthcare Information and Management Systems Society – Sağlık Bilgi ve Yönetim Sistemleri Topluluğu
- IIC:** Industrial Internet Consortium – Endüstriyel İnternet Konsorsiyumu

IMF: International Monetary Fund – Uluslararası Para Fonu

IoT: Internet of Things - Nesnelerin İnterneti

IT: Bilgi Teknolojileri

KAIST: Kore İleri Bilimler Akademisi

KOBİ: Küçük ve Orta Ölçekli İşletmeler

KOSGEB: Küçük ve Orta Ölçekli İşletmeleri Geliştirme ve Destekleme İdaresi Başkanlığı

MDPI: Multidisciplinary Digital Publishing Institute – Çok Disiplinli Dijital Yayın Enstitüsü

MESS: Manufacturing Execution System – Üretim Yönetim Sistemleri

NAFTA: North American Free Trade Agreement - Kuzey Amerika Serbest Ticaret Anlaşması

NFS: Network File System - Ağ Dosya Sistemi

NNMI: Ulusal İmalat İnovasyon Ağı Programı

NASA: National Aeronautics and Space Administration- Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi

OECD: Ekonomik İş Birliği ve Kalkınma Örgütü

RFID: Radio Frequency Identification - Radyo Frekansı ile Tanımlama

SSCB: Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği

TEYDEB: Teknoloji ve Yenilik Destek Programları Başkanlığı

TÜBİTAK: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu

TÜSİAD: Türkiye Sanayicileri ve İş Adamları Derneği

UNDP: Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı

ÜYDY: Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi

WEF: World Economic Forum – Dünya Ekonomik Forumu

1. GİRİŞ

1.1.Araştırmanın Konusu ve Problemi

Üretim yönetiminde kullanılan yalın üretim, zaman içerisinde değişen müşteri memnuniyeti, kârlılık, verimlilik ve esneklik gibi çeşitli faktörler nedeniyle küresel piyasada yetersiz kalmıştır. Bu durum Endüstri 4.0'ın ortaya çıkışına zemin hazırlamıştır. Endüstri 4.0 sayesinde dijital yol haritası üretim yönetiminde kullanılır hale gelmiştir.

Endüstri 4.0 ile yalın üretim felsefesi bir arada kullanıldığında işletmelerin rekabet avantajı yakaladıkları ve üretim sürecinde iyileşme yaşandığı görülmektedir (Özdemir ve Özgüner, 2018). Üretim ortamının dijitalleşmesi ve otomasyonu ürünleriyle çevreleri ve iş ortakları arasındaki iletişimin sağlanması ve dijital bir değer zinciri oluşturulmasında Endüstri 4.0 doğrudan etkilidir. Endüstri 4.0 sayesinde zayıf organize edilen üretim sistemlerinde başarı elde edilmektedir. Nitekim verilerinin anlık olarak girilebilmesi, takibinin yapılması, analiz edilmesi ve yorumlanması dijital dönüşümde önemlidir.

Yalın üretim sistemini uygulayan işletmeler sürecin devamlı olarak iyileştirilmesine yönelik çalışmalar yürütmektedir. İşletmedeki gerçek dünyadaki yalın sistem ile toplanan verilerin sanal dünyadaki birleşenler ile bütünleştirilmesi ise Endüstri 4.0 ile sağlanmaktadır. Böylece verimlilik, kapasite, kalite, inovasyon ve müşteri memnuniyeti gibi unsurlar artacak israf ve maliyet azalacaktır (Soylu, 2017; Barutçu, 2019). Bunun yanı sıra yalın üretimde sürekli iyileştirme üzerinde çalışan personelin yetkinliği yüksek olacağı için dijital dönüşüm sürecine daha hızlı uyum sağlaması söz konusudur. Yalın felsefenin hayata geçirilemediği işletmelerde ise toplanan verilerin sağlıklı analiz edilme imkanı oldukça düşüktür. Bu durum doğrudan işletme için bir tehdit unsurudur. Üretim sürecinde yaşanan dijitalleşme işletmelerdeki verilerin anlık olarak paylaşıldığı noktada iletişimin sürekli olmasına ve doğru yorumlanmasına katkı sağladığı görülmektedir. Endüstri 4.0 geleneksel üretim modellerinin daha verimli, esnek ve sürdürülebilir olmasına yardımcı olduğu için tercih edilmektedir.

Endüstri 4.0 uygulamaları üretim sektöründe dijitalleşme başta olmak üzere otomasyon ve veri analitiği gibi gelişmiş teknolojilerin kullanımını ifade etmektedir. Endüstri 4.0 doğrultusunda üretim sürecindeki bileşenlerin teknolojiye entegrasyon edilmesi verilerin zaman kısıtlaması olmadan ulaşımına katkı sunmaktadır. Ayrıca veri transferi sirkülasyonunu sürekliliğinin sağlanmasına Endüstri 4.0 doğrudan rol oynamaktadır. Dijitalleşme ve otomasyonun bir arada kullanıldığı Endüstri 4.0 bir

dönüşümü ifade etmektedir. 2011 yılında Almanya'nın liderliğinde başlayan bu dönüşüm dünyada çok sayıda sektörü etkileyerek endüstriyel üretim çağını başlatmıştır. Söz konusu dönüşüm nesnelerin interneti, yapay zeka, robotik sistem, bulut bilişim ve büyük veri gibi çok sayıda teknolojiyi kullanmaktadır.

Modern endüstriyel sürecin temelini oluşturan teknoloji tabanlı üretim sistemleri, üretim sisteminin verimli, hızlı ve esnek çalışmasına katkı sağlamaktadır. Teknoloji tabanlı üretim sistemleri dijital teknolojinin üretim sürecine entegre edilmesi kapsamında maliyetlerin düşürülmesi ve kalite standartlarının yükseltilmesi gibi çok sayıda avantajı beraberinde getirmektedir (Sarıkulak, 2018). Zira robotik kodların kullanıldığı üretim sürecinde tekrarlı işlemlerin hızlı ve hassas şekilde gerçekleştirilebilmesi teknoloji tabanlı üretim sistemlerinin kullanımı sayesinde mümkün hale gelmektedir. Benzer şekilde yapay zeka destekli sistemler dahilinde üretim sürecinde yaşanabilecek hataların minimuma indirilmesi kesintilerin önünde bir engel teşkil etmektedir.

Özellikle son yıllarda üretim sektöründe ciddi bir dönüşüm yaşanmıştır. Dijitalleşme, otomasyon ve yapay zeka gibi teknolojilerin hızlı gelişme göstermesi ise üretim kapasitesine verimliliği, esnekliği ve sürdürülebilirliği ciddi ölçüde artırmıştır (Şekkel ve Bakan, 2018; Yıldırım, 2020). Söz konusu değişim kişiselleştirilmiş ürünlerin ortaya çıkışını hızlandırırken aynı zamanda çeşitliliği artırmıştır. İşletmeler küresel pazarda rekabet edebilmek için Endüstri 4.0 uygulamaları ve teknoloji tabanlı üretim sistemlerini kullanmak durumundadır. Söz konusu sistemler yalnızca maliyet avantajı sağlamakla kalmayarak yenilikçi iş modellerinin geliştirilmesine ve müşteri memnuniyetinin artırılmasında doğrudan rol oynamaktadır.

Bu bağlamda çalışmanın konusu Endüstri 4.0 uygulamaları ve teknoloji tabanlı üretim süreçleri ile ilgili akademik literatürün kapsamlı bibliyometrik analizini gerçekleştirmektir. Söz konusu analiz kapsamında ilgili kavramların gelişimi başta olmak üzere en çok ilgi gören araştırma araçları, çalışmalarda kullanılan metodolojiler, atıf yoğunlukları ve yayınlanma usulleri gibi faktörler değerlendirilmiştir. Literatür taraması kapsamında alandaki araştırmaların hangi boyutta ilerlediği ve hangi konuların daha fazla araştırma gerektirdiği ya da hangi teknolojilerin gelecekte daha fazla dikkat çekeceği ile ilgili önemli bilgiler elde edileceği düşünülmektedir.

Araştırmanın problem cümlesi incelendiğinde; ilgili konuda yapılan araştırmaların geniş bir literatür oluşturulmasına karşın bu alandaki yayınların bilimsel etkilerinin, atıf düzeylerinin, eğilimlerinin ve yayınlanma modellerinin sistematik şekilde

analiz edilmemiş olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla literatürdeki boşluğun araştırmacılar için önemli bir sorun teşkil ettiği göz önünde bulundurularak ilgili araştırma yürütülmüştür. Bu bağlamda araştırmanın temel problemini 2013 ile 2024 yılları arasında endüstri 4.0 uygulamaları üzerine yapılan çalışmaların taranan anahtar kelimeler, atıflar, yazar ağı ve eğilimlerin birlikte araştırılması kapsamında sınırlı kaldığı görüşü oluşturmaktadır.

1.2. Araştırmanın Sorusu

Araştırma sorusu "*Endüstri 4.0 uygulamaları literatüründe mevcut araştırma eğilimleri, atıf dinamikleri ve yayınlanma modelleri nelerdir ve bu alanda gelecekteki araştırma yönelimleri ve ihtiyaçlar nasıl belirlenebilir?*" olarak belirlenmiştir. Ve aşağıdaki alt araştırma sorularına cevaplar aranmıştır:

- Endüstri 4.0 literatüründe yapılan araştırmalar yeterli midir?
- Endüstri 4.0 süreçleri akademik çalışmalarda nasıl ele alınmıştır?
- Endüstri 4.0'ın çıkışından bu yana kadar akademik yayınlarda nasıl bir ivme yakalanmıştır ve yayın dalgalanması var mıdır?
- Endüstri 4.0 literatüründeki akademik çalışmalar hangi yayınlanma modelleri ile ele alınmıştır?
- Araştırmacıların yönelimleri hangi eğilimlere ve atıflara sebebiyet vermiştir?
- Ortak yazarlı makale durumu nedir?
- Öne çıkan kurumlar ya da yazarlar var mıdır?

1.3. Araştırmanın Amacı

Endüstri 4.0 uygulamaları alanında yayınlanan akademik literatürün kapsamlı bir bibliyometrik analizinin yapıldığı bu araştırma, literatürde yapılan çalışmalara göre eğilimleri, atıf ilişkilerini ve yayınlama modellerini incelemek üzere kurgulanmıştır. Böylece araştırmada dijitalleşme süreçlerinin üretim sektörüne olan etkilerinin anlaşılmasına dair gerçekleştirilen araştırmaların büyümesi ve değişimi bilimsel veriler ile ortaya koymak hedeflenmiştir. Bu doğrultuda araştırmanın amacı Endüstri 4.0 ve teknoloji tabanlı üretim süreçleri alanındaki akademik literatürün daha net ifade edilmesi ve bu alandaki araştırmaların gelecekte nasıl şekilleneceğine dair öngörülerde bulunulmasıdır. Ayrıca çalışma alandaki bilimsel gelişmeleri takip etmek isteyen

araştırmacılar başta olmak üzere akademik kurumlar ve sanayi profesyonellerine değerli bir kaynak sunmak hedeflenmektedir.

1.4. Araştırmanın Önemi

Üretim sektöründe Endüstri 4.0 bir devrim niteliğinde olduğu bilinmektedir. Nitekim Endüstri 4.0 beraberinde yapay zekâ, nesnelerin interneti, robot teknolojisi, büyük veri analitiği ve akıllı fabrika gibi çok sayıda teknolojik yeniliği beraberinde getirmiştir. Bu uygulamalar üretim süreçlerinin verimli, esnek ve sürdürülebilir hale getirilmesinde doğrudan etkilidir. Hızla değişen ve gelişen bu alanın anlaşılması, takibinin sağlanması ve etkili şekilde kullanılabilmesi ve dolayısıyla literatürün kapsamlı biçimde incelenmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Araştırmada bibliyometrik analiz, büyük veri yığınlarının anlaşılmasına önemli bir araç olması sebebiyle tercih edilmiştir.

Literatürdeki eğilimlerin belirlenmesi bu alandaki araştırmaların yönünün anlaşılmasında önemlidir. Bibliyometrik analiz sayesinde hangi teknolojilerin, yöntemlerin ve stratejilerin akademik yayınlar çerçevesinde çalışıldığı gösterilerek bu alanın hangi yönlerinin daha fazla ilgi görmesine karşın hangilerinin yetersiz kaldığı ortaya çıkacaktır. Böylece ilerleyen süreçte gerçekleştirilecek çalışmalara bir kaynak sağlamak mümkün olacaktır.

Bibliyometrik analiz kapsamında Endüstri 4.0 alanındaki gelişmelerin ve eğilimlerini takip edilmesi, bilimsel katkıların değerlendirilmesi, yayın stratejilerinin incelenmesi ve yeni araştırma alanlarının önerilmesi hedeflenmiştir.

1.5. Varsayımlar

Araştırmanın varsayımları;

- Endüstri 4.0 kavramının akademik araştırmacılar tarafından sıklıkla araştırıldığı varsayılmıştır.
- Endüstri 4.0 ile ilgili yayınların, farklı disiplinlerden gelen araştırmacılar arasında geniş bir atıf ağı oluşturduğu varsayılmıştır.
- Endüstri 4.0 literatürüne, örneğin, dergi makaleleri, konferans bildirileri, kitap bölümleri gibi farklı yayınlanma modelleri aracılığıyla çeşitli platformlarda anahtar kelimelerle daraltılan ve ilgili tarihler arasında yayınlanan makalelerin tamamına ulaşıldığı varsayılmıştır.

- Endüstri 4.0 uygulamaları literatürünün zaman içinde belirgin eğilimler gösterdiği varsayılmıştır.
- Endüstri 4.0 kavramının dünya üzerinde çeşitli ülke ve kurumlarda akademik anlamda yoğun bir biçimde ele alındığı varsayılmıştır.

1.6. Sınırlılıklar

Araştırmanın sınırlılıkları;

- Araştırma kapsamında endüstri 4.0 uygulamaları literatürü 2013 Ocak ayı ile 2024 Aralık ayı ile sınırlıdır.
- Araştırmada ilgili literatür analizine kullanılacak veri tabanlarının ve kaynakların sınırlılığı göz önünde bulundurulacaktır.
- Araştırma Web of Science (WOS) veri tabanlarında yer alan yayınlar ile sınırlıdır.
- Araştırmada gerçekleştirilecek bibliyometrik analiz atıf dinamikleri, araştırma eğilimleri, yayınlanma modelleri, gelecekteki araştırma yönelimleri ile sınırlıdır.

1.7. Tanımlar

- Endüstri 4.0: 2011 yılında Almanya Hannover Fuarı'nda ortaya çıkan bu kavram üretim süreçlerinin dijital alana taşınması ile esnek, verimli ve otonom bir yapıya geçişini ifade etmektedir (Özsoylu, 2017).
- Vosviewer: Bibliyometrik haritalar meydana getirmek, görselleştirmek ve keşfetmek için geliştirilmiş bir bilgisayar programıdır. Özellikle ortak atıf, ortak alıntılama veya ortak kelimeler ve yazarlık ağları oluşturmak için akademik haritalama yapar (Van Eck, N. J., ve Waltman, L, 2010: 524).
- Gephi: Grafik ve ağ analizi için açık kaynak kodlu bir yazılım paketidir. Java + OpenGL altyapısı üzerinde çalışır ve büyük ölçekli dinamik ağların görsel keşfi, manipülasyonu ve analizi için etkileşimli özellikler sunar (Bastian, M. vd., 2009: 361).
- PythonX (PyBibX: Yaygın olarak kullanılan python tabanlı bir bibliyometri aracı pyBibX'dir. Hem yapay zekâ destekli olarak bibliyometrik trend analizi, ağ görselleştirme ve yazar etkileri analizi yapan bir programdır (Pereira, V. vd., 2025: 305).

- Tableau: Veri görselleştirme ve analiz için kullanılan bir yazılımdır. Zaman serileri, alan haritaları, ağ verileri gibi veri çeşitlerini interaktif grafikler, dashboard'lar ve yazılı anlatımlar biçiminde sunar (Batt S. vd., 2020: 319).
- Boolean Dizin: Bilgi erişim sistemlerinde ve veri tabanlarında arama sorgularının “ve, veya, değil” (AND, OR, NOT) kullanılarak oluşturulmasına olanak tanıyan bir yapıdır. Bu yöntem, arama sonuçlarını filtrelemek, genişletmek veya daraltmak için dijital kütüphanelerde, bibliyometrik analizlerde ve büyük veri setlerinde hedeflenen veriye ulaşmak amacıyla sıklıkla kullanılır (Worth D., 2010: 306).



2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. Endüstri 4.0 ve Bileşenleri

2.1.1. Endüstri 4.0 tarihsel gelişimi ve bileşenleri

Üçüncü sanayi devrimi itibariyle gelişen teknoloji, şirketlerin stratejilerini şekillendirmede, yenilikçi iş modelleri oluşturulmasında ve yeni üretim yolları keşfetmede önemli bir rol oynamıştır. İlk iki sanayi devrimi de benzer yöntemler geliştirmiştir, üçüncü devrimde bu yaklaşımlar, yazılım çözümleri ve iletişim teknolojileri gibi yeniliklerle güçlendirilmiştir. Böylece dünya daha fazla birbirine bağlanmış ve ticari faaliyetler küresel ölçekte yayılmaya başlamıştır. Söz konusu ilerlemeler, dijital dönüşüm olarak tanımlanan üçüncü sanayi devrimini, tüm teknolojilerin dijital sistemlerle birleşmesini ifade eden dördüncü sanayi devrimi tartışmalarına dönüştürmüştür (Petekçi, 2021).

Dördüncü sanayi devrimi insanların yaşamlarını, çalışma biçimlerini ve iletişim yöntemlerini derinden değiştirecek olan bir dönemi simgelemektedir. Söz konusu devrim boyutları, kapsamı ve karmaşıklığı açısından daha önceki devrimlerden tam anlamıyla farklılaşmaktadır. Endüstri 4.0, sadece insan müdahalesi olmadan birbirleriyle etkileşimde bulunan nesnelerin yer aldığı ve tamamen otomatikleştirilmiş üretim süreçlerini mümkün kılan yeni teknolojilerin ortaya çıkmasıyla şekillenen bir sanayi alanıdır (Toker, 2018).

Otomasyonun daha akıllı hale gelmesini amaçlayan bir süreç olarak tanımlanan Endüstri 4.0 sanayi devrimlerinde teknolojik dönüşümün uluslararası rekabet stratejilerinin bir parçası haline geldiği bir süreci temsil etmektedir. Birçok ülke dördüncü sanayi devrimine geçiş için çeşitli hazırlıklar yapmaktadır (Kamber ve Bolatan, 2019).

İlk kez 2011 yılında Almanya'nın Hannover Fuarı'nda tanıtıldıktan sonra uzmanlar, gelişen teknolojiler ışığında Dördüncü Sanayi Devrimi'ne geçişin başladığını öne sürmüşlerdir. Almanya Hükümetinin desteğiyle, Endüstri 4.0 için liderliğini BOSCH şirketinin üst düzey yöneticisi Siegfried Dias ve SAP şirketinin yöneticisi Hennig Kagermann'ın üstlendiği bir çalışma grubu oluşturulmuştur. Bu grup, bir yıl boyunca Endüstri 4.0'a geçiş stratejileri için öneriler geliştirmiştir. Kagermann, 2011 yılında Endüstri 4.0 hakkında bir makale yayınlamış, 2013 yılında ise Almanya'nın Ulusal Bilim ve Mühendislik Akademisi bu makale temel alınarak Endüstri 4.0'a dair bir bildiri yayınlamıştır. Elektronik ve bilgi teknolojilerinin egemen olduğu 3. Endüstri Devriminin

(1970-2000) sona ermesinin ardından, 2000'li yıllarda ABD, Almanya, Çin ve Japonya gibi ülkelerde dijital teknolojiler, akıllı robotlar, büyük veri, nesnelerin interneti ve bulut bilişim gibi yenilikçi unsurların birleşimiyle Endüstri 4.0 ya da Dördüncü Sanayi Devrimi başlamıştır (Elibol, 2017).

Dördüncü sanayi devrimi, üretim süreçlerinin otomasyonunu, akıllı cihazları, gelişmiş mobil internet bağlantılarını, nesnelerin internetini, veri analizini, bulut bilişimi, cihazların birbirleriyle iletişim kurabilmesini, robotları, üç boyutlu yazıcıları ve en son teknolojilerle donatılmış akıllı fabrikaları kapsamaktadır. Üçüncü endüstri devrimi dijital bir devrimken, Endüstri 4.0 daha çok bir siber devrim olarak tanımlanabilir ve tüm cihazların siber sistemlerle entegre olduğu bir dönüşüm sürecini ifade etmektedir (Özdoğan, 2018, Gökdeniz & Kamburoğlu, 2022).

Yeni teknolojilerle birlikte, dönem içerisinde insanların iş gücündeki rollerinde de değişiklikler olmaktadır. Teknoloji odaklı sistemleri verimli bir şekilde kurabilmek için daha yetkin ve eğitilmiş bireylere ihtiyaç duyulacak, bu da insanların bazı iş alanlarından çekilmelerine yol açmaktadır. Bu dönemde, insanların hangi görevlerde kullanılacağı, onlardan hangi becerilerin beklenmesi gerektiği gibi sorular kritik bir önem taşımaktadır (Apillioğulları, 2018).

Endüstri 4.0 döneminde, veri toplama cihazları ve entegre sistemler aracılığıyla internet üzerinde zihin, beden ve mekanik işlevleri birleştiren yeni iş modelleri ve fırsatlar ortaya çıkmaktadır. Bu süreç, zamanla daha fazla işlem tabanlı teknolojilerin ve bilgi teknolojilerinin birleşmesine yol açmaktadır. Bu entegrasyon süreci, her an her yerden erişilebilen bilişim ve iletişim altyapısının oluşturulmasıyla yaygın iletişim olarak adlandırılmaktadır. Yaygın iletişim, ekonomik alanda yarattığı değerle farklı alanlarda farklı şekillerde kendini gösterebilmektedir. Nitekim bu iletişim türü makineler arasındaki akıllı etkileşimi mümkün kılmakta ve insan-makine ilişkilerini iyileştirmektedir (Banger, 2018).

Endüstri 4.0, Almanya, ABD ve Japonya gibi güçlü sanayi ülkelerinin rekabet üstünlüklerini kaybetmeye başlaması üzerine gündeme gelmiştir. Çin'in küresel pazarda güç kazanarak üretim ağını genişletmesi ve Avrupa ülkelerinin ticaret ağlarının bu durumdan etkilenmesi, Almanya'da yeni teknolojilerin geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymuş ve böylece Endüstri 4.0 süreci başlatılmıştır. 2011 yılında Almanya tarafından Endüstri 4.0'ı yüksek teknolojili sanayi stratejisi olarak dünya çapında tanıtmıştır. Endüstri 4.0, esnek üretim yöntemlerinin kullanıldığı, merkezileşmiş üretim sistemlerinin

terk edilip, akıllı teknolojiyle donatılmış sistemlerin devreye girdiği bir üretim modelidir (Acet ve Koç, 2020; Özsoylu, 2017; Arslan, 2020).

Endüstri 4.0 kavramı, Almanya'da stratejik hedeflerinden biri haline gelmiş ve 2020 Eylem Planı'na dahil edilmiştir (Kılıç ve Alkan, 2018; Şendoğdu, 2020). Bu stratejiyle, sanayi ve bilim arasındaki işbirliğinin güçlendirilmesi hedeflenmiş ve Endüstri 4.0'a yönelik olarak 200 milyon Euro'luk bir teşvik ayrılmıştır. 2012 yılında Almanya'da, Endüstri 4.0'ın uygulanabilirliğini tartışmak üzere akademisyenler, endüstri uzmanları ve ekonomistler bir araya gelerek, bu devrime dair bir yol haritası belirlemişlerdir (EKOIQ, 2014). Endüstri 4.0'ın başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için araştırma, geliştirme faaliyetlerine uygun bir sanayi yapısının oluşturulması gerektiği vurgulanmıştır (Kagermann vd. 2013; Yıldız ve Yıldırım 2018).

Amerika Birleşik Devletleri, gelişmiş teknolojileri ve yenilikçi kültürüyle Endüstri 4.0'a en yakın ülkelerden biridir. ABD'de sanayi dönüşümü, "İleri İmalat" başlığı altında ve Ulusal İmalat İnovasyon Ağı (NNMI) Programı kapsamında yürütülmektedir. Amerika'nın endüstriyel internet için yaklaşık iki milyar dolar ayırması ve bu alanda araştırmalar yapan Industrial Internet Consortium'u (IIC) kurması, ülkenin Endüstri 4.0 için sağlam temelleri olduğunu göstermektedir (Yıldız, 2018).

Japonya ise Endüstri 4.0'ın ötesine geçerek 2017 yılında "Toplum 5.0" kavramını tanıtmıştır. Bu kavram, fiziksel dünyayla siber dünyanın güçlü bir entegrasyonunu temsil eder ve insan odaklı olarak toplumsal ve ekonomik sorunları çözmeyi hedeflemektedir. Toplum 5.0, Japon hükümetinin bilim ve teknoloji temel planına göre, teknolojinin toplumsal yarar sağlamak için nasıl kullanılabileceğini keşfeden bir adımdır (Salgues, 2018; Şahin ve Yağcı, 2017; Acet ve Koç, 2020).

Çin, 2015 yılında "Made in China 2025" adını verdiği üretim stratejisini benimsemiş ve bu, Endüstri 4.0'ın Çin versiyonu olarak kabul edilmektedir. Çin, üretim maliyetlerini düşük tutarak daha büyük ekonomik hedeflere ulaşmayı amaçlamış ve bu doğrultuda geleneksel üretim anlayışından daha rekabetçi ve yüksek katma değerli üretim yöntemlerine geçiş yapmayı planlamıştır. Bu strateji, akıllı üretim tesisleri kurmak, kaliteyi artırmak ve yeşil üretime geçiş gibi hedefleri kapsamaktadır (Uyar, 2018; Sözen ve Mescioğlu, 2019).

Endüstri 4.0, hâlâ süregelen bir sistem olmakla birlikte bilgisayar teknolojilerinin yapay zeka ile birleştiği, insansız üretim sistemlerinin uygulamaya geçtiği bir dönemi

kapsamaktadır. Bu kavram, üretimin her aşamasında makinelerin birbiriyle uyumlu çalıştığı, akıllı sensörler aracılığıyla üretimin yönlendirilebildiği ve yüksek teknolojiye sahip akıllı fabrikaların öne çıktığı bir süreci tanımlamaktadır. Dördüncü sanayi devrimini diğer devrimlerden farklı kılan nokta, bu dönemin insanların varoluşunu sorgulayan kesintiler doğurmasıdır. Dördüncü sanayi devrimiyle ilgili tek bir ortak tanım bulunmamaktadır. Endüstri 4.0, akıllı fabrikalar, dijital dönüşüm ve modern teknoloji gibi terimlerle ifade edilen üretim süreçleriyle ilişkilidir. Bu devrim, iş ve hizmet dünyasında yeni standartlar, esneklik ve kaliteyi mümkün kılacak ileri düzey teknolojilerin üretim süreçlerinde uygulandığı bir dönemi işaret etmektedir (Kumaş ve Erol, 2021).

Dördüncü sanayi devrimi, tıpkı önceki devrimlerde olduğu gibi, makinelerin, elektrikli sistemlerin ve bilgisayar tabanlı otomasyonun kullanımıyla derin etkiler yaratacaktır. Bu devrim, insanların çalışma ve yaşam şekillerini köklü bir şekilde değiştirecek, fiziksel, dijital ve biyolojik dünyaların birbirine yakınlaşmasını sağlayacaktır. Dünya genelinde milyarlarca kişinin mobil cihazlarla bağlanması, yeni işlem gücü ve bilgi depolama kapasitesinin sağlanması, sınırsız olanaklar yaratacaktır. Yapay zeka, robot teknolojisi, nesnelerin interneti, otonom taşıma araçları, 3D yazıcılar, biyoteknoloji ve enerji depolama gibi teknolojilerin, birbirleriyle etkileşerek yakınlaşmasını sağlayacağı bir sürece dönüştüreceği öngörülmektedir (Toker, 2018).

Teknolojinin çift yönlü etkileri olduğunu belirten düşünürler, teknoloji kullanırken dikkatli olunması gerektiğini ve tahmin edilemez sonuçlar doğurabileceğini vurgulamaktadır. Enerji krizinin çözümü için nükleer enerjinin önemli bir alternatif olduğu fakat temelde çözümün risklerinin de göz önünde bulundurulması gerektiği ifade edilmektedir. Devletler ve firmalar, rekabet avantajı elde etmek amacıyla stratejik gelişmeler sağlamak istemektedirler. Teknolojinin hızla ilerlemesi ve tüketim alışkanlıklarının değişmesi, yalnızca üretim yapmanın yetersiz olduğunu ortaya koymuştur. Üretim hızının artırılması ve ürün çeşitliliğinin çoğaltılması gerekliliği ön plana çıkmıştır. Ürünlerin en kısa sürede paketlenip dağıtılması, bu süreçlerde ise kaynak ve iş gücü maliyetlerinin en alt düzeyde tutulması gerekmektedir (Ertuğrul ve Deniz, 2018).

Üçüncü sanayi devrimi sonrasında iletişim, ulaşım ve bilgi teknolojilerindeki ilerlemeler ve sanayinin Batı'dan Uzak Doğu'ya yönelmesi Avrupa'daki sanayi gücünün zayıflamasına yol açarken Uzak Doğu ülkelerinde ise güçlenme görülmüştür. Doğu Avrupa ve Almanya sanayide ilerlemeye devam etmiş, diğer Avrupa ülkelerinin

sanayileşme süreçleri ise azalmıştır. Sonuç olarak, Endüstri 4.0 kavramı, sanayi üretimine bilgi ve iletişim teknolojilerinin entegrasyonu ile ülkelerdeki üretim sektörlerinin rekabet gücünü artırmaya yönelik olarak bilim insanları, sanayi kuruluşları ve devletler tarafından şekillendirilmiştir (Akben ve Avşar, 2018).

Endüstri 4.0 teknolojisi, tüm çevreler tarafından bir devrim olarak kabul edilmemektedir. Bazı uzmanlar, bu gelişmenin önceki sanayi devrimlerinin bir devamı olduğunu savunsa da, bu yeniliklerin gerçekte yeni bir devrim olduğunu savunanlar, bunun üç temel nedenini açıklamaktadır (Girgin ve Yılmaz, 2022);

Hız: Önceki sanayi devrimlerinden farklı olarak, Endüstri 4.0'la yaşanan dönüşüm doğrusal bir hızla değil, çok daha hızlı bir şekilde gelişmektedir. Söz konusu hız, çok sayıda etkenin birleşmesiyle mümkün olmakta ve daha ileri düzeydeki teknolojilere olan açıklığı yansıtmaktadır.

Kapsam ve Derinlik: Son devrim, dijital teknolojilerin üzerine inşa edilen bir yenilikler bütünüdür. Hem ekonomik, hem iş dünyasında, hem de toplumsal düzeyde değerler sistemini değiştiren, birbirinden farklı teknolojilerin bir araya geldiği bir süreçtir. Endüstri 4.0, "ne", "nasıl" ve "biz kimiz" gibi temel soruları yeniden şekillendirmektedir.

Sistemsel Etki: Bu devrim, yalnızca bireysel düzeyde değil, ülkeler, şirketler, sektörler ve toplumlar arasında tüm sistemi etkileyen bir dönüşüm sürecini ifade etmektedir. Nesnelerin interneti (IoT) ile Endüstri 4.0, karanlık üretim süreçlerinin gerçekleştiği akıllı fabrikalarda üretilen, birbirleriyle iletişim kurabilen ürünleri kapsamaktadır. Endüstri 4.0 sadece entegre makinelerle ilgili değildir; daha geniş bir kapsamı vardır. Genetik mühendislikten nanoteknolojiye, yenilenebilir enerjilerden kuantum bilişime kadar pek çok alan bir arada gelişmektedir. Endüstri 4.0'ı diğer devrimlerden ayıran en önemli özelliği, fiziksel, biyolojik ve dijital alanların birbirleriyle etkileşim halinde olmasıdır.

Endüstri 4.0, önceki devrimleri ve gelişmeleri bünyesinde barındırarak, bugünün teknolojileriyle sürekli bir etkileşim içinde olan bir süreçtir. Bu özellik, onun bir devrim olmadığı görüşlerini geçersiz kılmaktadır. Endüstri 4.0, büyük üretim yapan firmalar için, çevrelerini algılayabilen, uzaktan izlenebilen robotların ağlar aracılığıyla iletişim kurabilmesini mümkün kılmaktadır. Küçük ölçekli üretim yapan firmalar ise, tek bir işle sınırlı kalmayan, çok yönlü akıllı makinelerle farklı üretim hacimlerinde çalışabilecek cihazlar geliştireceklerdir. Endüstri 4.0'ın temel özellikleri, sensörler, veri, bilgi ve işlem

olmak üzere dört ana unsurda toplanmaktadır. Bu unsurların birleşmesiyle, niteliksiz iş gücü büyük ölçüde ortadan kalkacak, sürekli ve hatasız işlemler mümkün hale gelecektir. Endüstri 4.0'ın temelleri, 1990'ların başında internetin ve teknolojinin hızlı gelişmesi ile atılmıştır. Gelişmekte olan ülkelerde nüfus artışı, üretim maliyetlerinin artması ve rekabet seviyelerinin düşmesi, gelişmiş ülkeleri bu yeni devrim için harekete geçmeye zorlamıştır (Asar ve Esen, 2021).

Avrupa'da ekonomik büyümenin üretim açısından önemli bir kısmını endüstriyel faaliyetler oluşturmaktadır. Doğu Avrupa ve Almanya gibi bazı bölgelerde endüstri büyüme göstermeye devam ederken, Batı Avrupa'daki bazı ülkeler son 30 yıl içinde sanayi pazarındaki paylarını kaybetmişlerdir. Bir diğer önemli faktör, gelişmekte olan ülkelerdeki düşük iş gücü maliyetlerinin, gelişmiş ülkelerle rekabet edebilecek düzeye gelmesini sağlamasıdır. Çin, Hindistan ve diğer bazı gelişmekte olan ülkeler, düşük üretim maliyetleri ve genç iş gücü ile bu rekabette güçlü bir konum elde etmeye başlamışlardır. Almanya'nın Endüstri 4.0'a geçişte temel hedeflerinden biri, yüksek rekabet gücünü artırmak, esnek üretim ve yenilikçi iş modelleri ile küresel pazarda güçlü bir konum elde etmektir. Almanya, bu dönüşüm için her yıl büyük bir bütçe ayırarak, sanayi altyapısını güçlendirmeyi hedeflemektedir (Ayboğa ve Görmüş, 2022: 87). Endüstri 4.0 kapsamında en yaygın kullanılan ve araştırmaya konu olan bileşenler aşağıda belirtilmiştir:

2.1.1.1. Akıllı fabrikalar

Endüstri 4.0'ın önemli unsurlarından biri olan Akıllı Fabrikalar, geleneksel üretim süreçlerinin yerine, yenilikçi ve akıllı üretim sistemlerinin kullanıldığı dinamik tesislerdir. Bu fabrikalar, Endüstri 4.0'ın tüm bileşenlerini içeren ve bu bileşenleri entegre ederek üretim faaliyetlerini gerçekleştiren işletmelerdir. Teknolojinin ilerlemesi ile birlikte sensörlerin gelişimi, veri iletim sistemlerinin ve bilgisayar ağlarının evrimi, sektörün yüksek teknolojili çözümleri benimsemesine yol açmıştır (Alçın, 2016: 21).

Endüstri 4.0'ın öncüsü Almanya'nın Kaiserslautern şehrinde 2005 yılında kurulan Yapay Zeka Araştırma Merkezi, Avrupa'daki ilk akıllı fabrika teşhir alanı olan Smart Factory KL'yi faaliyete geçirmiştir. Bu fabrika, modern teknolojik altyapıya sahip olup, Ar-Ge çalışmaları ve teknoloji transferleri için önemli bir merkez olma işlevi görmektedir (T.C. Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2018). Global endüstriyel firmalar, geleneksel üretim metotlarıyla küresel rekabette yeterli başarıyı sağlayamayacaklarını fark etmişlerdir. Bu durum, tüm üretim sisteminin yeniden yapılandırılması ve bütüncül

çözümler geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Modern teknolojilerin sunduğu yenilikler, üretim süreçlerinin entegrasyonunu sağlayarak Endüstri 4.0 devrimini başlatmıştır (Güner, 2018).

Büyük veri, robot teknolojileri ve nesnelerin interneti gibi bileşenler sayesinde, bu yeni endüstriyel kavramlar üretim süreçlerine dâhil edilmekte ve akıllı fabrikalar şekillenmektedir. Maliyet avantajları, tüketici taleplerine hızlı yanıt verme ve kişiselleştirilmiş üretim gibi faktörler, firmaları akıllı fabrika sistemlerine geçiş yapmaya zorlamaktadır. Endüstri 4.0'ın getirdiği yenilikler, tedarikçilerden elde edilen verilerin hızlı bir şekilde işlenmesini ve robot teknolojilerinin yardımıyla ürünlerin daha hızlı üretilmesini sağlamaktadır. Gelişmiş sensörler ve otonom robotlar, aynı üretim hattında farklı ürünlerin üretilmesine imkân tanıyacak şekilde tasarlanmıştır (Bulut ve Akçacı, 2017).

Akıllı fabrikalar, Endüstri 4.0 devriminde kritik bir rol oynamaktadır. Geleneksel üretim yöntemlerinden farklı olarak, akıllı fabrikalar karmaşık piyasa taleplerine ve müşteri ihtiyaçlarına hızlı çözüm sunabilmektedir. Bu fabrikalar, üretim süreçlerinin karmaşıklığını yönetebilmekte ve verimliliği artırabilmektedir. Akıllı fabrika ortamları, iç iletişimi sağlayan ağlar üzerinden işleyen, insan kaynakları, makineler ve akıllı ürünler gibi unsurlar arasındaki bağlantılarla şekillenir. Akıllı fabrikalar, entegrasyon, dijitalleşme ve esnek yapıların birleşiminden oluşur. Endüstri 4.0'ın sunduğu üretim çözümleri, esnek süreçlerin performansını iyileştirirken, gerçek zamanlı iletişimle üretim kaynakları arasındaki koordinasyonu sağlar. Bu tür fabrikalar, karmaşık pazar gereksinimlerini karşılamak için yüksek üretim verimliliği sunmaktadır (Nunes vd., 2017; Sözen ve Mescioğlu, 2019).

Akıllı fabrikalarda, Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Siber Fiziksel Sistemler (CPS) kavramlarını içeren akıllı cihazlar kullanılmaktadır. Bu cihazlar, yerleşik işlemci, veri depolama, iletişim teknolojileri, sensörler ve aktüatörler ile donatılmıştır. Akıllı ürünler, kendi durumlarını, geçmişlerini ve gelecek süreçlerini tanımlama yeteneğine sahiptir. Bu özellikler sayesinde, akıllı fabrikalarda daha esnek ve özelleştirilmiş üretim gerçekleştirilebilmektedir (Mehami vd., 2018).

Akıllı fabrikalar, sensörler aracılığıyla üretim süreçlerini algılar, internet üzerinden diğer üretim elemanlarıyla iletişim kurar ve büyük veriden alınan bilgilerle akıllı makineler ve sistemler sayesinde verimli üretim sağlar. Endüstri 4.0'ın en dikkat çeken yönlerinden biri, insan faktörünün azaltıldığı ve insansız üretimin gerçekleştirildiği

"Karanlık Fabrika"lardır. Bu tür fabrikalarda, robotların üretimde kullanılması işçi sayısını %90 oranında azaltırken, üretim hatası oranını %25'ten %5'e düşürmüştür (Yıldız, 2018).

Geleceğin fabrikalarının, otomatik bilgi alışverişi yapmakla kalmayarak makine bakımını yapabilmesi, üretim süreçlerini denetleyebilmesi ve fabrika sistemini yönetecek kadar akıllı hale geleceği öngörülmektedir. Ürün tasarımından üretim planlamaya kadar birçok sürecin simülasyonu yapılacak, üretim mühendisliği ve hizmet süreçleri de bu sistemlerle entegre edilecektir. Akıllı fabrikaların üç ana bileşeni bulunmaktadır: Birincisi, fabrikanın iç sistemlerini, bilgisayarları, makineleri ve cihazları birbirine entegre eden dikey entegrasyondur. İkincisi, fabrika dışındaki tedarikçilerle ve endüstriyel internet ağlarıyla entegrasyon sağlanmasıdır. Üçüncüsü ise, fabrikanın mevcut süreçlerinin dijital mühendislik sistemleriyle entegrasyonudur (Jian vd., 2016: 174; Banger, 2018; Yıldırım, 2020).

Akıllı fabrikaların sağladığı pek çok avantaj vardır. İş gücü maliyetlerinin düşmesi, personel devamsızlığının azalması, işletme giderlerinin düşmesi ve çevresel etkilerin azalması gibi çeşitli olumlu etkiler, akıllı fabrikaların işletmelere sunduğu faydalardır (Fırat ve Fırat, 2017). Endüstri 4.0 ile birlikte akıllı üretim ekonomisi kavramı da ortaya çıkmıştır. Yeni nesil teknolojilere adapte olmak isteyen firmalar, operasyon süreçlerinde otonom robotları, pazarlama ve satış faaliyetlerinde yapay zeka teknolojilerini kullanarak ve IoT teknolojisi ile bilgi akışını sağlayarak lider firma olma yolunda önemli adımlar atacaktlardır. Bu dönüşüm için gerekli olan kalifiye iş gücü, tasarım, yazılım geliştirme ve uygulama alanlarında uzmanlaşmış profesyonelleri gerektirecektir (Suman, 2018).

Sonuç itibariyle Endüstri 4.0 sürecinde akıllı fabrikalar, üretim hatlarının ve süreçlerinin verimli, esnek, sürdürülebilir hale getirilmesi için gerçek zamanlı ve analize dayanan kararlar almaktadır. Akıllı fabrikaların, Endüstri 4.0 sürecinde her bir birleşene entegre şekilde çalışarak üretim süreçlerini optimize etme rolü bulunmaktadır.

2.1.1.2. Nesnelerin interneti (IoT)

Endüstri 4.0'ın önemli unsurlarından biri olan Nesnelerin İnterneti (IoT) ilk kez 1999 yılında Kevin Ashton tarafından tanımlanmıştır. IoT, üretim süreçlerinde akıllı sensörlerin kullanılmasıyla, fabrikaların üretim aşamalarında ortaya çıkan verilerin anlık bir şekilde analiz edilmesini mümkün kılmaktadır. Bu teknoloji sayesinde makineler,

birbirleriyle iletişim kurarak kablosuz ağlar üzerinden topladıkları verileri bulut tabanlı sistemlere aktarabilirler. Bu da üretim süreçlerini daha verimli ve modern hale getirecek, makinelerin daha gelişmiş özelliklerle donatılmasına olanak sağlayarak mevcut üretim süreçlerinin yeniden şekillendirilmesine yol açacaktır (Öztuna, 2017).

Nesnelerin İnterneti, endüstriyel işletmelerde farklı birimlerden elde edilen verilerin bulut tabanlı sistemlerde birleştirilip yönetilmesini sağlar. Bu sayede, üretim süreçlerinde hızla yönetilen veriler, daha iyi ve hızlı kararlar alınmasına olanak tanır. Büyük veri teknolojisi kullanılarak elde edilen bilgiler, Siber Fiziksel Sistemler (CPS) ile entegre edilerek süreçlere dahil edilir. Bu da üretim süreçlerinin daha etkin bir şekilde yönetilmesini sağlar (Alçın, 2016).

2013 yılında internet teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte, sosyal medya, sosyal ağlar ve Web 2.0 gibi yenilikler, Nesnelerin İnterneti ile üretim süreçlerine entegre olmuştur. Bunun sonucunda, daha önce yalnızca sosyal yaşamda kullanılan internet teknolojileri, üretim süreçlerine de dahil olmuştur (Bartodziej, 2017). Teknolojik gelişmelerin, özellikle donanım maliyetlerinin düşmesinin bir sonucu olarak, artık tüm fiziksel nesnelere internete bağlanabilir hale gelmektedir. Akıllı sensörler ve cihazlar, daha erişilebilir fiyatlarla piyasa rekabetiyle temin edilebilmektedir. Bu da tüm fiziksel nesnelerin internete bağlanabilir ve akıllı hale gelmesini mümkün kılmakta, veri odaklı yeni hizmetlerin ortaya çıkmasını sağlamaktadır (Schwab, 2016).

Nesnelerin İnterneti, sağlık, akıllı evler, akıllı şehirler, enerji üretimi, tarım, lojistik, ulaşım gibi pek çok alanda etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Bu alanlarda toplanan veriler bulut tabanlı sistemlere aktarılır ve büyük veri analizi yapılır. Bu analizler, verimliliği artırmak ve süreçlerdeki optimizasyonu sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Üretim süreçlerinde her şeyin RFID sistemleri, sensörler ve mobil cihazlar gibi iletişim araçlarıyla entegre olabilmesi, ortak bir üretim hedefinin gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır (Hermann vd., 2016; Gökrem ve Bozuklu, 2016).

Kablosuz iletişimdeki hızlı gelişmeler, Endüstriyel IoT sektörüne daha fazla ilgi duymaya yol açmıştır. IoT sistemleri, yüksek veri toplama kapasitesine sahip olmaları nedeniyle verimlilik, kalite ve güvenlik gibi alanlarda iyileştirmelere olanak tanımaktadır. Elde edilen veriler, üretim süreçlerinin her aşamasında maksimum verimliliği sağlamak amacıyla analiz edilmekte ve optimize edilmektedir. Buna karşın bu verilerin toplanmasının da bazı maliyetleri bulunmaktadır. Bu maliyetler, sensörler ve edge

cihazlarının kullanımının yanı sıra, verilerin sisteme aktarılmasındaki maliyetleri de kapsamaktadır. Bu maliyetlerin minimize edilmesi için doğru kablosuz teknolojilerin seçilmesi, verimli bir şekilde kullanılmaları ve ölçümlerin online olarak yapılması gerekmektedir. Bu sayede, hem maliyetler düşer hem de zamandan tasarruf sağlanabilir (Türkel ve Yeşilkuş, 2020).

Nesnelerin İnterneti 'nin üretim sektöründe yaygınlık kazanması, üretim anlayışının sürekli değişmesine neden olmaktadır. Çip teknolojisi de bu değişimde önemli bir rol oynamaktadır. Çiplerin boyutunun küçülmesi ve fiyatlarının düşmesi, nesnelerin takibini kolaylaştırmakta ve sensörler sayesinde üretim süreçlerine entegre edilen her şeyin birbirine bağlanması sağlanmaktadır. Uzmanlar, gelecekte tüm fiziksel nesnelerin her ortamda iletişim ağlarına bağlanabileceğini ve sensörlerin, çevreyi daha doğru bir şekilde algılama imkânı sunabileceğini öngörmektedirler (Schwab, 2016).

Bu teknolojinin olumlu etkileri arasında kaynak kullanımında verimlilik artışı, üretkenlik artışı, yaşam kalitesinin iyileşmesi ve çevreye olan olumlu etkiler sayılabilir. Hizmet sunumunda maliyet azalması, kaynakların kullanımına dair daha fazla şeffaflık ve güvenlik alanlarında gelişmeler de sağlanmaktadır. Verimlilik artışı ve depolama taleplerindeki artış ile işgücü piyasasında değişimler ve yeni iş olanakları yaratılmaktadır. Nesnelerin İnterneti, dijital olarak bağlanabilir ürünlerin tasarımına olanak tanırken, dijital ikizlerin iş süreçlerinde daha aktif bir rol almasına da yardımcı olmaktadır. Ayrıca nesnelere çevrelerini daha doğru bir şekilde algılayıp, özerk olarak tepki verebilecek hale gelmektedir. Bununla birlikte, Nesnelerin İnterneti 'nin olumsuz etkileri arasında mahremiyetin azalması, düşük becerili iş gücü için iş kayıpları ve güvenlik tehditleri bulunmaktadır. Artan karmaşıklık ve kontrol kaybı da olumsuz sonuçlar yaratabilir (Kamber, 2019).

Fiziksel cihazların internet aracılığıyla iletişim kurmasını ve veri paylaşmasını sağlayan nesnelerin interneti, Endüstri 4.0 sürecinde üretimin dijitalleşmesinin temelini oluşturmaktadır. Nesnelerin interneti sayesinde üretim makineleri ve ekipmanları birbirine bağlanarak makineler arası iletişimin hızlanması ve sürecin yönetiminin etkili hale gelmesi mümkündür.

2.1.1.3. Siber-Fiziksel sistemler

"Akıllı Motor" olarak adlandırılan ilk bilgisayar, 1837 yılında Charles Babbage tarafından Cambridge Üniversitesi'nde geliştirilmiştir ve o zamanlar teknolojinin

bugünkü seviyeye ulaşacağı pek tahmin edilemezdi. Günümüzde "*Siber Güvenlik*" ve "*Siber Saldırı*" terimlerinin sıkça gündeme gelmesi, dijital ortamın her geçen gün daha tehlikeli hale geldiğini gösteriyor (Yılmaz ve Sağıroğlu, 2013).

Bilgi ve İletişim Teknolojilerinin (BİT) hızla yayılması, hem kamu hem de özel sektördeki kurum ve kuruluşların tüm verilerini dijital ortamda saklama gerekliliğini doğurmuş ve buna bağlı olarak Bilgi ve İletişim Teknolojilerinin olan bağımlılık artmıştır. Bu gelişmeler neticesinde insanların yaşam standartları iyileşmiş fakat siber güvenlik tehditleri gibi bazı olumsuzluklarla da karşılaşmaktadır (Öztuna, 2017).

Endüstri 4.0'ın önemli bileşenlerinden biri olan Siber Fiziksel Sistemler, gerçek dünya ile sanal dünya arasındaki etkileşimi sağlayan ve fiziksel dünyadan aldığı verileri internet üzerinden toplayarak bu verileri sanal ortamda işleyen sistemlerdir. Ulusal Bilim Vakfı (The National Science Foundation), Siber Fiziksel Sistemleri, üretim süreçlerinde hesaplama ve iletişim bileşenlerinin entegrasyonu ile yönetilen sistemler olarak tanımlamaktadır. Bu sistemler, fiziksel makinelerin daha akıllı hale gelmesi için sanal ortamlarla entegrasyonunu sağlar ve nano teknoloji alanında yeni fırsatlar sunar (EBSO, 2017). 1940'larda siber kavramı, bilgisayarlar, bilgi teknolojileri ve internet tabanlı süreçleri tanımlamak için kullanılmıştır. CPS terimi ise ilk kez 2006 yılında ABD'de Lee tarafından ortaya atılmıştır (Alçın, 2016).

2015'te Bradley ve Atkins, Siber Fiziksel Sistemlerin (CPS) tarihsel gelişimini detaylı bir şekilde incelemiş ve bu sürecin evrimini bir tabloyla sunmuşlardır. Siber Fiziksel Sistemlerden söz ederken, siber ve fiziksel unsurların farklı açılardan ele alınması gerekir. Siber güvenlik ile ilgili en önemli faktörlerden biri bilgi güvenliğidir. Bu bağlamda, bir siber ortamın güvenli kabul edilebilmesi için, bilginin gizliliği, bütünlüğü ve erişilebilirliği sağlanmalıdır (Aslay, 2017).

Sanayi üretim süreçlerinde, sistemlerin sürekli çalışabilirlikleri ve her zaman kullanılabilir durumda olmaları kritik öneme sahiptir. Dolayısıyla, siber fiziksel üretim sistemlerinin hizmet erişimini engelleme gibi siber saldırılara karşı korunması gerekmektedir. Hem üretimin sürekliliği hem de işletme ve müşteri bilgileri gibi özel verilerin korunması için güçlü siber güvenlik önlemleri almak şarttır. Bu durum, potansiyel zararlara ve olumsuz sonuçlara yol açabilecek siber tehditlerin etkili bir şekilde korunması gerektiğini ortaya koymaktadır (Banger, 2018).

Gelecekte siber güvenlik üzerinde en fazla etki yaratacak faktörlerden ikisi, insanların ve teknolojinin giderek daha fazla birbirine entegre olmasıdır. Siber dünyanın sunduğu avantajların artması, beraberinde yeni güvenlik sorunları yaratmakta; bu da siber tehditler, siber terörizm, siber savaş, siber suçlar ve siber çeteler gibi yeni kavramların doğmasına sebep olmuştur (Bıçakçı, 2014: 110). Siber güvenlikte dikkat edilmesi gereken unsurlardan biri de siber tehditlerdir. Siber tehdit, bilgi teknolojilerini kullanarak geleneksel suçların sanal ortama uyarlanmış halidir (Ünver vd., 2009). Siber tehditler altı ana gruba ayrılmaktadır;

- Hizmetlerin engellenmesi
- Kötü niyetli kullanım
- Veri engellenmesi
- Yemleme
- İstenmeyen e-posta
- Ağ trafiğinin dinlenmesi.

2004'te Avrupa Konseyi, Avrupa Siber Suç Sözleşmesi'ni kabul etmiş ve bu sözleşme kapsamında beş ana siber suç tanımlanmıştır (Şentürk vd., 2013);

- Yetkisiz erişim
- Yetkisiz müdahale
- Veri engellenmesi
- Cihazların amacına aykırı kullanımı.

Bu bağlamda siber-fiziksel sistemler, dünyadaki süreçleri dijital sistemlerle entegre etmekte, makineler ve sistemler arasında etkileşimli bir ağ kurmaktadır. Bu sistem aracılığıyla gerçek zamanlı veri toplama, analiz etme ve işlem yapma kapasitesi elde edilmektedir. Üretim sürecinde siber-fiziksel sistemler dijital bir platformda modelleyerek üretim hattındaki her bir bileşenin birbirine bağlı şekilde çalışmasını sağlamaktadır.

2.1.1.4 Büyük veri ve analitik

Endüstri 4.0 kavramı, internet tabanlı sistemler üzerine inşa edilmiştir. Binalardan makinelere, lojistikten bilgi güvenliğine, sosyal ağlara kadar tüm işlemler ve nesnelere akıllı sistemlerin etki alanına girmektedir. Endüstri 4.0 uygulamalarında yer alan her cihaz ve sistem birbirleriyle iletişim halindedir. Bu iletişim, internet aracılığıyla gerçekleşir ve bu durum büyük miktarda veri akışını beraberinde getirir. Bu verilerin işlenebilmesi için

büyük sunuculara ihtiyaç duyulmaktadır. Sunucu taleplerinin karşılanabilmesi, sistemlerin doğru bir şekilde kontrol edilmesi ve yönlendirilmesi amacıyla Büyük Veri önemli bir rol oynamaktadır (Alçın, 2016; Fırat ve Fırat, 2017).

Büyük veri, geleneksel veri işleme sistemlerinin kapasitelerini aşacak kadar büyük ve karmaşık veri kümelerini ifade etmektedir. Bu veriler, internet üzerindeki her türlü etkileşimi kapsar; bir web sitesine yapılan her ziyaret veya tıklama dahi bir veri kaydına dönüşür. İlk olarak Meta Group tarafından tanımlanan büyük veri, hız, çeşitlilik ve hacim olmak üzere üç ana bileşenden oluşur. IBM ve Oracle bu bileşenlere sırasıyla güvenilirlik ve değer kavramlarını ekleyerek büyük veriyi 5V olarak adlandırmış ve bu kavramın çerçevesini oluşturmuşlardır (Özsoylu, 2017; Baaziz ve Quoniam, 2018).

Günümüzde veriler, birçok farklı kaynaktan hızla ve ardışık bir biçimde gelmektedir. Bu yoğun veri akışı, büyük veri yönetimini daha da karmaşık hale getirmektedir. Büyük veri, kuruluşlar için büyük fırsatlar yaratabilir ve rekabet avantajı sağlayabilir. Müşterilerle etkileşimde veya yeni ürünler tasarlarken firmalar için büyük bir avantaj oluşturan bu veriler, firmaların iş süreçlerinde daha etkin olmasına olanak tanır (Fırat ve Fırat, 2017; Akben ve Avşar, 2018). Karlılığı artırmak amacıyla büyük veri kullanımı, firmaların müşterilerle daha sık etkileşimde bulunmasını sağlar ve bu durum yeni ürünler, stratejiler ve hizmetler geliştirmelerine yardımcı olur. Böylece, firmalar rekabetçi bir avantaj elde eder (Santos vd., 2017).

Büyük veri kullanımı, çeşitli sektörlerdeki uygulamalarda doğru kararların daha hızlı alınabilmesini sağlar. Otomatik karar alma süreçlerinin devreye girmesi, karmaşıklıkları azaltır ve hem firmaların hem de kamu yönetimlerinin hizmetlerini gerçek zamanlı sunmalarına olanak tanır. Müşteri etkileşimleri, veri beyanları ve ödemeler gibi işlemler daha hızlı ve kolay bir şekilde gerçekleştirilebilir. Büyük veri kullanımının riskleri de vardır. Karar alma süreçlerinde bir kaldıraç gibi işlev gören büyük veri, hem fırsatlar hem de riskler taşır. Olumlu etkiler arasında daha hızlı ve doğru karar alma, inovasyon için açık veri sağlanması, yeni iş alanlarının yaratılması ve toplumda daha fazla verimlilik yer alırken, olumsuz etkiler ise mahremiyet kaygıları, çalışma yeri kayıpları ve algoritma savaşları gibi sorunları beraberinde getirmektedir (Schwab, 2016).

Büyük veri kullanımı, kamu ve özel sektörde firmalar için büyük önem taşımaktadır. Veriler kullanılarak geleceğe yönelik tahminler yapılabilir, stratejik planlamalar ve değerlendirmeler gerçekleştirilerek olası tehditlere karşı önlem alınabilir. Büyük verinin sunduğu fırsatlar arasında maliyetlerin düşürülmesi, hızlı karar alma

yeteneği ve ürün/hizmet iyileştirmeleri yer alır. Doğru analizlerle elde edilen veriler firmaların daha doğru kararlar almasını, risklerini daha iyi yönetmesini ve yenilikçi girişimlerde bulunmasını sağlar (Aksoy vd., 2017; Özsoylu, 2017). Endüstri 4.0 kapsamında büyük verinin doğru şekilde kullanılması, firmaların rekabet avantajı elde etmelerini, verimliliklerini artırmalarını, maliyetlerini azaltmalarını ve müşteri ilişkilerini güçlendirmelerini sağlayacaktır (EBSO, 2017).

Endüstri 4.0 sürecinde yapılandırılmış ve yapılandırılmamış verilerin toplanması, analiz edilmesi ve depolanması büyük veri ve analitik sistemi sayesinde mümkün hale gelmektedir. Akıllı fabrikalar, üretim hattı sensörleri ve makineler aracılığıyla toplanan veriler üretim süreçlerini izlemek, verimliliği arttırmak, hataların tespit edilmesi ve bakım gereksinimlerini öngörülmesi amacıyla analiz edilmektedir. Büyük veri analitiği üretim süreçlerini optimize etmek ve daha verimli bir hale getirmek amacıyla karar destek sistemlerinde doğrudan rol oynamaktadır.

2.1.1.5. Yapay zeka ve robotik

Yapay zeka doğal ya da yapay sistemlerin gerçekleştirebileceği bilişsel görevlerin, yapay bir sistem aracılığıyla en yüksek verimlilikle nasıl yerine getirilebileceğini inceleyen bir bilim dalıdır (Görener ve Toker, 2020). Yapay Zeka, insanlığın geleceği açısından merkezi bir rol oynamaktadır ve günümüzde dünya çapında büyük bir ilgiyle ele alınmaktadır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte bilgisayar bilimlerinde kaydedilen ilerlemeler ve yapay zekanın evrimi, bu alanda daha geniş çaplı ve etkili çözümler üretilmesini sağlamış, bilimsel araştırmalarda aktif bir rol üstlenmiştir (İyigün, 2021; Ülgen ve Yavuz, 2021).

Akıllı teknolojilerdeki gelişmeler, tüm dünyada yeni bir dönemi başlatmıştır. Yapay zeka, Nesnelerin İnterneti (IoT), makine öğrenmesi ve otonom robotlar artık günlük yaşamda sıkça karşılaşılan ve konuşulan konulardan olmuştur. Alan Turing, 18. yüzyılın ortalarında “*Makineler düşünebilir mi?*” sorusunu gündeme getirerek bu alanda önemli bir adım atmıştır. Yapay zeka terimi ise ilk kez 1956 yılında yapılan Dartmouth Konferansında konu olarak işlenmiştir. Ünlü Türk matematikçisi Cahit Arf, 1959 yılında yayınladığı makalesinde “*Makineler nasıl düşünebilir?*” sorusunu gündeme getirmiştir. Yapay zekâyı tam anlamıyla kavrayabilmek için, onun farklı türlerini ve çeşitlerini incelemek gerekmektedir. Yapay Zeka zayıf, genel ve güçlü olmak üzere üç ana türe ayrılır (Duran, 2021).

Yapay zekanın tarihsel gelişimi incelendiğinde; farklı seviyelerde ve farklı tekniklerle ilerlemiş olduğu görülmektedir. Bu teknikler arasında yer alan bazı önemli başlıklar şunlardır (Görener ve Toker, 2020);

- Uzman Sistemler
- Yapay Sinir Ağları
- Bulanık Sistemler
- Genetik Algoritmalar
- Makine Öğrenmesi
- Robotik ve Hibrit Sistemler

Günümüzde, akıllı asistanlar, otonom araçlar, tedavi süreçlerinde kullanılan robotlar ve daha verimli üretim sağlayan yazılımlar, Yapay Zeka'nın en bilinen uygulamalarıdır. Dijitalleşmenin hızla yayıldığı dönem içerisinde, Yapay Zeka teknolojileri, insanların karar verme süreçlerini etkilemeye başlamış ve bu alanda insanların yerine geçebilecek yazılımlar ve algoritmalar ortaya çıkmıştır (Can, 2017).

Yapay zekanın geleceği hakkında yapılan tahminlere göre, yapay zeka robotlar ve makineler üzerinde karar verme ve iletişim kurma gibi insanlara özgü özellikleri yerine getirme yeteneğine sahip olacak şekilde gelişecektir. Bir diğer öngörü ise yapay zeka kendi aralarında iletişim kurabilen bir yapıya bürünecek olmalarıdır (Öztuna, 2017).

Yapay zeka sistemlerinin gelecekte insan kapasitesini aşarak, küresel karbon salınımını veya dünya çapındaki hava trafiğini yönetmek gibi karmaşık görevleri üstleneceği belirtilmektedir. Çek yazar Karel Čapek, 1921 yılında kaleme aldığı *Rossum's Universal Robots* adlı oyununda, "hizmetçi" anlamına gelen "robot" terimini kullanarak robot kelimesini ilk kez dile getirmiştir. Robotlar, insanların sahip olduğu yemek yeme, yorulma gibi biyolojik ihtiyaçlardan ve mutlu veya mutsuz olma gibi duygusal halleri yaşamaktan yoksun olduklarından, uzun süreler boyunca kesintisiz çalışabilmektedirler. Bu özellikleri sayesinde robotlar, iş gücü maliyetlerini ortadan kaldırarak önemli ekonomik avantajlar sağlamaktadırlar (Duman, 2020).

Robotlar, "önceden belirlenmiş görevleri yerine getiren elektro-mekanik cihazlar" olarak tanımlanır. Çoğu zaman, bir operatör veya bilgisayar programları aracılığıyla çalıştırılırlar. Endüstriyel üretim alanında, özellikle otomotiv sektöründe robotların kullanımı oldukça yaygındır (EBSO, 2017; Yiğit, 2024). Robotlar, bilgisayar destekli yazılımlar ile programlanabilen, karmaşık görevleri yerine getirebilen

makinelere dir. Akıllı robotlar, diğ er makinelerle ve ç evreleriyle etkileş im e girerek iletiş im kurma yeteneğ ine sahip cihazlardır (Banger, 2018; Kestane, 2021).

Otonom robotlar, görevlerini yerine getirirken dış arıdan mü dahale gerektirmeyen, kendi baş larına karar alabilen ve bu kararları uygulayabilen cihazlardır. Bu tür robotlar, aynı zamanda ö ğ renen robotlar olarak da adlandırılmaktadır. Otonom robotlar, ç evrelerinden veri toplama, bu verileri işleme, ağ uzerinden iletme ve elde ettikleri bilgilerle kararlar alma yeteneğ ine sahiptirler. Bu robotlar, herhangi bir operatör mü dahalesine ihtiyaç duymadan uzun süreler boyunca ç alış abilirler ve insanlara veya kendilerine zarar vermemek için tasarlanmışlardır. Kendilerine verilen görevleri ne kadar sürede tamamlayacaklarını hesaplama ve bu görevleri tamamlama becerisi gösterirler (Özdem ve Bora, 2022).

Endüstri 4.0 ilk kez 2011 yılında Hannover Fuarı'nda Nesnelerin İnterneti (IoT) kavramı ile tanıtılmıştır. Başlangıçta dijital olarak iletiş im kurabilen makineler ve fabrikalar ön plana çıkmışken, zamanla insanlarla birlikte ç alış abilen iş birlikçi robotlar daha çok dikkat çekmeye başlamıştır (Türedi ve Bircan, 2016). Türkçeye "*kolaboratif robot*" olarak ç evrilen ve İngilizce "collaboration" kelimesinden türetilen bu robotlar, üretim hatlarında insanlarla birlikte ç alış an ve hatasız bir şekilde görevlerini yerine getirebilen cihazlardır. Kobotlar, üretim süreçlerinin daha esnek ve verimli hale gelmesine önemli katkı sağlamaktadır. Türkiye'de Endüstri 4.0 teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte, kobotlar ve robot teknolojilerinin üretimdeki rolünün artması beklenmektedir. İnsan-robot iş birliğinin sağladığı avantaj, üretim kalitesinin artmasına ve üretim hacminin güvenli şekilde genişlemesine olanak tanıyacaktır. İnsanlar, üretim sürecini planlarken, robotlar bu plan doğrultusunda fiziksel görevleri yerine getireceklerdir (Erdoğan ve Feyzullahoğ lu, 2020).

Robotların üretim alanındaki kullanımı, 1960'lı yıllara kadar uzanır. General Motors, 1961 yılında *Ultimate* adını verdikleri robotlarını baskı işlemlerinde kullanmıştır. Robot teknolojisi sürekli olarak gelişmekte olup, özellikle endüstriyel robot kollarının kullanımı yaygınlaş mıştır. Bu gelişmeler, üretimde hız, doğruluk ve kullanım kolaylığı sağlayarak endüstriyel süreçlerin etkinliğini artırmaktadır. Robotlar, üretim ve montaj hatlarında önemli kolaylıklar sağlamaktadır (Özsoylu, 2017; Kamber, 2019).

Günümüzde robotlar, hemen hemen tüm endüstrilerde aktif olarak kullanılmaktadır. Robot teknolojisindeki ilerlemeler, makineler ile insanlar arasında günlük etkileşimlerin kurulmasına zemin hazırlamaktadır. Teknolojinin diğ er

alanlarındaki gelişmeler, robotların daha uyumlu ve esnek hale gelmesini sağlamaktadır. Sensör teknolojilerindeki ilerlemeler, robotların çevrelerini daha iyi algılamalarına ve buna uygun tepki vermelerine olanak tanımaktadır. Eskiden manuel olarak programlanan robotlar, artık bulut teknolojisi sayesinde uzaktan veri alabilir ve diğer robotlarla ağ bağlantısı kurarak daha esnek bir şekilde çalışabilirler (Schwab, 2016; Yıldırım, 2019).

Robot teknolojisindeki bu ilerlemeler, üretim süreçlerinde esneklik sağlayacak ve akıllı üretim sistemlerinin kullanımını daha yaygın hale getirecektir. Endüstriyel robotların gelişimi, robotların çalışma ortamlarına daha kolay uyum sağlamalarına, daha basit endüstriyel gereksinimleri karşılayacak şekilde boyutlarının çeşitlenmesine ve daha uygun fiyatlarla piyasaya sürülmesine olanak tanıyacaktır. İnsanların fiziksel ve psikolojik yapılarının bir sonucu olarak üretim sırasında hata yapma olasılığı yüksektir. Dolayısıyla, robotlar üretim süreçlerine dahil olduklarında, robot kaynaklı hata olasılığı ortadan kalkmaktadır. Hatalar daha çok teknik arızalar ya da sistemsel sorunlar sonucu meydana gelir ve bu hatalar nesnel nedenlere dayanır. Akıllı robotların yaygınlaşması, üretim hatlarında insan kaynaklı hataları minimize ederken, hata oranlarını büyük ölçüde sıfıra indirecektir. Robotların öğrenme yetenekleri sayesinde otomasyon sistemlerinin etkinliği artacak ve bu da üretim süreçlerini daha verimli hale getirecektir (Görçün, 2017; Özsoylu, 2017).

Robotik süreç otomasyonu, belirli işlemleri tanımlayarak, bunları yerine getiren yazılımların kullanılmasıdır. Zira, bir kişinin gelen e-postada bulunan numarayı alıp bilgisayarındaki bir dosyaya ekleyip, ardından o dosyayı ilgili kişiye e-posta ile gönderme görevini yerine getiren bir sistemdir (Say, 2021b).

Sanayi alanında kullanılan ve her geçen gün daha fazla yaygınlaşan robot teknolojisi, sağlık, taşımacılık ve üretim gibi çeşitli sektörlerde önemli faydalar sağlamaktadır. Özellikle üretim hatlarında yer alan ve programlanabilen sanayi robotları iki, bazen üç ya da daha fazla eksenle hareket edebilmekte ve Endüstri 4.0 ile birlikte daha da yaygınlaşarak kullanımlarına devam edilmektedir. Bu robotlar, her geçen gün daha gelişmiş yazılımlar sayesinde daha akıllı hale gelmektedirler. Sanayi robotları, hassasiyet, hız, dayanıklılık ve eksen sayısı gibi özellikler bakımından dikkatlice seçilerek üretimin farklı aşamalarında kullanılmaktadır (Özdoğan, 2018).

Sanayide robot kullanımının tarihi 1960'lı yılların başlarına kadar gitmektedir. İlk olarak, General Motors 'ta baskı işlemlerini yapan "*ultimate*" adlı robotlar, insan kontrolüne dayalı çalışıyordu. Teknolojinin hızlı gelişimiyle birlikte robotlar kısa sürede

daha olgun bir hale gelmiş ve özellikle robot kolları, endüstriyel üretimin ihtiyaçlarını karşılayacak seviyeye ulaşmıştır. 2008 yılında dünya çapında 1 milyon olan sanayi robotlarının sayısı, 2016'da %76,6 artarak 1,8 milyona ulaşmış ve 2020 yılı itibariyle 3 milyona yaklaşmıştır. 2017-2020 yılları arasında Amerika'da yıllık robot üretim artışı %12, Avrupa'da ise %7 olarak gerçekleşmiştir (Kılıç ve Alkan, 2018; Say, 2021a).

Üretimden tarıma, perakendecilikten hizmet sektörlerine kadar geniş bir yelpazede robotların kullanımı, tedarik zincirinde ve lojistikte önemli faydalar sağlamaktadır. Robotların kullanılması ile işçilere daha fazla dinlenme süresi sunulmakta, malzeme temini kolaylaşmakta ve bazı ülkelerdeki iş gücünün robotlarla ikame edilmesi sonucu üretimin ana merkezlere geri dönmesi mümkün olmaktadır. Bununla birlikte, robotların kullanımı çalışma alanlarında daralma, sorumluluk ve hesap verme yükümlülüklerinin ortadan kalkması, sosyal normların değişmesi ve siber saldırılar gibi olumsuz yanlar da doğurmaktadır (Schwab, 2016).

Sonuç olarak yapay zeka üretim hatlarında kalite kontrolü, hata tespiti, talep öngörüsü ve bakım planlaması gibi alanlarda kullanılmaktadır. Yapay zekanın en önemli katkılarından biri üretim sürecini sürekli olarak izlemesi ve optimizasyon önerileri sunarak verimliliği artırma çabalarıdır. Benzer şekilde robotik teknolojiler Endüstri 4.0 sürecinde üretim sürecini otomatik hale getirmektedir. İş gücünün yerine geçen robotlar tekrarlayan görevleri hızlı ve hatasız şekilde tamamlamaktadır. Bu süreçte robotik sistemler, yapay zeka ile entegre olmakta kendi kendine optimize eden üretim sürecini desteklemektedir.

2.1.1.6. Eklemeli imalat (3D baskı)

3D baskı veya eklemeli üretim, dijital ortamda bir nesnenin üç boyutlu olarak tasarlanıp, tabakalar halinde basılarak nihai ürün haline getirilmesidir. Bu süreç, bir ekmeğin dilim dilim yapılması gibi, bir nesnenin adım adım inşa edilmesi gibidir. 3D yazıcılar, basit yapılarla bile son derece karmaşık ürünlerin elde edilmesine olanak tanır. Plastik, alüminyum, paslanmaz çelik, seramik gibi çeşitli malzemelerle çalışabilen bu yazıcılar, daha önce yalnızca büyük fabrikalarda üretilen ürünlerin, bağımsız bir ortamda daha küçük ölçekte üretilmesini mümkün kılar. Bu, üretim süreçlerini daha erişilebilir ve esnek hale getirir (Özer, 2020).

3D teknolojisinin kullanımının en önemli avantajlarından biri, üretim aşamalarının kişiselleştirilmesini sağlamasıdır. 3D yazıcılar, kişisel fikirlerin doğrudan

tasarıma dönüşmesine olanak verir ve sınırsız tasarım olanağı sunar. Nesnelerin interneti ile entegrasyonu sayesinde bireyler yalnızca tüketici değil, aynı zamanda üretici de olabilirler. Bu teknolojinin sunduğu açık kaynak yazılımlar sayesinde, kişisel ihtiyaçlara yönelik özel tasarımlar yapılabilir ve bu ürünler başkalarına satılabilir. Geleneksel üretim yöntemlerinde kullanılan malzemenin yalnızca %10'u ile üretim yapılabilirken, 3D baskı hem malzeme hem de iş gücü tasarrufu sağlar. Küçük ve orta ölçekli işletmeler, 3D teknolojilerini kullanarak daha gelişmiş ve yenilikçi ürünler tasarlayabilir ve üretebilirler (Sürmen, 2019).

3D yazıcı teknolojisinin geçmişi, 1914 yılına kadar uzanır, Buna karşın bu teknoloji, hızlı prototipleme dışında uzun yıllar pek rağbet görmemiştir. 2006 yılında "*Reprap*" adlı proje sayesinde yeniden popülerlik kazanmış ve bu teknoloji daha geniş kitlelere ulaşmıştır. Fütüristler, 3D baskı teknolojisinin insanlık için bir dönüm noktası olacağı ve gelecekteki yenilikçi adımlarda önemli bir rol oynayacağı görüşündedirler. 3D baskı teknolojisinin etkilerinden biri de üretim süreçlerinin dönüşmesidir. Rifkin'in "*prosumer*" (üretüketici) kavramı, bu yeni üretim anlayışını tanımlar. Bireyler, 3D yazıcılarla ürettikleri ürünleri önce kendi ihtiyaçlarını karşılamak için kullanabilir, ardından fazla ürünleri pazara sunarak bir tüketici rolü üstlenebilirler. Bu durum, üretim maliyetlerini önemli ölçüde azaltır ve kapitalizm anlayışına yeni bir boyut ekler. Zaman içinde, 3D yazıcılar hız, maliyet ve boyut gibi engelleri aşarak daha yaygın bir şekilde kullanılacaktır (Özsoylu, 2017).

2014 yılında Gartner tarafından geliştirilen "*ilgi çevrimi*" tablosu, 3D baskı teknolojisinin gelişim aşamalarını ve pazara olan etkilerini göstermektedir. Bu teknolojinin yaygın kullanımı aydınlanma eğimine girdiği noktaları işaret etmektedir. Teknolojik ilerlemelerle birlikte, yakın gelecekte 4D yazıcıların da üretim alanında kullanılması beklenmektedir. 4D yazıcılar, üç boyutlu nesnelerin çevresel koşullara göre şekil değiştirmesini mümkün kılacak, zira su altına girdiğinde boru şeklini alabilen metal parçalar veya farklı hava koşullarına göre şekil değiştiren ayakkabılar üretilebilecektir (Özsoy ve Duman, 2017; Erener ve Boz, 2021).

Tıp alanında 3D teknolojisinin önemli gelişmelere yol açması beklenmektedir. Biyo-baskı adı verilen süreç ile insan vücudundaki organlar ve uzuvlar, 3D yazıcılarla üretilebilecektir. Bu süreçte kullanılan malzemeler, geleneksel üretimlerde kullanılanlardan farklı olacaktır. Nitekim kemik üretimi için kullanılacak malzemeler üzerinde denemeler yapılabilir ve bu malzemelerle ilgili yeni keşifler elde edilebilir. 3D

baskı teknolojisinin olumlu etkileri arasında ürün geliştirme hızının artması yer alır. Tasarımdan üretime geçiş süresi kısalmış, bu da üretim süreçlerini daha verimli hale getirir. Karmaşık parçaların daha kolay üretilmesi sağlanır ve tasarımcı talebi artar. Eğitim alanında da 3D yazıcılar, öğrenme süreçlerini hızlandırmak için kullanılabilir. 3D baskı teknolojisi, geleneksel üretim yöntemlerine alternatif olarak daha düşük maliyetli üretim yapma imkanı sunar. Açık kaynak planlarının artması ve yeni malzeme sektörlerinin ortaya çıkması gibi yenilikçi fırsatlar yaratır. Uzay araştırmalarında ise, bu teknoloji sayesinde yeni girişim fırsatları doğabilir. Çevresel etkiler açısından, üretim süreçlerinde ulaşım ihtiyacının azalması sayesinde çevresel faydalar sağlanabilir (Kökhan ve Özcan, 2018).

3D baskı teknolojisinin bazı olumsuz etkileri de bulunmaktadır. Artan üretim sonucunda atık miktarının da artması ve çevre üzerindeki yükün büyümesi söz konusu olabilir. Katmanlı üretim sürecinde izotropik olmayan parçalar üretilebileceği için bu ürünlerin işlevselliği kısıtlanabilir. Bazı sektörlerde bu teknolojinin iş gücü kayıplarına yol açabileceği ve üretkenlikte fikri mülkiyetin daha önemli hale gelmesi gibi olumsuz durumlar yaşanabilir. Korsan üretim ve marka kalitesindeki düşüşler de diğer potansiyel olumsuz etkiler arasında yer almaktadır (Özgüner, 2022).

Endüstri 4.0 sürecinde eklemeli imalat, özelleştirilmiş üretim ve düşük hacimli üretim gibi avantajlara sahiptir. Söz konusu teknoloji tasarım ve üretim arasındaki engelleri ortadan kaldırmakta, inovatif ve verimli üretim süreçlerini desteklemektedir. Karmaşık ve özgün tasarımlarda ideal bir çözüm sunan eklemeli imalat geleneksel üretim yöntemlerine nazaran daha az malzeme israfı sağlamaktadır.

2.1.1.7. Bulut bilişim ve mobilite

Bulut bilişim, bilişim araçları arasında bilgi paylaşımını sağlayan çevrim içi hizmetler bütünüdür. Bu yüzden bir ürün değil, hizmet olarak kabul edilmektedir. Bulut bilişim, yazılım ve verilerin internet üzerinden paylaşılması ve bilişim hizmetlerinin bilgisayarlar ve diğer cihazlardan erişilmesiyle işlemektedir. İnternetin 1990'lı yıllardan itibaren yaygınlaşması, bilgisayar maliyetlerinin düşmesi ve teknolojilerin daha ulaşılabilir hale gelmesiyle, bulut bilişim sistemleri hızla popülerlik kazanmıştır. Günümüzde dünya genelinde 4,5 milyardan fazla kişi interneti aktif bir şekilde kullanmaktadır. Bulut tabanlı teknolojiler, üretim sektöründe önemli bir destek sağlayıcı rol üstlenmekte ve firmaların ihtiyaçlarına göre çeşitli bilişim hizmetleri sunmaktadır (EBSO, 2017).

Bulut bilişim en basit tanımıyla bilişim hizmetlerinin üçüncü taraflarca sağlanması olarak tanımlanabilir. Söz konusu teknoloji, verilerin uzak sunucularda depolanarak istendiği zaman erişilebilmesini sağlar. Bulut bilişim altyapısını kullanan firmalar, yazılım ve donanım masraflarından tasarruf etmekte ve bu hizmetler için sürekli bir abonelik ücreti ödeyerek hizmet alabilmektedirler (Banger, 2018). Bulut sistemlerinin internetin geleceği olduğu yönünde geniş bir görüş birliği bulunmaktadır. Bu görüşe göre, bilgisayarların sabit diskleri yerini çevrim içi bulut depolama sistemlerine bırakacaktır. Söz konusu dönüşüm, bilişim teknolojileri yoğun kullanan firmaları önemli bir konuma getirirken, sektörde rekabeti de artırarak hukuki sorunlara yol açabilir. Bununla birlikte çevrim içi ortama tüm bilgi işlem uygulamalarının yönlendirilmesi, verilerin izinsiz erişime açık hale gelme riskini beraberinde getirebilir (Özsoylu, 2017).

Bulut bilişim sistemlerinin endüstriye entegrasyonu, büyük işletmelerin karlılıklarını artırırken, küçük ölçekli şirketlere de pazarda rekabet edebilme imkânı sunmuştur. Bu sistemler, yerel sunuculara yapılan yatırımların getirdiği iş gücü maliyetlerini, yazılım güncellemeleri, bakım ve enerji tüketimi gibi giderleri azaltarak işletmelere maliyet tasarrufu sağlamaktadır. Verilerin kaybolma riskini minimize ederek, siber saldırılara karşı daha güvenli bir altyapı sunar. Bulut bilişim, aynı zamanda üretimde esneklik sağlar ve firmaların verilere hızlı bir şekilde erişmesini mümkün kılar (Kalkan, 2018).

Bulut bilişim sistemlerinin talebinin artmasında, veri hacminin büyümesi ve yeni teknolojilerin etkisi büyüktür. Bu gelişmelerle birlikte, işletmelerin bulut teknolojilerini entegre edebilmesi için nitelikli personellere olan ihtiyaç artacaktır. Bulut bilişim mühendisleri ve entegrasyon uzmanları, bu alandaki talep doğrultusunda iş gücü piyasasında önemli bir yer edineceklerdir (Kamber, 2019).

Endüstri 4.0'ın başarılı olabilmesi için bulut bilişim teknolojileri kritik bir öneme sahiptir. Bu teknoloji, işletmelerin verilerini depolamak, yönetmek ve saklamak için kullanılırken, üretim süreçlerinde de büyük faydalar sağlamaktadır. Bulut tabanlı üretim, talebe göre üretim yapabilme imkânı tanıyarak kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlar. Ürün yaşam döngüsünü kısaltır, maliyetleri azaltır ve farklı müşteri taleplerine hızlı bir şekilde yanıt verebilmek için kaynak tahsisinde esneklik sunar (Duman, 2020).

Bu doğrultuda verilerin internet üzerinden depolanması, erişilmesi ve işlenmesi için kullanılan bir teknoloji olarak bulut bilişim, üretim verilerini merkezi bir platformda toplanması ve yönetilmesini mümkün hale getirmektedir. Böylece verilere zaman ve

mekan kısıtlaması olmaksızın erişilebilirlik sağlanmaktadır. Zira bulut tabanlı sistemler üretim hatlarında esneklik sunmasının yanı sıra veri analizleri ve makineler arası iletişim için güçlü bir altyapı oluşturmaktadır. Benzer şekilde mobilite üretim süreçlerine esneklik ve gerçek zamanlı yönetim sağlamada önemli bir rol üstlenmektedir. Mobil cihazlar ve uygulamalar aracılığıyla fabrikalar ve tesislerin uzaktan yönetilmesi mümkün hale gelerek daha hızlı karar alma süreci elde edilmektedir. Makineler arasındaki iletişimin hızını arttıran mobilite üretim hattında etkin bir koordinasyon sağlamaktadır.

2.1.2. Endüstri 4.0'ın kolaylıkları ve zorlukları

2.1.2.1. Sağladığı kolaylıklar

Endüstri 4.0'ın temel amacı başta nesnelerin interneti olmak üzere yeni teknolojileri kullanarak iş ve mühendislik süreçlerini derinlemesine entegre etmek, üretimi daha esnek, verimli, kaliteli ve düşük maliyetli hale getirirken çevreye duyarlı bir sistem oluşturmaktır. Devrimsel süreç içerisinde üretim ve operasyonel süreçlerde dijitalleşmenin önemi büyük rol oynamaktadır. Endüstri 4.0'ın önemli özellikleri arasında farklı sistemlerin birbirleriyle uyumlu bir şekilde çalışabilmesi yer almaktadır. Siber-fiziksel sistemler sayesinde akıllı fabrikalar ve insanlar birbirine bağlanarak etkili iletişim kurabilirler. Sanal sistemler aracılığıyla gerçek tesislerin dijital kopyaları oluşturulabilir ve süreçler daha iyi analiz edilebilir. Diğer bir önemli özellik ise desantralizasyondur. Bu özellik sayesinde makineler kendi kararlarını verebilme kapasitesine sahip olurlar. Böylece yerel üretim imkanlarının artmasıyla birlikte üretimin daha verimli bir hale gelmesi mümkündür. Gerçek zamanlı veri toplama ve analiz süreçleri sayesinde, hemen bilgi edinilerek hızlıca içgörü sağlanabilir. Modüler yapılar aracılığıyla fabrikalar esnek bir şekilde yeni ihtiyaçlara göre kolayca şekillendirilebilir (Taş ve Köse, 2023).

Endüstri 4.0'ın vizyonu, dönüşümü üç ana hedefle gerçekleştirmeyi amaçlar. İlk hedef, ağlar aracılığıyla yatay entegrasyon sağlamaktır. Böylece tedarik zincirinin başlangıcından lojistik süreçlerine kadar her aşama gerçek zamanlı olarak yönetilebilir. İnsanlar, makineler ve kaynaklar dijital ortamda modellenip, siber-fiziksel sistemler aracılığıyla birbirleriyle iletişim kurabilir. İkinci hedef, dikey entegrasyondur. Bu hedef sayesinde akıllı fabrikaların üretim süreçlerini, değişen şartlara adapte edebilmesini ve tedarikçiden müşteriye kadar tüm değer zincirini optimize edebilmesini sağlar. Üçüncü hedef ise uçtan uca mühendisliktir; bu mühendislik anlayışı, lojistikten üretim ve sonrasındaki tüm aşamalarda, sensörler, kontrol sistemleri ve kurumsal planlama

yazılımlarının birlikte çalışmasını ve böylece tüm süreçlerin dijital olarak entegre edilmesini sağlar (Bağcı, 2018: 125).

Endüstri 4.0'ın en büyük ekonomik potansiyeli, yatay ve dikey entegrasyon sayesinde şirketlerin karar verme ve adaptasyon hızını artırabilmeleridir. Bahsi geçen potansiyel optimizasyon süreçleri, iş verimliliği artışı, yenilikçi ürünler ve yeni iş modelleriyle somut hale getirilebilir. Söz konusu dönüşüm sırasında şirketler, Endüstri 4.0'a geçişi etkin bir şekilde gerçekleştirebilmek için açık bir geçiş planına sahip olamayabilirler. Stratejik yönetim kapasitelerinin eksikliği ve uygulama yöntemlerindeki yetersizlikler, karşılaşılan ana zorluklar arasında yer almaktadır (Kagermann vd., 2013:).

Dijitalleşmenin üretimdeki artışı, geleneksel iş modelleri üzerinde baskı oluşturacak ve yenilikçi iş modellerinin gelişmesine neden olacaktır. Deloitte (2014), siber-fiziksel sistemleri çevrimiçi sosyal makine ağları olarak tanımlamaktadır. Bu ağlar, makinelerin birbirleriyle iletişim kurarak süreçleri ve zaman çizelgelerini koordine etmelerine olanak tanır. RFID teknolojisi gibi erken örnekler, makinelerin, stok seviyeleri, hatalar ve talep değişiklikleri hakkında veri paylaşmasını sağlar. Bu ağlar, Endüstri 4.0'ın temel ilkelerinden biri olan akıllı fabrikaların kurulmasında kritik bir rol oynamaktadır. Veri güvenliği ve etik sorunları da bu süreçle birlikte önemli hale gelmektedir; çünkü veriye erişim sağlayabilenler esneklik ve verimlilikten büyük kazançlar elde edebilirler. Endüstri 4.0'ın etkisi, öncelikle yazılım geliştiren ve büyük veri analizi ile ağ oluşturma alanlarında faaliyet gösteren sektörlerde görülecektir (Gedik, 2021).

Endüstri 4.0'dan faydalanması beklenen diğer sektörler arasında makine mühendisliği, elektrikli ekipman üretimi, kimya endüstrisi, otomotiv sektörü, lojistik ve tarım gibi birçok endüstri yer almaktadır. Bazı sektörlerde bu dönüşüm, eski iş modellerinin yıkılmasına yol açabilir. Yeni teknolojilerin yaratacağı yaratıcı yenilikler, mevcut endüstriyel liderleri rekabetten dışlayarak onları tedarikçi pozisyonuna itebilir (OECD, 2017; Yankın, 2019).

2.1.2.2. Karşılaşılan zorluklar

Endüstri 4.0 ile ilgili yapılan analizlerde karşılaşılan bazı zorluklar ve tehditler öne çıkmaktadır. Bunların başında, nitelikli iş gücünün yetersizliği, teknolojinin iş gücü piyasası üzerindeki olumsuz etkileri, firmaların yeni teknolojilere uyum sağlama konusunda karşılaştıkları engeller, işbirliği ve entegrasyon sorunları, gizlilikle ilgili endişeler, standartlardaki eksiklikler ve yatırım maliyetlerinin geri dönüşü ile ilgili

belirsizlikler yer almaktadır. Teknolojik ilerlemeler ekonomik büyümeye katkı sağlarken, başlangıçta iş gücü piyasasında olumsuz etkiler yaratabilir (Toksoy, 2019).

Konu ile ilgili endişeler 19. yüzyılın başlarındaki İngiltere'deki makineleşmeye karşı yapılan protestolarla da ortaya çıkmıştır ve “*teknolojik işsizlik*” terimi 1930'larda John Maynard Keynes tarafından ortaya atılmıştır. Bu kaygılar çoğunlukla haksız bulunsa dahi Endüstri 4.0 ile ilgili tartışmalarda iş gücü sorunları ve yeni teknolojilerin neden olabileceği iş kayıpları hala gündemdedir (Kayar vd., 2018).

Teknolojik yeniliklerin verimliliği artırması ekonomiye fayda sağlasa da, bu artışın işçi ücretlerini veya karları artırarak tüketici gelirini yükseltmesi beklenmektedir. Düşük ürün fiyatları, tüketicilerin reel gelirlerini artırarak talebi artırabilir. Daha yüksek ücretler ise talebi ve yeni iş fırsatlarını artırabilir. Bu yeni gelirlerin bir kısmı, hisse sahiplerine daha fazla kar olarak dağıtılır ve toplam talebe katkı sağlar. Hissedarlar ve çalışanlar arasındaki tasarruf artışı ise faiz oranlarını düşürüp yatırımları teşvik ederek istihdam yaratabilir. ABD'nin “*İleri İmalat İçin Ulusal Stratejik Planı*”na göre, teknolojiyle yapılan iyileştirmeler uzun vadede istihdam artışı sağlayacaktır. Buna karşın hangi işlerin kaybolacağı ve hangilerinin ortaya çıkacağı konusunda tahminde bulunmak oldukça zordur. Yeni teknolojilerin hangi tür işleri doğuracağına dair kesin bir öngörü yapmak her zaman mümkün olmamıştır. Zira 1980'lerin başında kişisel bilgisayarların yaygınlaşmasının ardından, web tasarımcıları ve veritabanı uzmanları gibi 1500'den fazla yeni meslek dalı ortaya çıkmıştır (OECD, 2017). Yeni teknolojilerin iş gücünü nasıl dönüştüreceği konusunda kesin bir tahminde bulunmak oldukça zordur. Otomasyonun iş gücünü ne kadar ikame edeceği, bunun ne kadar süreceği ve hangi hızda gelişeceği hâlâ belirsizdir (Schwab, 2016; Yücebalkan, 2020).

Büyük veri analizi, yüksek hızlı iletişim ve 3D yazıcılar gibi gelişmiş teknolojilerin kullanımındaki artış, yaratıcılık ve tasarım odaklı yeni becerilere olan talebi artırmıştır. Bununla birlikte, rutin işlerde çalışan kişilere olan ihtiyaç azalırken, uzmanlık ve bilişsel beceri gerektiren işlere olan talep artmaktadır. Bu dönüşüm, ekonomistler tarafından beceri odaklı teknolojik değişim olarak tanımlanmaktadır. Uzmanlık becerileri eksikliği, firmaların bilgi ve iletişim teknolojilerini benimseme sürecinde zorluklar yaşamasına yol açmaktadır. Çeşitli çalışmalarda, veri analitiği gibi alanlarda yetersiz yetenekli uzmanların bulunmaması, bu teknolojilerin etkin kullanımını engelleyen en büyük faktörlerden biri olarak görülmüştür. Teknik beceri eksiklikleri, aynı zamanda bilgi teknolojilerinin üretkenlik potansiyeli hakkında farkındalık eksikliği yaratmaktadır. Bu

durum, özellikle dijital dönüşüm süreçlerinde zorlanan firmalar için büyük bir engel teşkil etmektedir (Bağcı, 2018; Aydın ve Demiral, 2019; Gedik, 2021).

Endüstriyel üretimin dijital dönüşümü, işletmelerde bilgi ve iletişim teknolojilerinin yaygınlaştırılmasını gerektirmektedir. Çok sayıda firma bu teknolojileri benimsemekte gecikmektedir. Bulut tabanlı sistemler, kurumsal kaynak yönetimi yazılımları, nesnelerin interneti ve radyo frekansı tanımlama gibi uygulamaların benimsenme oranları, geniş bant internet erişimi ve web sitesi kullanımı gibi temel teknolojilerin çok gerisindedir. Dijitalleşmenin sağlanabilmesi için bu tür gelişmiş bilgi ve iletişim teknolojilerinin uygulanması gerekmektedir. Bu teknolojilerin kullanımına ilişkin karşılaşılan en büyük engeller arasında yüksek yatırım giderleri, nitelikli iş gücü eksiklikleri, güvenlik riskleri ve standartların eksikliği yer almaktadır (Yankın, 2019).

IoT uygulamalarının kullanımında, sistemlerin uyumluluğu önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Farklı üreticilerin ve tedarikçilerin IoT cihazları ve sistemlerini kullanmaya başlamasıyla, çeşitli ağlar ve platformlar arasında entegrasyon sağlamakta zorluklar yaşanabilir. Standartlara dair bir uzlaşımın olmaması, bu tür sorunları daha da artırmaktadır. Dünya Ekonomik Forumu'nun 2015 tarihli anketine göre, şirketlerin IoT teknolojilerini benimsemesinin önündeki en büyük üç engelden biri, sistemler arası uyumluluktur (Taş ve Köse, 2023).

Veri analizi ve yapay zeka tabanlı uygulamaların yaygınlaşması ile birlikte, gerekli düzenlemeler yapılmadığında, bu teknolojilerin sosyal ve ekonomik açıdan güvenlik tehditlerine yol açması mümkün olabilir. Büyük veri analitiği, bulut bilişim ve IoT gibi uygulamalar, gizlilik, fikri mülkiyet hakları, tüketici koruma, rekabet ve vergi düzenlemeleri gibi konularda ciddi endişelere neden olabilmektedir. Dijital dönüşüm sürecinde, mevcut yasal ve düzenleyici çerçevelerin gözden geçirilmesi, veri analitiği, bulut sistemleri, yüksek performanslı bilgi işlem ve IoT gibi teknolojilerin yanı sıra, güvenlik ve gizlilik odaklı yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesini teşvik etmek amacıyla araştırma ve geliştirme yatırımlarının desteklenmesi büyük önem taşımaktadır (OECD, 2017).

2.1.2.3. Stratejiler ve politikalar

Dünya Bankası (1993), sanayi politikasını "*verimliliğe dayalı kalkınmayı teşvik etmek amacıyla sanayi yapısında değişiklikler yapmaya yönelik ulusal çabalar*" olarak tanımlamaktadır. Sanayi politikaları üzerine yapılan farklı tanımlamalar olsa dahi ortak

görüş bu politikaların ekonominin yapısını dönüştürmeyi amaçladığı yönündedir. Warwick, bu tanımlardan yola çıkarak sanayileşme politikalarını; imalat sektörünün büyümesini destekleyerek gelişmekte olan bir ekonomiyi kalkınmanın ileri aşamalarına taşımayı hedefleyen özel stratejiler bütünü olarak tanımlamaktadır (OECD, 2013b).

2008 yılı sonrası ekonomik kriz, birçok ülkenin yeni ekonomik büyüme ve istihdam fırsatları yaratabilmek için yeni kaynaklar arayışına girmesine neden olmuştur. Bazı ülkeler, ekonomik büyüme açısından önemli sektörlerle, büyüme payı giderek azalan sektörler arasındaki dengesizlikten endişe ederken, diğer ülkeler ise üretim seviyelerinin düşmesi ve yaşanan iş gücü konusunda kaygı taşımaktadır. Bu kaygılar doğrultusunda, ileri düzey üretim teknolojileri, bilgi yoğun hizmet sektörü ve çevre dostu üretim alanlarında yeni politikalar geliştirilmiştir. Küresel değer zincirlerinin daha karmaşık hale gelmesiyle, gelişmiş ülkelerle gelişmekte olan ülkeler arasındaki rekabetin artması, sanayi politikalarına olan ilgiyi artırmıştır. Ekonomik krizle mücadele eden ülkeler, uzun vadeli stratejiler geliştiren ülkelerle birlikte Fransa, Japonya, Güney Kore, Türkiye, İtalya, İngiltere, Amerika, Brezilya, Çin, Hindistan, Hollanda ve Almanya gibi pek çok ülke, son yıllarda yeni sanayi politikalarını hayata geçirmiştir. OECD'nin "*Sanayi Politikasının Ötesinde*" raporunda, sanayi politikalarına olan ilginin aslında yeni bir paradigma arayışına işaret ettiği öne sürülmüştür. Bu paradigma arayışının temel sebepleri şunlardır (OECD, 2013b);

- 2008 küresel finansal krizinin ardından, yalnızca talep artırıcı politikalar değil, aynı zamanda teknoloji ve altyapı yatırımlarına dayalı arz yönlü iyileştirmelerle ekonomik büyüme sağlanmasına yönelik politikalar,
- 1980'lerden günümüze kadar süren hizmetler ve finans sektörüne dayalı büyümenin, sanayinin rekabet gücünü kaybettirerek "sanayisizleşme" sürecine yol açması,
- İç ve dış talepler ile sektörler arasındaki dengesizliklerin oluşturduğu sorunlar,
- Çin gibi gelişmekte olan Asya-Pasifik ülkelerinin küresel değer zincirindeki etkisinin artması.

Gelişmiş ülkelerde, imalata dayalı ekonomilerin son yıllarda imalatın gayri safi yurtiçi hasıla ve istihdam içindeki paylarının azalması dikkat çekici bir durumdur. Bunun başlıca nedenleri arasında, imalatın küreselleşmesi ve üretim yerine hizmet sağlayıcı alanlarda faaliyet gösteren şirketlerin artması yer almaktadır. Bu değişim, ülkelerin küresel değer zincirlerinde daha düşük seviyelere inmesine neden olmuştur. Teknolojideki gelişmeler, ekonomik büyüme ve ticari rekabetin itici güçlerinden biridir.

İktisatçılar, verimlilik artışlarının, yeni üretim yöntemleri ve yenilikçi ürünlerin ortaya çıkmasıyla ve bu yeniliklerin tüm ekonomi sistemine etkin bir şekilde yayılmasıyla doğrudan bağlantılı olduğunu belirtmektedirler. Teknolojideki değişimler, ekonomik yapıyı uzun vadeli etkileyebilecek sonuçlar yaratabilir (Türkel ve Yeşilkuş, 2020; Ulusoy, 2018).

Uzun dalga teorisini savunanlar, beş büyük uzun dalga dönemi tanımlar. İlk dalga, 18. yüzyıl sonlarında gerçekleşen sanayi devrimini simgeler. Bu devrim, enerji için büyük ölçekli kömür kullanımına geçişi kapsar. İkinci dalga, 19. yüzyıl başlarında buhar makineleri ve demiryolları ile başlamıştır. Üçüncü dalga, 19. yüzyılın sonlarına damgasını vuran çelik üretimi ve makineli üretimle etkinleşmiştir. Dördüncü dalga ise 20. yüzyılın ilk yarısında sentetik malzemeler ve elektroniklerin benimsenmesiyle ortaya çıkmıştır (Ayboğa ve Görmüş, 2022).

İkinci Dünya Savaşı sonrasındaki beşinci dalga, bilgi ve iletişim teknolojilerinin, ekonomik büyümenin motoru olarak önem kazandığı dönemi ifade eder. Beşinci dalganın temel yeniliklerinden biri mikroişlemciler ve internet olmuştur. Günümüzde altıncı dalga, biyoteknoloji, nanoteknoloji, tıp ve bilgi teknolojileri arasındaki sınırların giderek daha fazla bulanıklaştığı, kendi kendini yöneten sistemlerle şekilleneceği öngörülmektedir. Bu yeni teknolojiler, üretim süreçlerini köklü bir biçimde dönüştürme potansiyeline sahip olup, bu teknolojilerin ne gibi spesifik etkiler yaratacağı henüz tam olarak kestirilememektedir. Biyoteknoloji, ileri üretim teknikleri, bilgi teknolojileri, ileri malzemeler ve yeni üretim yöntemleri gibi alanlar, son dönemde hükümetlerin araştırma ve strateji çalışmalarının öncelikli alanları arasında yer almıştır. Bu gelişmeler, devletlerin araştırma önceliklerini belirlerken, teknolojilerin evrimi ve modern üretim sistemlerinin karmaşıklığı nedeniyle zorluklar yaratmaktadır (Aydın ve Demiral, 2019).

Dijitalleşme, özellikle ABD ve Almanya gibi ülkelerde sanayi sektöründe önemli bir evrimin sonucu olarak ortaya çıkmıştır ve hemen hemen aynı dönemde bu terimler kullanılmaya başlanmıştır (Ulusoy vd., 2017). Avrupa Birliği, 2000 yılında kabul edilen Lizbon Stratejisi ile daha fazla ve kaliteli iş ve daha fazla sosyal uyum ile sürdürülebilir ekonomik büyüme kapasitesine sahip dünyanın en rekabetçi ve dinamik bilgi tabanlı ekonomisi olmayı hedeflemiştir. Lizbon Gündemi, Ar-Ge yatırımlarını artırmayı, hizmet sektörü için tek bir pazar oluşturmayı ve iş gücü piyasasında esneklik ile katılım oranlarını yükseltmeyi amaçlamaktadır. 2000 yılından itibaren Avrupa Komisyonu, sanayi politikalarının geliştirilmesinde, özellikle işbirliği, yenilik ve teknolojik gelişmeleri

teşvik etmeye yönelik müdahalelerde bulunmuştur. 2010'dan itibaren Avrupa 2020 Stratejisi ile bu çalışmalar sürdürülmüş ve Avrupa'da bir "*Endüstriyel Rönesans*" yaratılması hedeflenmiştir (European Parliamentary Research Service, 2016).

Dönem içerisinde Almanya, rekabeti artırmak ve teknolojik yenilikleri desteklemek amacıyla 2006 yılında "Yüksek Teknoloji Stratejisi"ni başlatmış, üretim süreçlerini daha verimli hale getirecek siber-fiziksel sistemlerin entegrasyonuna ağırlık vermiştir. Avrupa Birliği dijital ekonomiden daha fazla fayda sağlamak için dijital gündem üzerinde çalışmalar yapmış ve 2000'li yılların başından itibaren bu süreci sürdürmüştür (Kalkınma Bakanlığı, 2018).

2007-2008 yıllarında yaşanan küresel ekonomik kriz, ülkelerin sanayi stratejilerine yönelik tartışmaları körüklemiş ve imalat sektörünün dünya ekonomisindeki rolünü daha belirgin hale getirmiştir. Krizin uzun vadeli etkilerinin anlaşılmasının ardından, 1980'lerden itibaren öne çıkan hizmetler ve finans temelli büyümenin sürdürülebilirliği sorgulanmaya başlanmış ve bunun yerine alternatif sanayi politikaları geliştirilmiştir. 2008 krizi, özellikle sermaye birikimi ve büyüme süreçlerine dair yeni arayışların başladığı bir dönüm noktası olarak değerlendirilmiştir (Eser, 2014).

Bazı ülkeler krizi doğrudan aşmayı hedefleyen kısa vadeli sanayi stratejileri oluştururken, diğerleri daha uzun vadeli çözümler üzerinde durmuştur. Çin'in küresel değer zincirindeki artan üretim gücü ile birlikte, Avrupa Birliği başta olmak üzere, Türkiye, İngiltere, Japonya, Kore, Çin, Brezilya, ABD, Fransa, Hollanda ve Hindistan gibi ülkeler sanayi politikalarına yönelik ilgi göstermeye başlamıştır. Bu politika değişikliklerinin çoğu, üretim payındaki azalma ile başa çıkmayı ve değer zincirinde daha üst sıralara çıkmayı amaçlamaktadır (Kayar vd., 2018).

Avrupa Birliği, 2008 yılında yayımladığı ekonomik kurtarma planı ile kamu ve özel sektör işbirliği çerçevesinde stratejik yatırımlar yapmayı planlamış ve bu doğrultuda "*Kamu-Özel Ortaklıkları*" kurmuştur. Bu ortaklıklar, geleceğin fabrikalarından enerji verimli binalara, sürdürülebilir sanayi süreçlerinden yeşil araçlar gibi birçok farklı alanda yoğunlaşmıştır. Planın başarısını kanıtlanmasının ardından, robotik, fotonik, gelişmiş 5G ağları ve yüksek performanslı bilgi işlem gibi alanlarda yeni ortaklıklar oluşturulmuştur. "*Avrupa Geleceğin Fabrikaları Birliği (EFFRA)*" söz konusu çabalar kapsamında, üretim süreçlerinde akıllı ve sürdürülebilir üretimin önemini vurgulayan stratejik yol haritaları geliştirmektedir. Bu haritalarda, akıllı üretim, sürdürülebilir üretim, yüksek performanslı üretim ve yeni malzemelerin kullanımı gibi dört ana endüstriyel ihtiyaç öne

çıkılmaktadır. EFFRA, Endüstri 4.0'ı göz önünde bulundurarak dijital üretim platformları ve çevik değer ağları gibi temel öncelikleri belirleyerek bu alanlarda önerilerde bulunmuştur (Gedik, 2021).

Küresel krizin ardından OECD ülkeleri ve diğer birçok ülke, kısıtlı kamu finansmanı ile çıktı artışını nasıl destekleyebileceklerini araştırmaya başlamıştır. İmalat sektörü, sadece zenginlik ve istihdam yaratmakla kalmayıp, ekonominin temel yapı taşlarından biri olarak görülmektedir. İmalat sanayi, son yıllarda gelişmiş bölgelerde GSYİH'ye katkı oranında düşüş göstermektedir. 2012 yılında ABD tarafından yayımlanan “İleri İmalat için Ulusal Stratejik Plan” raporundan hareketle; imalat sektörü, diğer ekonomik faaliyetlerden daha büyük bir çarpan etkisine sahiptir. Raporda, imalat sektörüne yapılan her bir dolarlık yatırımın, ekonomiye 1,35 dolarlık ek bir değer sağladığı belirtilmiştir. AB içinde imalat sektörü, yaklaşık 2 milyon işletme ve 33 milyon kişiye iş imkanı sunmakta, aynı zamanda ihracatın ve yeniliklerin büyük bir kısmını üstlenmektedir. Üretimdeki her yeni işin diğer sektörlerde de istihdam yaratması ile birlikte, imalatın AB ekonomisindeki nispi katkısı azalmaktadır. AB ekonomisi, son 40 yılda sanayisinin üçte birini kaybetmiştir. 2014 yılı itibarıyla, AB’de imalatın ekonomiye kattığı katma değer, 2008’e kıyasla 1,2 puan azalarak toplam katma değerın %15,3’ünü oluşturmaktadır. Bu düşüş, emek yoğun üretim süreçlerinin düşük işgücü maliyetleri olan ülkelere kayması ve küresel tedarik zincirlerine yönelmesiyle daha da derinleşmiştir (Asar ve Esen, 2021; Taş ve Köse, 2023).

AB, bu durumu tersine çevirmek amacıyla 2020 yılına kadar üretimin toplam katma değerın %20’sini oluşturmasını hedeflemiştir. Birçok uzman, bu hedefin oldukça iddialı olduğunu savunsa da, Avrupa'nın sanayi devriminin üretkenliğini artırabileceğini ve böylece ekonomik büyümeyi yeniden canlandırabileceğini düşünmektedir. Dijitalleşme ise önemli bir dönüm noktasıdır; bilgi ve iletişim teknolojilerinin AB GSYİH'sinin %4'ünü oluşturması ve sektörde 6 milyon kişiye istihdam sağlaması büyük bir potansiyel taşımaktadır. Bunun yanı sıra, dijitalleşmenin önümüzdeki beş yıl içinde AB'de 110 milyar Avro'luk ek bir katma değer yaratacağı tahmin edilmektedir (European Parliamentary Research Service, 2015; Kalkınma Bakanlığı, 2018).

Avrupa Komisyonu, dijital teknolojilerin endüstriyel sistemlere entegrasyonunu artırmaya yönelik çalışmalara hız vermiştir. 2015 yılında başlatılan “Dijital Tek Pazar Stratejisi” kapsamında, Avrupa'daki dijital pazarın tek bir çatı altında birleştirilmesi hedeflenmiştir. 2016'da başlatılan Avrupa Bulut Girişimi ile Avrupa'daki bilimsel ve

endüstriyel verilerin depolanması ve işlenmesi için altyapı sağlanması planlanmıştır (European Commission, 2016).

“*Dijital Avrupa*” programı kapsamında süper bilgisayarlar, yapay zeka, siber güvenlik ve dijital teknolojilerin geniş çapta kullanımı gibi alanlarda önemli adımlar atılmaktadır. 2022 yılına kadar, Avrupa'nın yüksek performanslı hesaplama altyapısının güçlendirilmesi ve saniyede 1 trilyon işlem yapabilen süper bilgisayarların devreye girmesi hedeflenmektedir. Bu tür projeler, Avrupa'nın geleceği için stratejik bir öneme sahip olup, dijital dönüşümün sanayi üzerindeki etkilerini artırmayı amaçlamaktadır (Bağcı, 2018).

Avrupa Birliği üyesi ülkeler ve diğer birçok devlet, dijital teknolojilerin ekonomik katkısını arttırarak üretim sektöründeki rekabet güçlerini koruma çabası içinde, dördüncü sanayi devrimi için çeşitli stratejiler ve planlar geliştirmiştir. Bu doğrultuda, Avrupa ve Almanya, üretim kapasitelerini yükseltmek amacıyla özellikle akıllı üretim teknolojilerini destekleyen politikalar oluşturmuşlardır. Almanya'nın 2010 yılında yayınladığı “*Yüksek Teknoloji Stratejisi*” çerçevesinde, gelecekteki sanayi faaliyetleri için on farklı alan belirlenmiş ve bu alanlarda iş dünyası, akademi ve politika yapımcılarının birlikte inovasyon yaratma yolları tartışılmıştır. Bu alanlardan biri de Endüstri 4.0'dır. Endüstri 4.0 terimi, Almanya'da ilk olarak 2011 yılında kamuya sunulan Yüksek Teknoloji Stratejisi çerçevesinde Prof. Kagermann tarafından tanımlanmış ve ardından 2013'te bu kavram, farklı sektörel aktörlerin yer aldığı bir platformla şekillendirilmiştir. 2015'te bu platform, sanayi, akademi ve politika temsilcilerinden oluşan 250'den fazla üyeye sahip bir yapı haline gelmiştir (Sony & Naik, 2020).

Almanya, Endüstri 4.0 girişimini, özellikle gömülü sistemler, siber-fiziksel sistemler ve nesnelerin interneti gibi ileri teknolojilere verdiği önemin yanı sıra söz konusu sistemlerin akıllı fabrikalarda nasıl entegre edileceğine dair çalışmalarla desteklemiştir (Kagermann vd., 2013).

Amerika, Japonya, Çin, Avusturya, Fransa, İtalya, İsviçre ve Birleşik Krallık gibi ülkeler dijital üretimle ilgili önemli adımlar atmış ve stratejilerini açıklamışlardır. Amerika Birleşik Devletleri 2011 yılında “*İleri İmalat Ortaklığı*” programını başlatarak, dijital üretim ve yenilikçi tasarım konularında işbirliklerini desteklemeye başlamıştır. 2013 yılında bu program çerçevesinde “*Ulusal Üretim Yeniliği Ağı*” kurulmuş ve burada sanayi, üniversite ve kamu kurumları bir araya gelerek, 1 milyar dolar değerinde kamu finansmanı ile imalat teknolojilerini geliştirmeye yönelik çalışmalar yapmıştır. 2013

yılında “İleri İmalat İçin Ulusal Stratejik Planı” ve 2016 yılında “Ulusal Yapay Zeka Araştırma ve Geliştirme Stratejik Planı” yayımlanmıştır (White House Office of Science and Technology Policy, 2016). ABD’nin son yıllarda yayımlanan politikalarında, dijital üretim teknolojilerinin hızlı bir şekilde uygulanması için yoğun çabalar harcanmış ve bu süreçte, eklemeli üretim, gelişmiş kompozit malzemeler, dijital tasarım, esnek elektronikler, fotonik, hafif malzemeler gibi yeni nesil bilimsel teknolojiler ön plana çıkmıştır (President’s Council of Advisors on Science and Technology, 2011).

Almanya’nın Endüstri 4.0 stratejisi, akıllı üretim süreçlerinin ve gelişmiş ekipmanların üretimine odaklanırken, ABD’nin stratejileri, yazılımlar, ağlar ve veri yönetimine özel bir ilgi göstermektedir. Çin, 2009 yılında nesnelerin interneti üzerine yapılan toplantılarda, bu teknolojilerin Çin için bir ulusal öncelik olduğunu açıklamış ve 2015’te, küresel üretimdeki liderliğini artırma ve yeni sanayi devrimini kaçırmama amacıyla “Made in China 2025” (MIC2025) stratejisini duyurmuştur. MIC2025, Çin’in üretim kapasitesini artırmayı ve daha çevreci, enerji verimli üretim yöntemlerine geçişi teşvik etmeyi hedefleyen bir programdır. Bu strateji çerçevesinde, bilgi teknolojileri, robotlar, havacılık ekipmanları, ileri malzemeler, biyotıp ve tıbbi cihazlar gibi 10 ana sektörde ilerleme sağlanması amaçlanmaktadır (Yılmaz, 2019).

Çin, bu strateji ile sanayisini dijitalleştirmeyi ve akıllı üretim alanında söz sahibi olmayı planlamaktadır. MIC2025, aynı zamanda Çin’in küresel ekonomideki yerini pekiştirecek modern ağlar, teknik standartlar ve platformlar oluşturmayı da hedeflemektedir. Çin, Endüstri 4.0’ı etkilemiş ve bu stratejiyi uygulamak için Almanya ile yakın işbirliği yapmıştır. Çin, Almanya’dan teknoloji ve bilgi transfer ederek, bu teknolojileri küresel ölçekte uygulama hedefindedir. Almanya’nın üretim gücünü taklit etmeye çalışan Çin, bu işbirliğini 1984 yılındaki Volkswagen ile Şanghay Otomotiv ortaklığından bu yana pekiştirmektedir. Çin’in stratejisi, gelişmiş ülkelerden teknoloji transferi yaparak bu yenilikleri küresel ölçekte yaymayı amaçlamaktadır (Sözen ve Mescioğlu, 2019).

Japonya, son yıllarda yayımladığı strateji raporlarında, gelişmiş robotlar ve yapay zeka entegrasyonu gibi teknolojilere öncelik verdiğini vurgulamaktadır. Uzmanlaşmış tedarik zincirlerinin bir araya getirilmesi de önemli bir odak noktası olmuştur. Japonya, “IoT Devrimiyle Robotlar” projesini hayata geçirerek üretim inovasyonu alanında küresel liderlik hedeflemekte ve bu doğrultuda robotlar için yazılım ve destek araçlarının geliştirilmesi, küresel robotik standartların belirlenmesi ve robotlardan elde edilen

verilerle yapay zeka çözümlerinin geliştirilmesi gibi konulara öncelik tanımaktadır (Japanese Ministry for Economics (METI), 2015).

İtalya, “*La Fabbrica del Futuro*” projesiyle, üretim süreçlerinde özelleştirme, yeniden yapılandırılabilir fabrikalar ve yüksek performanslı sürdürülebilir üretim alanlarında araştırma ve gelişim çalışmalarına yatırım yapmıştır. Proje bilgi teknolojileri, malzeme geri dönüşümü, kontrol sistemleri ve insan-makine etkileşimi gibi alanlarda yenilikçi teknolojilerin kullanılmasını hedeflemektedir. İtalya, Endüstri 4.0 ekseninde bir ulusal strateji olan “*Piano Nazionale Impresa 4.0*” planını yayımlayarak, imalat şirketlerini dijitalleşme yönünde yatırımlar yapmaya teşvik etmektedir (Tolio, Copani ve Terkaj, 2019).

İngiltere, üretim süreçlerini daha esnek, sürdürülebilir ve rekabetçi hale getirmek amacıyla çeşitli politikalar benimsemiştir. 2013 yılında yayımlanan “*İmalatın Geleceği*” raporu, şirketlerin gelişmiş üretim ve süreç inovasyonu gibi konularda araştırma yapmalarına olanak tanıyan “*Katapult Merkezleri*”ni kurmayı planlamıştır. Merkezlere 2011 yılından itibaren devlet tarafından 200 milyon pounddan fazla finansman sağlanmıştır. Merkezlerin amacı, üretimin gayri safi yurtiçi hasılaya (GSYH) katkısını iki katına çıkarmaktır. 2012 yılında yeni tedarikçilere 170 milyon pound fon sağlayan “*Gelişmiş Üretim Tedarik Zinciri Girişimi*” de devreye alınmıştır (Eser, 2014).

Fransa, 2015 yılında “*Geleceğin Fabrikası*” planını başlatarak, küçük ve orta ölçekli işletmeleri dijitalleşme, robotik ve enerji verimliliği gibi alanlarda desteklemeyi amaçlamıştır. Bu planla birlikte, robotik, nesnelerin interneti, büyük veri ve artırılmış gerçeklik gibi alanlar daha geniş bir “*Endüstrinin Endüstrisi*” konsepti altında bir araya getirilmiştir. 1 milyar Euro’luk krediyle, KOBİ’lere yönelik dijitalleşme projelerine finansal destek sağlanmıştır (Ertuğrul ve Deniz, 2018).

Türkiye’de Endüstri 4.0 çerçevesindeki çalışmalar, imalat sektörünün dijital dönüşümü üzerine politika ve stratejiler geliştirilerek ilerlemektedir. Bu süreç “*Sanayide Dijital Dönüşüm*” olarak adlandırılmaktadır. 2016 yılında Bilim ve Teknoloji Yüksek Kurulu (BTYK) tarafından alınan bir kararla, akıllı üretim sistemlerine yönelik araştırmalar başlatılmıştır. BSTB ve TÜBİTAK, akıllı üretim sistemlerine hizmet eden teknolojilerin belirlenmesi amacıyla bir dizi araştırma yapmış ve sonuç olarak, 2016 yılı sonunda “*Yeni Sanayi Devrimi: Akıllı Üretim Sistemleri Teknoloji Yol Haritası*” raporunu hazırlamıştır. Bu rapor, dijitalleşme, etkileşim ve geleceğin fabrikaları gibi ana temalarla

kritik teknolojiler ve stratejik hedefler belirlemiştir (Bilgin, 2018; Ayboğa ve Görmüş, 2022).

BSTB tarafından oluşturulan bir platformda, sanayinin dijital dönüşümü için gerekli politika ve stratejiler üzerinde çalışmalar yapılmış ve Türkiye'deki sivil toplum kuruluşları ve kamu kurumlarıyla işbirliği içinde, "*Sanayide Dijital Dönüşüm Platformu*" kurulmuştur. Bu platform, Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği, Türkiye İhracatçılar Meclisi, Türk Sanayicileri ve İş İnsanları Derneği gibi birçok kurumla ortaklaşa çalışmalarına 2016 yılında başlamıştır. Platformun amacı Türkiye'nin sanayi rekabet gücünü artırmak, üretimde verimliliği yükseltmek ve akıllı üretim sistemlerini hayata geçirmek için gerekli politikaların oluşturulmasını sağlamaktır. Çalışma grupları, dijital teknolojiler, ileri üretim teknikleri, açık inovasyon, eğitim, altyapı ve standardizasyon gibi alt alanlarda eylem planları hazırlamaktadır (Bayrak, 2018).

Kalkınma Bakanlığı, 2018-2020 yılları için hazırladığı Orta Vadeli Programda, sanayinin dijital dönüşümüyle ilgili önemli hedefler belirlemiştir. Bu hedefler arasında katmanlı üretim, robot teknolojileri, nesnelerin interneti, büyük veri, yapay zeka ve artırılmış gerçeklik gibi teknolojilerin etkin bir şekilde kullanılması ve yerli üretimin artırılması yer almaktadır. Büyük organize sanayi bölgelerinde, tasarım ve dijital dönüşüm merkezlerinin kurulması öngörülmektedir (T.C. Kalkınma Bakanlığı, 2018).

Son yıllarda ülkelerin sanayi politikalarına olan ilgi, küreselleşmenin etkisiyle dünya ekonomisinin coğrafi yapısındaki değişimden kaynaklanmaktadır. Söz konusu değişim, sanayi yapısında belirgin ayrışmalara yol açmıştır. Amerika Birleşik Devletleri ve Çin arasındaki rekabet, Asya kapitalizminin yükselmesi ve düşük iş gücü maliyetleri nedeniyle üretimin G-20 ülkelerine ve bu ülkeler içinde yer alan BRICS (Brezilya, Rusya, Hindistan, Çin, Güney Afrika) ülkelerine kayması, küresel üretim haritasının yeniden şekillenmesine neden olmuştur. Küreselleşme ile birlikte büyük şirketler, üretim süreçlerini yerelleştirerek mekandan bağımsız üretim yapma imkanı bulmuş ve maliyet avantajı sağlamak amacıyla üretimin çeşitli aşamalarını düşük maliyetli ülkelere kaydırmıştır (Eser, 2014).

TÜSİAD ve BCG tarafından ortaklaşa gerçekleştirilen ve 2016 yılında yayımlanan "*Türkiye'nin Küresel Rekabetçiliği İçin Bir Gereklik Olarak Sanayi 4.0 Gelişmekte Olan Ekonomi Perspektifi*" raporunda, üretim maliyetleri, verimlilik, enerji giderleri ve döviz kurları göz önünde bulundurularak yapılan bir analizde Hindistan, Çin ve Türkiye gibi ülkelerin daha düşük maliyetlerle üretim yapabildiği belirtilmiştir.

Gelişmiş ülkeler, yeni ekonomik coğrafyada üretim maliyetlerini düşüremediklerinden, üretim süreçlerinde teknolojiyi yoğun şekilde kullanmaya yönelmişlerdir. Teknoloji odaklı üretim, aynı zamanda insan gücünün eğitimini, teknolojiye yapılacak yatırımları, şirket içi süreçlerin yenilikçi hale getirilmesini ve ulusal inovasyon politikalarının geliştirilmesini önemli hale getirmiştir. Söz konusu eğilim, düşük maliyetli ve niteliksiz iş gücünün üretim süreçlerindeki avantajını giderek azaltmaktadır (Eser, 2014).

Sonuç itibarıyla üretim süreçlerinin teknolojik dönüşümü, maliyetleri kontrol edemeyen ülkelerin rekabet avantajını kaybetmesini engellemek adına, sanayisini dijitalleştirmeyen ülkeler için dezavantaj yaratacaktır. Türkiye, lojistik avantajları ve düşük iş gücü maliyetlerinin yanı sıra bu dönüşümü benimsemezse, mevcut güçlü yanlarını sürdüremeyecektir. TÜBİTAK'ın 2016 raporunda belirtildiği üzere; dönüşüm sürecinin kaçırılması, ülkenin rekabetçi gücünü olumsuz etkileyecektir. 2019-2023 dönemi için hazırlanan On Birinci Kalkınma Planı'nda da vurgulanan gibi, Türkiye'nin küresel rekabette güçlü bir aktör olabilmesi için dijital dönüşüm süreçlerini doğru analiz etmesi ve bu süreci ülkemize uyarlaması büyük bir önem taşımaktadır.

2.1.2.4. Güçlü ve zayıf yönleri

Endüstri 4.0 ile insan, makine ve sistemler arasında internet ve bilgi teknolojileri aracılığıyla kurulan entegrasyon sayesinde tek üretim tesisinin yanı sıra tüm sistemler birbirine bağlanarak ortak bilgi ağları oluşturulmaktadır. Sistem aracılığıyla işletmeler arası dijital bağlantılardan söz edilmektedir (Atik ve Ünlü, 2019: 151).

Endüstri 4.0 sayesinde üretimdeki otomasyon oranı artar, müşteri taleplerine daha hızlı yanıt verilir ve daha fazla seri üretim yapılabilir, üretim kalitesi iyileşir, üretim süreçleri daha yerleşir, yenilikçi süreçler hızlanır ve kaynak kullanımı azalır. Esnek üretim sistemleri ve yenilikçi uygulamalarla daha özgür ve etkin üretim yöntemleri benimsenir. Müşteri odaklı üretim sayesinde, özel tasarım ürünler yüksek maliyetlerle değil, daha düşük maliyetlerle üretilebilir. Veri ve bilgi iletişimi hızlanır, 3D teknolojiler sayesinde ürünler daha yakın lokasyonlarda üretilir, bu da lojistik süreçlerin hızlanmasına yardımcı olur. Enerji verimliliği artar, kaynak israfları ise önemli ölçüde azalır (Soba ve Akar, 2021).

Üretim alanında Endüstri 4.0'ın sağladığı avantajlar ise oldukça geniş kapsamlıdır. Endüstri 4.0, ülkelerin üretim stratejilerini önemli ölçüde dönüştürürken, işletmelerde de derin değişiklikler yaratmaktadır. Bu dönüşüm, işletmelerin

verimliliklerini artırarak uluslararası rekabet güçlerini güçlendirecektir. Endüstri 4.0 ile işletmeler, kaliteyi artırırken stok maliyetlerini düşürür, makinelerinin performansını yükseltir ve teknik ekiplerin verimliliğini artırır. Yeni altyapılar sayesinde, üretim süreçlerinde şeffaflık artar ve sistemlerin uzaktan yönetilmesi kolaylaşır. Müşterilere sağlanan faydalar da Endüstri 4.0'ın önemli bir yönüdür. Tedarik zincirinin her aşamasında dijital sistemlerle sağlanan entegrasyon sayesinde müşteriler, ürünlere dair taleplerini hızlı bir şekilde iletebilir ve anında çözüm üretilir. Akıllı ürünlerin sunduğu açık üretim bilgileri sayesinde, ürünlerin kullanım bilgileri daha doğru şekilde sağlanır ve ürün yaşam döngüsünü takip etmek mümkün hale gelir (Gürün, 2019).

Endüstri 4.0, üretim sektöründe önümüzdeki yıllarda kilit bir konu olmaya devam edecektir. Endüstri 4.0'ın önemini, bilgi teknolojileri ve satış-pazarlama süreçlerinde devrim yaratması açısından beş ana başlık altında toplanmıştır. İlk olarak, Endüstri 4.0, işletmelerin yeni iş trendlerine uyum sağlamalarını kolaylaştıracaktır. Pazardaki ani talepler, kısa ömürlü ürünler ve karmaşık ürün yapıları gibi zorluklar, Endüstri 4.0 ile aşılabilecektir. İkinci olarak, Endüstri 4.0 ile işletmeler daha yenilikçi hale gelir, bu da üretkenliği artırır. Üçüncü olarak, yeni sistemle müşteriler üretim süreçlerinin merkezine yerleştirilir ve ürünlerin kişiselleştirilmesi dijital sistemler sayesinde mümkün hale gelir. Dördüncü olarak, insan faktörü üretim süreçlerinde önemli bir rol oynayacaktır. Otomasyon sistemlerinin yetersiz kaldığı durumlarda, işçiler devreye girerek karmaşık görevleri yerine getirecektir. Son olarak, Endüstri 4.0 ile üretim dışındaki alanlarda, enerji, hammadde ve diğer kaynaklarda önemli tasarruflar sağlanacaktır. Çevre, sosyal ve ekonomik sorunlar ise akıllı sistemler sayesinde daha hızlı çözülebilecektir (Morrar vd., 2017).

Endüstri 4.0'ın işletmelere sağladığı ana faydalar, EBSO tarafından 2017 yılında yapılan bir çalışmaya göre, üretkenlik, ciro artışı, yatırım ve istihdam gibi başlıklar altında şu şekilde sıralanabilir: Üretkenlik artışı, Endüstri 4.0'a geçişin yaklaşık 5-10 yıl süreceği ve üretim maliyetlerinin hammadde dışında %15-25 oranında düşeceği tahmin edilmektedir. Hammadde maliyetiyle birlikte toplamda %5-8 oranında bir azalma öngörülmektedir. Bu maliyet azalması, üretim miktarlarının artmasına katkı sağlayacaktır. Almanya'da Endüstri 4.0 ile üretim sektöründe 90-150 milyar Euro'luk ekonomik bir etki beklenmektedir (EBSO, 2017).

Türkiye açısından bakıldığında, Endüstri 4.0'ın başarılı bir şekilde uygulanması durumunda, verimlilikte %5-15 arasında bir artış sağlanacak ve bu da yıllık yaklaşık 50

milyar TL'lik bir kazanç yaratacaktır. Söz konusu dönüşüm Türkiye'nin küresel ekonomik payını artırma fırsatı sunacaktır. Küresel büyüme sayesinde sanayi üretiminde %3'lük bir artış sağlanacak ve bu da GSYİH'da %1'lik bir büyüme ile toplamda 150-200 milyar TL civarında ek bir kazanç sağlayacaktır (Yazıcı ve Düzkaya, 2016).

Endüstri 4.0 teknolojilerinin uygulanması ile birlikte üretimdeki verimliliğin önümüzdeki beş yıl içinde %18 oranında artması beklenmektedir. Bu hedefe ulaşabilmek için, üretim süreçlerinde teknolojinin artırılmasının yanı sıra iletişim teknolojilerindeki gelişmelerin de devam ettirilmesi gerekmektedir. 2020'li yıllarda, internet bağlantılı cihaz sayısının 50 milyar adeti aşacağı tahmin edilmektedir (Ege, 2013).

Bauer (2014) Endüstri 4.0'ın sektörel etkilerini inceleyerek, 2013 yılına ait sektörel katma değer verileri ile 2025'te beklenen katma değer artışlarını karşılaştırmıştır. Bu çalışmada kimya, otomotiv, makine ve tesis mühendisliği, elektrik tedarik, tarım, ormancılık ile bilgi ve iletişim teknolojileri gibi sektörler analiz edilmiştir. Endüstri 4.0'ın bu sektörlerde uygulanmasıyla, 2013 ile 2025 yılları arasında toplamda %23 oranında bir katma değer artışı öngörülmektedir.

Endüstri 4.0, işletmelere sağladığı yüksek teknoloji ile üretim işlevselliğini artırarak, artan müşteri taleplerine cevap verebilecektir. Bu da, özellikle kişisel ürün taleplerinin karşılanmasıyla ciroların artmasına yol açacaktır. Almanya'da yapılan bir çalışmaya göre, Endüstri 4.0'ın ekonomiye etkisiyle GSYİH'nin %1 oranında artması beklenmektedir ve bu da yıllık yaklaşık 30 milyar dolarlık bir katkı anlamına gelmektedir (EBSO, 2017). Diğer tahminlere göre, Endüstri 4.0 uygulamalarıyla satışlarda küresel ölçekte %2-3 artış beklenmektedir. Almanya, Endüstri 4.0'ın öncüsü olarak, bu dönüşümden yıllık 30 milyar Euro, Avrupa genelinde ise 100 milyar Euro'luk bir satış gelir artışı beklemektedir (Yazıcı ve Düzkaya, 2016).

Endüstri 4.0'a adapte olmak, işletmelerin yüksek teknolojileri uygulamaları için yatırımlar yapmalarını gerektirmektedir. Bu süreçte, firmaların yıllık cironun %1-1,5'ini Endüstri 4.0 yatırımlarına yönlendirmeleri beklenmektedir. Almanya örneğinde ise, önümüzdeki 10 yıl içinde 250 milyar Euro'luk teknoloji yatırımları yapılması öngörülmektedir (EBSO, 2017). PricewaterhouseCoopers (PWC) tarafından 2014 yılında yapılan bir araştırmaya göre, Almanya'daki firmalar, önümüzdeki 5 yıl boyunca yıllık gelirlerinin %3,3'ünü Endüstri 4.0 projelerine harcayacaklarını belirtmişlerdir (Bartodziej, 2017).

Endüstri 4.0'ın istihdama etkisi konusunda farklı görüşler bulunmaktadır. Birçok araştırmacı, Endüstri 4.0'ın istihdama olumsuz etkileri olacağına inansa da, üretim sektöründe bu teknolojilerin istihdamda %6-10 arasında bir artışa yol açacağını öngören uzmanlar da mevcuttur. Düşük vasıflı işlerde azalma beklenirken, özellikle mekanik, mühendislik ve bilgi teknolojileri gibi alanlarda yeni iş kollarının doğacağı ve bunun da istihdamı artıracığı düşünülmektedir (EBSO, 2015; Turgut, 2024).

Endüstri 4.0'a geçiş sürecinde, iş gücü oranında bir azalma yaşanabileceği yönünde yaygın bir korku bulursa da, geçmişte Endüstri 1.0'a geçişte benzer endişeler yaşanmış ve yeni teknolojilerle birlikte yeni iş kolları ortaya çıkmıştır. Aynı şekilde, Endüstri 3.0'dan 4.0'a geçişle birlikte de yeni iş kollarının doğması ve istihdamda bir artış yaşanması beklenmektedir (Aksoy, 2017). Weber (2016), 2030 yılına kadar, mevcut 490.000 meslek dalından 430.000'inin ortadan kalkacağını, 430.000 yeni meslek grubunun da doğacağını tahmin etmiştir. Dolayısıyla Endüstri 4.0'ın istihdam üzerindeki etkisinin büyük ölçüde olumsuz olmayacağı düşünülmektedir (Kabarlarlı, 2016).

Endüstri 4.0 ile firmaların verimliliği artacak, maliyetler düşecek ve satış fiyatları azalacaktır. Böylece satış hacmini artacak ve daha fazla üretim yapılması mümkün hale gelecektir. Başlangıçta işgücü ihtiyacında azalma yaşansa da, artan üretimle birlikte orta ve uzun vadede yeni işçi istihdamı sağlanacaktır. Dördüncü sanayi devrimiyle birlikte iş dünyasında köklü değişiklikler yaşanacak; iş tanımları değişecek, çalışanlar yeni meslek gruplarına yöneleceklerdir. Bu dönüşümle birlikte yeni ve önemli iş kolları doğacak, bazı sektörlerde ise işten çıkarmalar yaşanacaktır. Genel olarak, işçi verimliliği artacak ve yeni iş kolları için yeni beceriler ortaya çıkacaktır (Fırat ve Fırat, 2017).

Bazı görüşler yeni teknolojilerin istihdamı olumsuz etkilediğini savunsa dahi son 10-15 yılda bilgisayar teknolojilerindeki ve robotik sistemlerdeki gelişmelerin daha gelişmiş otomasyon sistemlerine yol açtığı, fakat gelişmelerin istihdamda yeterli artış sağlamadığı ifade edilmektedir. Güçlü inovasyonlar, yalnızca üretim ve satış sektörlerinde değil aynı zamanda finans, eğitim ve sağlık gibi farklı alanlarda da yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu durum, yeni iş kolları oluşsa da, eski işlerin yok olmasına neden olmuş ve bazı bölgelerde gelir düzeyindeki artışın duraklamasına yol açmıştır (Cerit ve Ören, 2022).

Endüstri 4.0'ın işletmelere sağladığı avantajların yanı sıra, işletmelerin karşılaşacağı zorluklar da bulunmaktadır. Dijitalleşen üretim süreçlerinin ekonomik etkilerini doğru bir şekilde analiz etmek önemlidir. İşletmelerin Endüstri 4.0 uygulamaları

sırasında karşılaşılabileceği zorluklar arasında bilgi teknolojileri güvenliği, makine ve sistem güvenilirliği, üretim süreçlerinin entegrasyonu, bilgi akışının kesilmemesi ve ürün bilgisi güvenliğinin sağlanması gibi sorunlar yer almaktadır. Çalışanların yeni sistemlere adaptasyonu, beceri eksiklikleri ve işgücü kaybı gibi zorluklar da söz konusu olabilir (Sung, 2017).

Endüstri 4.0, üretim süreçlerinde çevrimiçi bağlantılar sağladığı için veri güvenliği ve siber saldırılar gibi konular önem kazanacaktır. Üretim süreçlerinden elde edilen hassas bilgilerin korunması, işletmelerin rekabet avantajlarını sürdürmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. 2014'te veri hırsızlığı ve büyük ölçekli siber saldırılar gibi riskler, risk değerlendirme matrislerine dahil edilmiştir. 2017 yılında ise veri hırsızlığı riski öne çıkarken, büyük siber saldırılar riski gelecek 10 yıl içinde önemli bir tehdit olarak sıralanmıştır (Fırat ve Fırat, 2017; Çakıt vd., 2020).

2.1.3. Endüstri 4.0 ve uygulandığı sektörler

2.1.3.1. Otomotiv sektörü

Günümüzde otomobil üretim hatlarında robotlar, insan çalışanlara destek vererek üretim süreçlerini hızlandırmaktadır. Otomotiv sektörü, yakın gelecekte Endüstri 4.0'ın en fazla etkisini gösterdiği sektörlerden biri olma potansiyeline sahiptir. Endüstri 4.0, pek çok modern otomasyon sistemi, veri paylaşımı ve üretim teknolojisini içeren kapsamlı bir kavramdır (Endüstri 4.0 Platformu, 2019). Bu teknoloji, otomotiv endüstrisini büyük ölçüde dönüştürecek ve Ford'un bir yüzyıl önce montaj hattını tanıttığı devrimden sonraki en önemli değişim olarak kabul edilecektir (Masters, 2017).

Gelecekte otomotiv endüstrisinde tüm üretim süreçleri tamamen otomatikleşmiş araçlar tarafından gerçekleştirilecektir. Endüstri 4.0, otomotiv sektörü için büyük fırsatlar yaratacak ve bu sektör, yeni iş imkanları sunacaktır. Sağladığı hız, verimlilik, kalite artışı, maliyet etkinliği gibi avantajların yanı sıra akıllı araçlar ve hizmetlerin ortaya çıkması da beklenmektedir. Endüstri 4.0'ın otomotiv sektörüne katkıları, üretim verimliliğinin artması, üretim esnekliğinin çoğalması ve maliyetlerin düşmesi gibi önemli faydalar sağlayacaktır (Endüstri 4.0 Platformu, 2019; Göv ve Erdoğan, 2020).

Endüstri 4.0'ın otomotiv sektöründeki etkileri doğrudan hissedilmektedir. Bu alandaki yeni gelişmelerin başında bağlantılılık ve dijitalleşme gelmektedir. Otomobil üreticilerinin, bağlantılılık ve otomasyon alanlarında yatırımlar yaparak dijital dönüşümlerini içlerinde tamamlamaları gerekecektir. Günümüzde birçok otomobil üretim

tesisi bu bağlantılılık seviyesine henüz ulaşmamıştır. İnsanlar ve makineler arasındaki işbirliği çok daha uyumlu hale gelmiş fakat Endüstri 4.0'ın ilkelerini benimseyen bu endüstri, daha da ilerlemesi için sürekli gelişmektedir. Bunun yanı sıra tüketiciler, araçlarının daha yüksek bağlantı kapasitesine sahip olmasını talep etmekte ve bu talep sektörü daha ileriye taşıyan bir itici güç yaratmaktadır. Bugün, birçok otomobil üreticisi ve tedarikçisi, Endüstri 4.0 yolunda adımlar atmaya başlamış ve bunun onlara daha büyük karlılık sağlayacağı iddia edilmektedir (Masters, 2017; Çakır, 2018; Aydınbaş ve Erdinç, 2023).

Otomobil sektörü dijitalleşme sürecinde hızla ilerlemektedir. Söz konusu ilerleme yalnızca üretim süreçlerini değil, aynı zamanda satış ve pazarlama faaliyetlerini de kapsamaktadır. Gerçek zamanlı yol verilerinin analiz edilmesi, özellikle satışların etkinliğini ve pazarlama stratejilerini güçlendirmektedir. Dijital dönüşüm, geleneksel otomobil üretiminden bir adım daha ileriye giderek, mekanik araçları dijital platformlarla entegre etmeye başlamıştır. Tesla gibi firmalar, dijitalleşmenin sunduğu esneklik, üretim kapasitesi ve otomotiv sektörü için büyük potansiyel taşıyan bu yenilikleri başarıyla uygulayarak, başlangıçta ortaya çıkan şüpheleri aşmışlardır. Gelecekte dijital teknolojilerin konsept araçlardan seri üretim araçlarına kadar olan uçurumu ortadan kaldırması beklenmektedir. Otomotivdeki en büyük devrim, dijitalleşmeyle birlikte verinin gücünün daha önce hiç görülmediği bir seviyeye çıkması olacaktır. Bu veri, kullanıcılar, tedarikçiler, üretim hattı, mühendislik ve tasarım ekiplerinden toplanarak, doğrudan üretim süreçlerine aktarılmaktadır. Bu veri odaklı üretim modeli, araçları müşterilerin ihtiyaçlarına en uygun şekilde üretmeyi ve kaynakların verimli kullanımını sağlamayı hedeflemektedir (Özsoylu, 2017).

Endüstri 4.0 ile otomobil üreticilerinin dijitalleşmeye uyum sağlamak için yatırımlar yapmaları gerekmektedir. Dijital fabrikalar, bağlantılılık ve otomasyona büyük yatırımlar yapılmasını, iş akışlarını yönetmek için gelişmiş algoritmaların kullanılmasını ve tedarikçi ve müşteri verilerinin entegrasyonunu gerektirmektedir. Hızlı pazara sunum, fiziksel prototiplerin azaltılması ve test maliyetlerinin düşürülmesi için sanal tasarım ve test teknolojilerine de yatırım yapılması elzemdir. Dijital dönüşümü benimseyen otomobil üreticileri, bu dönüşüm sayesinde üretim hızını artırmayı, verimliliği artırmayı, yüksek kaliteli ürünler sunmayı, kişiselleştirilmiş hizmetler sağlamayı ve maliyetleri düşürerek karlılıklarını artırmayı beklemektedir (Masters, 2017).

İşbirlikçi robotlar, insan-robot işbirliği ile çalışan ve insanlar ile birlikte el birliğiyle görevlerini yerine getiren makineler olarak öne çıkmaktadır. Bu robotlar, çarpışma risklerini sürekli olarak hesaplayarak güvenli bir şekilde çalışabilmektedirler. Bu alandaki güvenlik standartları, EN ISO 10218 ve ISO/TS 15066 gibi uluslararası belgelerle güncellenmiş ve robotların güvenli kullanımı sağlanmıştır. İlk işbirlikçi robotlar piyasaya sürülmüş olup, Endüstri 4.0 vizyonunun gerçekliğe dönüştüğünün bir göstergesidir. Otomotiv sektörü, endüstriyel robotların en büyük müşterisi olmaya devam etmektedir. 2016 yılı itibarıyla otomotiv sektörü, dünya genelindeki robot tedarikinin %35'ini sağlamıştır (IFR, 2017; Sağtaş, 2021).

Endüstri 4.0, akıllı fabrikalar ve dijital üretim süreçleri ile üretimi köklü bir şekilde dönüştürmeyi amaçlamaktadır. Bu teknoloji, üretim süreçlerinin tamamen dijitalleştirilmesini sağlayarak üretimi yeniden şekillendirecektir. Endüstri 4.0 dijitalleşme ve veri odaklı üretim anlayışını benimseyerek sektörde devrim yaratmaktadır (Mil ve Dirican, 2018).

Otomotiv sektörü üretim ve lojistik sektörü ile doğrudan ilişkilidir. Endüstri 4.0 tarafından sunulan teknolojiler aracılığıyla otomotiv üreticileri ve tedarikçileri arasında iletişim daha verimli bir hale gelerek tedarik zincirindeki optimizasyonu desteklemiştir. Bu bağlamda otomotiv endüstrisinin robotik ve otonom teknolojiler kullanımında öncülük görevi üstlenerek diğer sektörlere de teknolojinin uygulanabilirliğini gösterdiği söylenebilir.

2.1.3.2. Sağlık sektörü

Teknolojik ilerlemelerin her ülkede farklı hızda gerçekleşmesi, yaşam süresi üzerinde de değişikliklere yol açmaktadır. 1770'li yıllarda alınan ilk verilere kıyasla, günümüzde insanların yaşam süresi iki buçuk kat daha uzun olmuştur. Almanya'da ilk yaşam süresi verisi 1875'te alınırken, Türkiye'de bu veriye 1937 yılında ulaşılabilmektedir. 1937 yılında Almanya'da ortalama yaşam süresi 62 yıl iken, Türkiye'de bu süre 35,5 yıl olarak kaydedilmiştir (Taş, 2018; Saloni vd., 2023).

2019 yılında ise Türkiye'de yaşam süresi 78,6 yıla kadar yükselmiştir (TÜİK, 2020b). 2019'da ülkemizde meydana gelen ölümlerin büyük bir kısmı sağlık sorunlarına bağlıydı. Dolaşım, solunum ve sinir sistemi hastalıkları, kanser türleri, duyu organı hastalıkları ile beslenme ve metabolizma sorunları, Türkiye'deki en yaygın ölüm nedenleri arasında yer almıştır (TÜİK, 2020c). Sağlık sorunlarına yönelik etkili çözümler

geliştirilmesi, yaşam kalitesinin artmasına ve yaşam süresinin daha da uzamasına olanak sağlayabilir (Korkmaz ve Gedik, 2020).

Türkiye, Endüstri 4.0 kapsamında sağlık sorunlarıyla mücadele etmek amacıyla çeşitli yollar benimsemiştir. Bu alandaki çalışmalar arasında, Dijital Dönüşüm Ofisi'nin yürüttüğü projelerden biri yer almaktadır. Diğer iki önemli proje ise sağlık sektöründeki teknolojik yeniliklerin sisteme entegrasyonu sayesinde gelişim göstermiştir. Beyindeki anormal alanların tespiti ve sınıflandırılması amacıyla AI algoritmalarından faydalanan bir proje başlatılmıştır. "*Türk Beyin Projesi*" adı verilen bu çalışma, Dijital Dönüşüm Ofisi'nin Yapay Zeka ve Büyük Veri Birimi ile Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Tıp Fakülteleri'nin iş birliğiyle 2020 yılında hayata geçirilmiştir. Bu projeye, Türkiye'de sağlık alanında ilk kez yapay zeka algoritmaları kullanılmaya başlanmıştır. Amacı, hastalıkların daha iyi anlaşılmasını sağlamak, bunların önlenmesine yardımcı olmak ve tanı koyma süreçlerinde doktorları desteklemektir. Sağlık personelinin iş yükü azaltılmakta, tetkiklerdeki hata oranı düşürülmekte ve MR sonuçları sadece on saniye içinde elde edilmektedir. OECD ülkelerinde, her 1000 kişiden ortalama 52'sine MR çekilirken, Türkiye'de bu oran 119'dur. Türkiye'nin en fazla MR yapılan OECD ülkesi olması nedeniyle, bu projenin sağlık sistemine büyük katkı sağlaması beklenmektedir (Himmetoğlu ve Delice, 2022).

Sağlık hizmetlerini geliştirmek amacıyla 1961 yılında Amerika'da kurulan HIMSS (Sağlık Bilgi ve Yönetim Sistemleri Topluluğu), Avrupa ve Asya'da da faaliyet göstermektedir. Bu organizasyon, EMRAM (Elektronik Tıbbi Kayıt Uyum Sistemi) adı verilen bir sistemle hastaneleri değerlendirir ve 1 ile 7 arasında bir seviyeye yerleştirir. Böylece hastanelerin teknolojik olgunluk düzeyleri tespit edilebilir (Dijital Hastane, 2014). 7. seviye, en yüksek seviye olup, hastanelerde hiçbir veri kağıt ortamında bulunmaz ve tüm veriler dijital olarak saklanır. 6. seviye ise ilaçların dijital ortamda yönetildiği, e-Reçete, barkod ve RFID gibi teknolojilerin kullanıldığı hastaneleri ifade eder (Aslan ve Güzel, 2019). 2015 yılında Türkiye'de 11 hastane bu seviyeye ulaşmışken, 2020 itibarıyla bu sayı 182'ye çıkmış ve en yüksek seviye olan 7. seviyeye ulaşan hastane sayısı 5'e yükselmiştir (HIMMS Eurasia, 2020).

Robot teknolojilerinin ameliyatlarda kullanımı, 2000'li yılların başından itibaren başta ABD olmak üzere birçok ülkede başlamıştır. Türkiye'de ise "*Da Vinci*" adlı robot sistemine 2004 yılında onay verilmiştir. Bu robot sistemi, cerrahların ameliyat yapılacak bölgeyi sanal ortamda 3D olarak on kat büyütüp görüntülemesini sağlar. Özellikle zor

ulaşılabilen veya hassas müdahaleler gerektiren durumlarda başarılı sonuçlar elde edilir ve operasyonlarda çalışan personel sayısı üçte bir oranında azalır. Teknolojinin hızla gelişmesiyle robotlar daha fazla görev üstlenmeye başlamıştır (Aslan ve Güzel, 2019; Bacaksız vd., 2020).

Sonuç itibarıyla sağlık sektöründe endüstri 4.0'ın sağladığı avantajlar tedavi süreçlerinde özelleştirme, hastaların durumunu sürekli izlenmesi ve kişisel sağlık yönetimi olarak sıralanabilir. Ayrıca söz konusu teknolojiler sağlık hizmetlerinin erişilebilir ve verimli olmasını desteklemektedir.

2.1.3.3. Tarım ve gıda sektörü

İklim değişikliği, dünya nüfusunun hızla artması, gıda israfının ve kaybının yüksek seviyelere ulaşması ve yeni hastalıkların veya salgınların ortaya çıkma olasılığı, gelecekteki gıda güvenliğini tehdit eden ve hemen çözülmesi gereken önemli sorunlardır. Dördüncü sanayi devrimi ya da Endüstri 4.0, 2015 yılından itibaren hız kazanmış ve sürdürülebilir kalkınmayı sağlamak için önemli bir itici güç olarak, küresel zorluklarla başa çıkma konusunda umut vaat eden bir gelişim olarak kabul edilmektedir. Endüstri 4.0 teknolojileri, gıda sektörünü önemli ölçüde dönüştürmüş ve çevre, ekonomi ve halk sağlığı üzerinde önemli etkiler yaratmıştır. Bu teknolojilerin her birinin ayrı ayrı önemi olmasına rağmen, sürdürülebilir çözümler ancak birden fazla teknolojinin bir araya gelmesiyle mümkün olabilmektedir. Gıda Endüstrisi 4.0 dönemi giderek gıda üretimi ve tüketim stratejilerini yeniden şekillendirirken, Endüstri 5.0'a doğru ilerlemeyi mümkün kılacak yeni zorluklar, fırsatlar ve eğilimlerle karakterize edilmektedir (Hassoun vd., 2022).

Dünya sağlık, demografi ve beslenme sorunları gibi zorlu krizlerle karşı karşıya olup, söz konusu krizleri aşmak için yenilikçi ve sürdürülebilir gıda sistemlerine ihtiyaç duymaktadır. Küresel ısınma nedeniyle iklim değişikliği, çevre kirliliği, biyolojik çeşitlilik kaybı, gıda üretimi için ormanların tahrip edilmesi, aşırı avlanma, büyük miktarda gıda israfı ve kaybı, dünya nüfusunun hızlı artışı ve yeni hastalıkların ortaya çıkma riski gibi mevcut önemli sorunlarla mücadele edilmesinin yanı sıra, küresel pandemilerde işleri daha da zorlaştırmaktadır. Buna rağmen, yeterli gıda temini için yenilikçi, sürdürülebilir ve uygulanabilir çözümler gerekmektedir. Bir diğer zorluk ise, gıda sektörünün iklim değişikliğine katkı sağladığı gerçeği ile birlikte, artan nüfusun gıda talebini karşılamak amacıyla üretimin artırılması gerektiğidir. Bu sebeple, gıda üreticileri

şu anki koşullarda sürdürülebilir teknolojilere geçiş yapma ve yüksek verimlilik standartlarını karşılamada büyük bir baskı altındadır (Şahin ve Yağcı, 2017).

Endüstri 4.0, gıda sektörüne de dahil olmak üzere birçok alanda hızla benimsenmektedir. Akademik literatür incelemesi, 2015-2022 yılları arasında "*industry 4.0 + food*" anahtar kelimeleri ile yayımlanan makale sayısının 2015'te yalnızca birkaç iken, 2022'de bu sayının 600'ün üzerine çıktığını göstermektedir. Aynı dönemde atıf sayısında da belirgin bir artış yaşanmıştır. Bu durum, Endüstri 4.0 teknolojilerinin ve dijital çözümlerin gıda sistemlerinin çevresel sürdürülebilirliği üzerinde olumlu etkiler yaratma potansiyelinin daha fazla fark edilmesiyle açıklanabilir. COVID-19 pandemisi, tüm gıda tedarik zincirinde dijital teknolojilerin daha hızlı benimsenmesini sağlamıştır. Gıda sektöründe, gıda güvenliği, kalite ve izlenebilirlik gibi değer zinciri öğelerinin iyileştirilmesi için blok zinciri gibi teknolojiler kullanılmaya başlanmıştır (Aydın, 2022).

Endüstri 4.0 dönemi, robotik ve akıllı sensörler gibi ileri düzey teknolojilerin tedarik zincirinin tüm aşamalarında kullanılmasıyla, endüstriyel üretim süreçlerinde otonom ve akıllı sistemlerin yaygınlaştığı bir dönemi işaret etmektedir. Bu robotik ve otonom sistemler, sürdürülebilir kalkınmaya katkı sağlamak ve gıda tedarik zincirinin kalitesini, üretkenliğini ve etkinliğini artırmak için önemli potansiyel taşımaktadır. Akıllı sensörler, yalnızca izlenebilirlik ve gıda kalitesini artırmakla kalmayıp, birden fazla üretim görevini aynı anda izlemek, optimize etmek ve kontrol etmek için de giderek daha fazla kullanılmaktadır. Zira, optik sensörler, gıda kalitesini ve orijinallliğini izlemek amacıyla elektromanyetik frekans değişikliklerini tespit etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Yiğitöl ve Sarı, 2020).

Dijital ikizler ve siber-fiziksel sistemler (CPS), son yıllarda Endüstri 4.0'ın önemli dijital bileşenleri olarak popülerlik kazanmıştır. Dijital ikizler, fiziksel sistemlerin bilgisayar ortamında simüle edilmesini sağlayan yenilikçi bir teknolojidir. Bu teknoloji gıda kayıplarını azaltmak, ürünlerin raf ömrünü uzatmak ve gelecekteki ürünlerin kalitesini tahmin etmek amacıyla kullanılabilir. CPS, hesaplamalı süreçlerle fiziksel süreçlerin entegrasyonunu ifade ederek Endüstri 4.0'ın temel unsurlarından biri olarak kabul edilmektedir (Özdemir ve Özdemir, 2019; Erturan ve Ergin, 2018; Özen ve Gürel, 2020).

Gıda sektörüyle ilgili Endüstri 4.0 üzerine yapılan incelemeler henüz sınırlı olsa da, bazı yeni araştırmalar bu kapsamlı konuyu farklı yönlerden ele almıştır. Zira bazı çalışmalarda termal olmayan gıda işleme teknolojilerinin, Endüstri 4.0'ın yapay zeka,

büyük veri ve akıllı sensörler kullanılarak nasıl geliştirilebileceği tartışılmaktadır. Meyve ve sebzelerin hasat sonrası süreçlerinde, gıda kayıplarını en aza indirmek için akıllı dijital çözümler ve IoT gibi araçların kullanılması önerilmektedir. Başka bir değerlendirmede ise yakın zamanda blok zincir teknolojisinin gıda güvenliğini ve izlenebilirliği artırmaya yönelik etkili bir çözüm olarak ortaya çıktığı, tüm gıda tedarik zincirindeki israf ve kaybı azaltmaya yardımcı olacağı belirtilmiştir (Turgut, 2024).

Endüstri 4.0'ın gıda sektörü üzerindeki etkilerini daha geniş bir perspektiften ele aldığımızda, yapay zeka (AI), makine öğrenimi (ML), büyük veri ve analitik, bulut bilişim, nesnelerin interneti (IoT), blok zinciri, akıllı sensörler, robotik, dijital ikizler ve siber-fiziksel sistemler (CPS) gibi teknolojilerin önemli bir rol oynadığı görülmektedir. Günümüzde, Endüstri 4.0, dijitalleşme, tam otomasyon ve internet entegrasyonu üzerine kurulu teknolojilerle tanınmaktadır. Bu devrimsel gelişme, fiziksel, dijital ve biyolojik bileşenleri birleştirerek, sektördeki tüm paydaşlara gerçek zamanlı veriler sunmayı mümkün kılmaktadır. Bunun yanı sıra, üretim süreçlerinde seri üretim otomasyonunu, özelleştirme ve bireysel müşteri taleplerine uyumu optimize ederek, sektörün verimlilik ve esneklik düzeyini artırmaktadır. Söz konusu dönüşüm, gıda tedarik zincirinde bazı aksaklıklara ve çevresel sürdürülebilirlik açısından olumsuz etkilere yol açabilmektedir (Şahin ve Yağcı, 2017; Aydın, 2022).

Gıda ve içecek sektöründe yüksek ürün çeşitliliği, sıkı güvenlik standartları ve sürekli değişen yasal düzenlemeler sebebiyle Endüstri 4.0'ın bu alanda uygulanabilirliği otomobil, havacılık ve yarı iletken sektörlerine kıyasla daha yavaş olabilmektedir. Günümüz tüketicisinin daha yoğun yaşam tarzı ve kaliteye yönelik artan bilinçlenmesi, gıda tercihlerini ve satın alma alışkanlıklarını önemli ölçüde değiştirmiştir. Bu durum gıda şirketlerinin daha hızlı yanıt verebilmesi, esnek olabilmesi ve verimli üretim sağlayarak yüksek kaliteyi sunabilmesi için Endüstri 4.0 teknolojilerine duyduğu ihtiyacı artırmaktadır. Söz konusu teknolojiler, işletmelerin iş modellerini dönüştürerek, yenilikleri teşvik etmekte ve veri analizi ile bağlantılı süreçleri daha verimli hale getirmektedir. Böylece verimlilik artışı, kişiselleştirilmiş ürün seçenekleri ve gelir artışı gibi olumlu sonuçlar elde edilebilir. Gıda sektöründeki mevcut iş gücü, üretim süreçlerinde fiziksel iş gücünün yerini giderek daha fazla yaratıcı düşünme, problem çözme ve analitik becerilerin almasıyla değişebilecektir (Sezer, 2018).

Endüstri 4.0'ın en büyük gelişmelerinden biri, sanal ve fiziksel dünyaların iç içe geçtiği akıllı fabrikaların kurulmasıdır. Bu fabrikalar, siber-fiziksel sistemler, endüstriyel

IoT ve bulut bilişim gibi uygulamalar kullanılarak üretim birimlerinin dijitalleştirilmesi ve birbirine bağlanmasını hedefler. Bu ortamda, üretim hatları otomatikleştirilmiş ve makineler birbirleriyle iletişim kurarak, üretim hatasız ve insan müdahalesi olmadan sorunları tespit edip çözebilmektedir. Tam dijitalleşmeye ulaşılmasında daha alınacak mesafeler olsa da, Endüstri 4.0 teknolojilerini kullanan birçok fonksiyon, gıda fabrikalarında uygulamaya geçirilmiştir. Bu fonksiyonlar arasında, kurumsal kaynak planlaması (ERP), üretim yürütme sistemleri (MES), kalite güvence, araştırma ve geliştirme ve tesis yönetimi gibi departmanlar yer alır. Nitekim üretim sürecinde makineler mevcut durumu izleyip analiz edebilir, sapmaları tespit edebilir ve operatör müdahalesine gerek kalmadan düzeltici işlemleri tetikleyebilir. Yapay zeka, makinelerin topladığı verilerle geçmiş deneyimlerden öğrenmesini ve çevreden gelen yeni verilerle uyum sağlamasını mümkün kılar (Turgut, 2024).

Bu bağlamda Endüstri 4.0 teknolojileri tarımda üretim süreçlerini dijital hale getirerek gıda sektöründe daha hızlı ve kaliteli ürün teminini mümkün kılmaktadır. Nitekim tarım sektörü gıda üretiminden lojistik ve dağıtım sektörlerine değin geniş bir ağ ile sürekli etkileşim içerisindedir.

2.1.3.4. Enerji ve altyapı sektörü

Türkiye enerji ihtiyacını büyük ölçüde dışa bağımlı olarak karşılamaktadır. Zira petrol, kömür ve doğal gaz gibi birincil enerji kaynaklarında Almanya gibi ülkelere benzer şekilde dışa bağımlılık söz konusudur. Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi hızla artmıştır. İklim değişikliğiyle mücadele kapsamında sera gazı emisyonlarını azaltmak amacıyla yapılan çalışmalar, enerji sektörünün yenilenebilir enerjiye yönelmesinin başlıca nedenlerinden biridir (Tutar vd., 2018).

Türkiye'nin enerji üretiminde kullanılan ana kaynakların yıllık dağılımı incelendiğinde; 1960 yılından itibaren en fazla enerji üretiminin hidroelektrik santraller (HES) aracılığıyla sağlandığı görülmektedir. Bunun ardından taş kömürü ve linyit yer almaktadır. 1980'lerde ise enerji üretimi sıralamasında HES, linyit, fuel-oil, motorin ve taş kömürü öne çıkmıştır (TEİAŞ, 2020). 1985 yılı itibariyle doğal gazın da enerji üretiminde yer aldığı gözlemlenirken, 2000'lerde kömür ithalatı da başlamıştır. 2000'te ise enerji üretiminde HES, linyit, doğal gaz ve fuel-oil en fazla tercih edilen kaynaklar olmuştur (TEİAŞ, 2020).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ise 2000'lerin başlarından sonra artmaya başlamıştır. Rüzgâr enerjisinin 2008'de kullanılmaya başlandığı, güneş enerjisinin ise 2014'te enerji üretiminde kullanılmaya başlandığı görülmektedir. 2019'da, enerji üretimi için en fazla kullanılan kaynaklar sırasıyla HES, doğal gaz, linyit, taş kömürü, rüzgâr ve güneş enerjisi olmuştur. Yenilenebilir enerjiye yapılan yatırımlar sayesinde bu kaynakların kullanım oranı hızla artmıştır. Zira, 2008 yılına göre rüzgâr enerjisinin kullanımı 21 kat artarak %8 paya, 2014 yılına göre ise güneş enerjisinin kullanımı 150 kat artarak %7 seviyesine çıkmıştır. Bu trendin gelecekte de artarak devam etmesi beklenmektedir (TEİAŞ, 2020).

Endüstri 4.0 dönüşümü, enerji sektörünü derinden etkilemektedir. Söz konusu dönüşüm ile enerji sektöründe teknolojik gelişmeler ve IoT teknolojilerinin kullanımı hız kazanmaktadır. Bu yenilikler sektöre olan yatırımları artırmakta, güneş ve rüzgâr enerjisi sistemlerinin yanı sıra enerji depolama birimlerinin maliyetlerinin düşmesine yol açmaktadır. Daha fazla veri toplanmaya başlanması, enerji işletmelerinin operasyonlarını daha verimli bir şekilde yönetmesini, güvenlik risklerini azaltmasını ve genel operasyonel verimliliği artırmasını sağlamaktadır. Akıllı şebeke ölçüm cihazları sayesinde enerji talebindeki değişiklikler anlık olarak izlenebilmekte ve bu sayede enerji planlaması daha doğru bir şekilde yapılabilmektedir (Osman, 2019).

Yenilenebilir enerji kullanımını artırma, sera gazı emisyonlarını düşürme ve yeni iş fırsatları yaratma amacıyla 2016 yılında Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı (UNDP) kapsamında bir proje başlatılmıştır. "*Orman Köylerinde Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi için Sürdürülebilir Finans Mekanizması Projesi*" adı verilen bu program, köylerde güneş enerjisinin yaygınlaştırılmasını ve Türkiye'de güneş enerjisinden elde edilen enerji oranının artırılmasını hedeflemektedir. Orman ve Su İşleri Bakanlığı ve Uluslararası Güneş Enerjisi Topluluğu gibi büyük paydaşların katkı sağladığı bu proje, enerji sistemlerinin teşvikini ve finansmanını desteklemeyi amaçlamaktadır. Orman köylerinde kurulan tesislerin yönetimi ve sürdürülebilirliği yerel çalışanlar tarafından sağlanacaktır. Bu projeye Türkiye'nin güneş enerjisi kapasitesine %1'lik bir katkı sağlanması beklenmektedir (UNDP, 2016).

2020 yılında, Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından "Stratejik Plan 2019-2023" başlıklı bir beş yıllık enerji dönüşüm planı yayımlanmıştır. Bu plan kapsamında, 2023 yılına kadar yenilenebilir enerji kullanım oranının %65'e çıkarılması, doğal gaz ve elektrik altyapısının güçlendirilmesi, petrol ve doğal gaz arama

faaliyetlerinin hızlandırılması hedeflenmiştir. Teknolojik dönüşümü hızlandırmak için araştırma ve geliştirme (AR-GE) çalışmalarına ağırlık verilecek ve arıza sıklığının azaltılmasıyla elektrik sektöründeki teknolojik dönüşüm sağlanacaktır. Bunun yanı sıra, çalışanların yetkinliklerinin artırılması, bulut bilişim, dijital ortamlar ve yönetim sistemlerinin geliştirilmesi gibi çeşitli iyileştirmeler de planlanmaktadır. Bunun yanında, madencilik sektöründe dijital dönüşüm için gerekli altyapının kurulması da önemli hedeflerden biridir. Birçok gelişmiş ülke, nükleer enerji kullanımını sonlandırmayı planlarken Türkiye, nükleer enerji üretimini artırmayı amaçlayan çalışmalar yapmaktadır (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2020).

Endüstri 4.0'ın sunduğu teknolojilerin enerji sektöründeki yansımaları ele alındığında enerji üretiminde sürdürülebilirlik ve verimliliği desteklediği görülmektedir. Bunun yanı sıra çevresel etkilerin azaltılmasında bu teknolojilerin doğrudan bir rolü bulunmaktadır.

2.1.3.4. Ulaşım sektörü

Tarihsel süreç incelendiğinde; ulaşım araçlarının gelişiminin insanlık tarihinin şekillenmesinde büyük rol oynadığı görülmektedir. Gemiler, trenler, otomobiller ve uçaklar, uzak mesafeleri birbirine yakınlaştırarak dünyayı daha erişilebilir kılmaktadır. İngiltere'de tren saatlerinin düzenlenmesi ihtiyacı, zamanın küresel bir referans noktası olarak Greenwich gözlemevinin kabul edilmesine yol açmıştır (Royal Museums Greenwich, 2021).

Henry Ford, montaj hattı sistemini kullanarak otomobil üretimini devrim niteliğinde değiştirmiş ve bu yenilik birçok sektörü yeniden yapılandırmıştır. Otomotiv sektörü, dijitalleşme ve teknolojik gelişmelerde öncülük eden alanlardan biri olmuştur. Mobilitiyi daha hızlı ve verimli hale getirmek için sürekli olarak Ar-Ge çalışmaları yapılmaktadır. Çevreyi koruma gereksinimi doğrultusunda ulaşım araçlarının daha çevre dostu hale getirilmesi amacıyla yıllar içinde çeşitli iyileştirmeler yapılmıştır (Tekin vd., 2018).

Uygulanan çevre dostu politikalar sayesinde emisyon oranları sürekli olarak azalmaktadır. Özellikle son on yıl içinde elektrikli araçlar üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Gelişmiş ülkelerde önümüzdeki yirmi yıl içinde kara taşıtlarının büyük kısmının elektrikli hale gelmesi beklenmektedir. Bu doğrultuda Türkiye de, yerli

otomobil üretimi için çalıştığı TOGG modelinde enerji kaynağı olarak elektrikli motor kullanmayı tercih etmiştir (Özdemir ve Özgüner, 2018; Mercimek ve Geçkil, 2021).

2018 yılında yerli otomobil üretimi amacıyla kurulan TOGG, Türkiye'nin ilk yerli otomobil üreticisi olarak faaliyet göstermektedir. İlk araçların 2022'nin sonunda piyasaya sürülmesi beklenmektedir. Bu araçlar, lityum iyon pillerle çalışması planlanan ve otonom sürüş teknolojisine sahip olan gelişmiş otomobillerdir. Üretim için inşa edilen fabrikanın Endüstri 4.0 dönüşümüne örnek teşkil etmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla, gerçek zamanlı verilerin toplanıp analiz edildiği bir üretim ağı üzerinde çalışmalar sürdürülmektedir. Akıllı fabrika modeline sahip olacak bu tesisin, çevreye duyarlı üretim yaparak, uçucu organik bileşen salınımını minimum seviyeye indirmesi hedeflenmektedir. Bu sayede, fabrika Avrupa'nın en temiz üretim tesislerinden biri haline gelecektir. 2023 yılına kadar toplam 4 bin 300 kişi istihdam edilmesi planlanmakta ve otomobillerin pillerinin Türkiye'de üretilmesi için çalışmalar devam etmektedir (TOGG, 2020).

Otonom sürüş teknolojisi yalnızca otomobillerle sınırlı kalmamış, aynı zamanda kamyonlar, trenler, metrolar ve uçaklar için de geliştirilmektedir. Türkiye'de, sürücüsüz ulaşımın mümkün hale gelmesi amacıyla İstanbul'da 2017 yılında ilk sürücüsüz metro hattı hizmete girmiştir. 2018 yılında yapılan bir araştırma, bu hattın dünya genelinde sürücüsüz metro hatları arasında yolcu taşıma kapasitesi açısından üçüncü, Avrupa'da ise birinci sırada yer aldığını ortaya koymuştur (Yüksekbilgili ve Çevik, 2018).

Sonuç itibarıyla endüstri 4.0 ulaşım sektöründe dijital dönüşüm sürecine dahil ederek verimliliği artırmayı, süreçlerin güvenli, hızlı ve sürdürülebilir hale getirilmesini amaçlamaktadır. Daha açık bir ifadeyle ulaşım sektöründe teknolojik entegrasyonlar akıllı ulaşım sistemleri başta olmak üzere otonom araçlar, yapay zeka ve veri analitiği ile şekillenmektedir.

2.2. Sektörel Üretim Süreçleri / Sistemleri

Endüstri 4.0 beraberinde üretim süreçlerinde kullanılan teknolojiler büyük bir dönüşüm geçirmiştir. Söz konusu sistemlerin üretim sürecine katkılarını incelemek önemlidir. Çalışmanın bu bölümünde dönüşüm sürecinde yer alan teknolojilerinin sektörel anlamda etkinliğini gözlemlemek üzere literatürdeki çalışmalar incelenecektir.

2.2.1. Akıllı üretim sistemleri

Dünyanın lider sanayileşmiş ülkelerinin çoğu, küresel rekabette geri kalmamak için ileri düzey üretim, yenilik ve tasarımı teşvik etmek amacıyla ulusal girişimlere büyük yatırımlar yapmıştır. Yatırımların büyük kısmı, Endüstri 4.0 gibi akıllı üretim sistemlerinin ve akıllı fabrikaların norm haline geldiği bir geleceğe ulaşmayı hedeflemektedir. Endüstri 4.0, yapay zeka, üç boyutlu yazıcılar ve uzay teknolojisi gibi alanlardaki gelişmelerin ardından, tüm nesnelerin birbirleriyle internet aracılığıyla etkileşimde bulunabildiği bir akıllı üretim modelini ifade etmektedir. Bugün, bilgisayarlar, telefonlar, çamaşır makineleri ve hatta lambalar internet üzerinden kontrol edilebilmektedir. Endüstri 4.0 etkileri fabrikalarda ve evlerde de kendini göstermektedir (Aksoy, 2017, Öncül ve Ateş, 2020).

Endüstri 4.0'ın önemli bileşenlerinden biri, akıllı teknolojilerle donatılmış ve insan müdahalesi olmadan çalışan, "*karanlık fabrikalar*" olarak adlandırılan üretim alanlarıdır. Fabrikalarda üretilen ürünlerin hatalı çıkmasının en büyük nedenlerinden biri, çalışanların dikkatsizliği veya yetersizliği olabilmektedir (Karacaer, 2023). Bu sebeple çalışan sayısının en aza indirilmesi, hatalı ürünlerin oranını azaltmayı amaçlamaktadır. Çin'deki ilk karanlık fabrikada cep telefonu modülleri üretilirken, robot kullanımı sayesinde işçi sayısı %90 oranında azalmış ve kusurlu ürün oranı %25'ten %5'e kadar düşürülmüştür. Endüstri 4.0'ın temel bileşenleri arasında yer alan CPS (Siber Fiziksel Sistemler), IoT (Nesnelerin İnterneti) ve CBM (Koşul Tabanlı Bakım) birbiriyle yakın ilişki içindedir. CPS, IoT üzerinden iletişim kurarak, makineler, insanlar ve kaynaklar arasında merkeziyetsiz bir üretim sistemi kurmayı mümkün kılmaktadır (Kayar vd, 2018).

Sistem aracılığıyla üretim araçları birbirleriyle doğrudan iletişim kurarak, akıllı fabrika adı verilen ortamları oluşturur. Fabrikalarda, ürünler üretim süreçleri boyunca kendi yollarını bağımsız olarak bulur ve her zaman kolayca tanımlanabilir ve takip edilebilir. Böylece dışarıdan müdahaleye gerek kalmadan üretim süreci işler. Akıllı fabrikalar üretimin karmaşıklığını insan yönetimine uygun hale getirirken, üretim süreçlerinin sürdürülebilir, karlı ve şehrleşmiş çevrelerde uygulanabilir olmasını sağlar. Çalışan verimliliği de bu dönüşümden etkilenir (Duman ve Karğın, 2021: 101).

Akıllı fabrikalarda, sensörler aracılığıyla iş gücü ihtiyacı algılanmakta, uzak mesafelerdeki diğer üretim araçlarıyla internet üzerinden iletişim kurularak, üretim bilgileri bulut sistemlerinden alınan büyük veriden çekilebilir. Sistemde, üretim araçları birbirleriyle sürekli iletişim halinde olup, üretim sürecini kontrol edebilmek ve bakım

yapabilmek için makineleri öngörebilecek kadar bilinçli olurlar. Bu sistemlerde, zaman kaybı ve hatalı ürün oranı en aza indirgenmiş olur. Ürün tasarımı, üretim planlaması, mühendislik süreçleri ve servisler gibi pek çok üretim aşaması, modüler bir şekilde simüle edilecektir (Şekkeli ve Bakan, 2018).

Akıllı fabrikalar, Endüstri 4.0'ın en önemli özelliklerinden biri olarak, ağ tabanlı üretim sistemlerinin dikey entegrasyonunu temsil etmektedir. Akıllı fabrikalar, akıllı nesnelere ve büyük veri analiziyle birleşerek, yüksek esneklik sağlayacak şekilde dinamik olarak yeniden yapılandırılabilir. Söz konusu analizler, küresel geri bildirim ve koordinasyon sağlayarak yüksek verimlilik elde edilmesini mümkün kılacaktır. Akıllı fabrikalar, özelleştirilmiş ve küçük ölçekli üretimlerin verimli ve karlı bir şekilde yapılabilmesini sağlamak için bu verileri etkin bir şekilde kullanmaktadır. Akıllı fabrikaların yapısı, çift kapalı çevrimli bir sistem gibi işleyebilir; bir döngü fiziksel kaynaklardan ve bulut sistemlerinden oluşurken, diğer döngü ise denetleyici kontrol terminallerinden ve bulutlardan oluşur (Wang, 2016; Yıldız, 2018).

Endüstri 4.0 yaklaşımı, genel hatlarıyla üç ana unsurla tanımlanabilir;

- Tüm değer üretim ağı boyunca yatay entegrasyon,
- Ürün yaşam döngüsünün her aşamasında uçtan uca mühendislik
- Dikey entegrasyon ve ağ tabanlı üretim sistemleri.

Yatay entegrasyon, ürün yaşam sürecinin farklı aşamalarındaki ve birbirine yakın ürün yaşam döngülerindeki değer yaratma süreçlerinin, şirket içi ve şirketler arası akıllı bağlantılarla dijitalleşmesini ifade eder. Ürün yaşam döngüsü süresince uçtan uca mühendislik ise, bir ürünün hammadde temininden üretim sistemlerine, kullanım sürecinden ürünün sonuna kadar tüm aşamalarında akıllı bağlantıların ve dijitalleşmenin sağlanmasını tanımlar (Alçın, 2016).

Dikey entegrasyon ve ağ tabanlı üretim sistemleri ise, üretim istasyonlarından üretim hücrelerine, hattı ve fabrikaları kapsayan farklı seviyelerdeki değer yaratma modüllerindeki akıllı bağlantılar ve dijitalleşmeyi ifade eder. Akıllı çapraz bağlantı ve dijitalleşme, bulut tabanlı bilgi ve iletişim teknolojilerinin kullanılmasıyla uçtan uca çözümlerin uygulanmasına olanak tanır. Üretim sistemlerinde akıllı çapraz bağlantı, kendi kendini organize eden ve merkeziyetsiz çalışan siber-fiziksel sistemlerin (CPS) uygulanması ile gerçekleşir. Bu sistemler, veri toplama için sensörler ve fiziksel süreçleri etkilemek için aktüatörler gibi mekatronik bileşenlere dayanır (Çakır, 2017).

Endüstri 4.0'ın genel perspektifi, uçtan uca mühendislik boyutu ve yatay entegrasyonu sağlamaktır. Çapraz bağlantılı ürün yaşam döngüleri, Endüstri 4.0 değer yaratma ağlarının merkezindeki en önemli unsur olarak öne çıkmaktadır. Söz konusu bakış açısı, güçlü bir ürün yaşam döngüsü perspektifine dayanarak, Endüstri 4.0'ın sağladığı entegrasyon ve dijitalleşmenin değer zincirinde nasıl merkezi bir rol oynadığını göstermektedir (Uslu, 2023).

Üretim sürecini otomatik ve verim ne hale getiren akıllı üretim sistemleri sensörler ve yapay zeka gibi teknolojilerle entegre olarak üretim hatlarının verimli şekilde yönetimini mümkün kılmaktadır. Bu sistemler esnekliği artırarak hataların öngörülmesini, tespit edilmesini ve önlenmesini sağlamaktadır. Böylece üretim süreci daha verimli bir hale gelecektir.

2.2.2. Robotik ve otomasyon sistemleri

Endüstri 4.0 devriminde öne çıkan en önemli araçlardan biri robotlardır. İnsan kaynaklı hataların ortadan kaldırılmasında ve üretim süreçlerinde giderek daha yaygın hale gelen robotlar, bu dönüşümün en kritik unsurlarındandır. İnsanlarla birlikte çalışabilen, verileri analiz edebilen ve duruma göre en uygun kararı verebilen yapay zekaya sahip robotlar, bu evrimin temel bileşenleridir. General Motors'un liderliğinde geliştirilen ve insanlarla iş birliği yapan bu robotlar, "*cobot*" yani kollaboratif robotlar olarak adlandırılmaktadır. Bu tür robotlar, insanlarla uyum içinde çalışabilen, hatasız üretim yapabilen ve insanlarla etkileşimde bulunabilen robotlar olarak tanımlanabilir. Günümüzde farklı robot türlerinin üretim hatlarında ekstra güvenlik önlemleri olmaksızın kullanılmaya başlanması, bu robotların insanlarla birlikte çalışmaya uygun hale geldiğini göstermektedir. Kollaboratif robotların gelişimindeki ana hedef, bu robotları insanlarla tam anlamıyla uyum içinde çalışabilecek şekilde tasarlamaktır (Özdem ve Bora, 2022).

Robot teknolojisinde önemli gelişmeler kaydedilmiştir; bunun en güzel örneği, endüstriyel üretim süreçlerinde robotların verimliliklerini artırabilmek amacıyla insan gücüyle entegre bir şekilde çalışmalarınıdır. İnsan ve robot etkileşimindeki bazı zorluklar, özellikle fiziksel yakınlık ve zaman sınırlamaları gibi faktörler, bu iş birliğinin tasarım ve planlama aşamalarında sorunlara yol açabilmektedir. Üretim sahalarında robot sistemlerinin kullanım alanları giderek genişlemektedir. İnsanların ve robotların farklı güçlü yönlerinden yararlanarak robotları iş gücüne entegre etmek kaçınılmaz bir ihtiyaç haline gelmiştir. Bu entegrasyon aynı zamanda insan ve robot arasındaki zamanlamayı gerektiren bir iş birliği sürecini ortaya çıkarmıştır. Kobotlar, yalnızca bir robotun tek

başına çalışmasından çok daha verimli sonuçlar ortaya koymakta ve insanla entegre çalışarak üretim verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır (Türedi ve Bircan, 2016; Korkmaz ve Doğan, 2023).

Robotik ve otomasyon sistemleri, endüstri 4.0 sürecinde üretim hatlarında fiziksel ve dijital süreçlere doğrudan entegre edilebilmektedir. Dolayısıyla üretim sürecinde insan müdahalesini en aza indirerek verimliliği artıran ve hata payını azaltan teknolojileridir.

2.2.3. Dijital ikiz ve simülasyon teknolojileri

Son yıllarda büyük veri, yapay zekâ, blok zinciri, nesnelerin interneti, dijital ikiz gibi yeni teknolojiler hızla gelişmektedir. Bu gelişmelerle birlikte akıllı işletmeler, kripto para birimleri, otonom araçlar ve sürdürülebilirlik gibi kavramlara olan ilgi de artmaktadır (Deng vd., 2021).

Dünya genelinde Endüstri 4.0 vizyonu ile büyük bir dönüşüm yaşanmaktadır. Bu dönüşümün etkisiyle eğitim, savunma ve üretim gibi alanlarda önemli değişiklikler yaşanmaktadır. Özellikle sanayi ve üretim sektörü bu dönüşümden en fazla etkilenen alanlar arasında yer almaktadır. Endüstri 4.0, sanayinin akıllı hale gelmesi ya da üretimde bilgi ve iletişim teknolojilerinin entegrasyonunun artması olarak tanımlanmaktadır (Faller ve Feldmüller, 2015; Basl, 2016).

Üretim sektörü, Endüstri 4.0 adı verilen dördüncü sanayi devrimi çerçevesinde hızla değişim göstermektedir. İşletmeler, bu dönüşümü yakalayabilmek için Endüstri 4.0 teknolojilerini benimsemeye başlamaktadır. Bu teknolojiler aracılığıyla elde edilen veriler, gerçek zamanlı izleme, tahmin, karar verme ve adaptasyon gibi stratejik kararlar alınmasına olanak tanımaktadır. Böylece işletmeler, daha kısa ürün geliştirme süreleri, talebe göre ürün özelleştirme, üretim hattının esnekliğinin artırılması, ademi merkezîyetçilik ve kaynak verimliliği gibi avantajlar elde etmektedir. Yaşanan bu gelişmeler ile üretim sektörü, tüketicilerin beklentilerine ve sorunlarına çözüm sunan bir yapıya dönüşmektedir (Zhu vd., 2021).

Değişen üretim anlayışı, işletmeleri sadece yalın olma değil, aynı zamanda çevik olma noktasında da zorlamaktadır. Verinin ve bilginin petrol kadar değerli olduğu günümüzde, verilerden anlamlı sonuçlar çıkarmak ve bunu hızlı ve verimli bir şekilde yapmak gerekmektedir. Verilerin anlamlı hale dönüştürülmesi, karar alma ve üretim süreçlerinde bu bilgilerin kullanılması, kaliteli bir üretim süreci yaratmakta ve işletmeler için önemli bir rekabet avantajı sağlamaktadır (Apillioğulları, 2019).

Dijital ikiz ve siber-fiziksel sistemler (SFS), akıllı üretim süreçlerinde ürün tasarımı, bilgi odaklı üretim, isteğe bağlı hizmetler ve iş uygulamaları gibi alanlarda gelecekte büyük katma değer sağlayan ve giderek daha fazla kullanılan iki önemli teknoloji olarak öne çıkmaktadır (Lee vd., 2021). Hatta dijital ikiz, Deng vd. (2021) göre dijital dönüşümün kaçınılmaz bir hedefidir.

Dijital ikiz, akıllı üretim ve Endüstri 4.0'ı gerçekleştirmek adına umut vaat eden teknolojilerden biridir. Bu teknoloji bazen geleneksel modelleme ve simülasyon yöntemleriyle karıştırılabilmektedir. Dijital ikiz, diğer teknolojilerden farklı olarak fiziksel ve sanal dünyaların yüksek entegrasyonu ile gerçek zamanlı verilerle etkileşime giren, dinamik bir sanal modeldir. Literatürde, dijital ikizin yüksek kaliteli bir uygulamasına henüz rastlanmamaktadır (Singh vd., 2021).

Yapılan araştırmalar, dijital ikiz uygulamaları bağlamında, sıklıkla SFS, büyük veri veya nesnelerin interneti (IoT) gibi teknolojilerin kullanımını incelemiştir (Tao vd., 2019; Singh vd., 2021). Buna karşın Endüstri 4.0, birden fazla teknolojik bileşenin toplamından oluşmaktadır. Tam anlamıyla Endüstri 4.0'a geçiş, birçok teknolojinin kullanılması ve bu teknolojilerin işletme süreçlerine entegre edilmesiyle mümkündür (Meissner vd., 2017). Özellikle siber-fiziksel sistemler, nesnelerin interneti, büyük veri, dijital ikiz gibi teknolojiler, Endüstri 4.0 için vazgeçilmez unsurlar arasında yer almaktadır

İşletmeler için incelendiğinde; bu teknolojilerin tek başına ya da bir arada kullanılması, dijital ikizin tam anlamıyla uygulanamamasına yol açabilmektedir. Ayrıca işletmelerin karar destek sistemlerine ve yapay zekâ uygulamalarına yeterince önem vermemeleri, dijital ikizin uygulamaya konulamamasına sebep olabilmektedir. Yöneticilerin, karar verme aşamasında kullanacakları verilere ulaşabilmesi büyük bir öneme sahiptir. Bu aşamada yöneticilerin bilginin organize edilmesi ve sonuçların modellenmesi konusunda destek alabilecekleri bilgisayar tabanlı sistemler olan karar destek sistemlerinin kullanılması önerilmektedir (Dönençark ve Tecim, 2020; Yükçü vd., 2020).

Gerçek zamanlı verilerin elde edilmesi, dijital ikizlerin hayata geçirilmesinin ilk adımıdır. Başarılı bir dijital ikiz uygulaması için fiziksel ve sanal dünyaların entegrasyonunun gerçek zamanlı, senkronize ve tutarlı olması gerekmektedir. İşletmelerde temel süreç verileri yanlış, eksik ve tutarsız olabilmektedir. Üretim süreçlerinde sıklıkla sipariş eklemeleri, görev değişiklikleri, zamanlama hataları ve

arızalar nedeniyle veriler tutarlılık göstermemektedir. Mevcut tüm bilgilerin düzenlenmesi ve etkin bir şekilde kullanılması, düzenli ve çevik bir üretim yapısının oluşturulması için büyük bir zorluk teşkil etmektedir (Deng vd., 2021).

Veriler doğru ve tutarlı bir şekilde toplanmadığında, dijital ikizin etkin bir şekilde kullanılması mümkün olmamaktadır. Bu sebeple, dijital ikiz uygulamalarının pratikte hala oldukça sınırlı olduğu ve literatürde dijital ikiz konusunda önemli bir boşluk bulunduğu gözlemlenmektedir. Ülkemizde verimlilik ve dijital ikiz ilişkisine odaklanmış veri temelli bir çalışma henüz bulunmamaktadır (Güner, 2018).

Dijital ikiz kavramı, ilk kez 2003 yılında Grieves tarafından ürün yaşam döngüsü yönetimi bağlamında ortaya atılmıştır (Grieves, 2014). Bu kavram, ürün yaşam döngüsü yönetimi için bir kavramsal ideal olarak kabul edilmiştir. Daha sonra Grieves, 2006 yılında “*Bilgi Yansıma Modeli*” terimini denemiş ve 2010 yılında ise “*Dijital İkiz*” terimini kullanmaya başlamıştır. Zaman içerisinde dijital ikiz düşüncesi bir ürün yaşam döngüsü yönetim aracı olmaktan çıkıp dijital bir platforma dönüşmüştür. Bu evrimsel süreç, kavramın iki ana bileşenini ortaya çıkarmıştır. Birincisi, tam ürün yaşam döngüsü entegrasyonu, ikincisi ise bilişsel teknolojiler aracılığıyla dinamik verilerin üretimi ve yönetimi (Öztürk, 2021). Grieves'e (2019) göre, dijital ikizin kavramsal yapısı, üç ana bileşenden oluşmaktadır;

- Fiziksel dünyada bir ürünün varlığı,
- Siber dünyada bu fiziksel ürünün sanal karşılığı,
- Fiziksel ve siber dünyalar arasındaki veri ve bilgi akışı.

Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (ÜYDY), üretim sürecinin başlangıcından sonlanma aşamasına kadar etkili bir şekilde yönetilmesi gereken bir faaliyet alanıdır. ÜYDY, tüm üretim süreci boyunca uygulama, insan kaynağı, veri, iş yöntemleri ve süreçlerin entegrasyonu ile işbirlikçi bir ortam oluşturur ve farklı disiplinler, fonksiyonlar ve uygulamalar arasındaki bağımsız süreçleri birleştirir. Dolayısıyla dijital ikiz, fiziksel bir sistemin dijital bir yansıması olarak karşımıza çıkmaktadır (Sayer & Ülker, 2014).

Dijital ikiz kavramı ilk kez bilimsel anlamda 2010 yılında NASA tarafından kullanılmıştır (Glaessgen ve Stargel, 2012). NASA'ya göre dijital ikiz, bir veya birden fazla fiziksel sistemin en doğru şekilde temsil edilmesi için kullanılan fiziksel modeller, sensör verileri ve geçmiş verilerle oluşturulmuş yüksek ölçekli bir simülasyondur. Bu simülasyonda, sistemin tüm yaşam döngüsü boyunca toplanan veriler dijital ikize

aktarılmaktadır ve ana boyutlar olarak zaman ve ayrıntı düzeyi belirginleşmektedir. NASA'nın tanımına göre dijital ikizin dört ana fonksiyonu şunlardır (Shengli, 2021);

Tahmin: Dijital ikiz, fiziksel ürünün gelecekteki durumu ve performansını öngörmek için kullanılır. Tahminler, işletmelerin belirsizliklerini azaltmakta yardımcı olur. Örnek vermek gerekirse Uber'in taksilerinin varış saatinin belirsizliğini ortadan kaldırarak müşteri memnuniyetini artırması gibi, Singapur Kara Trafik Kurumu ise geçmiş trafik verileriyle anlık verileri kullanarak trafik akışlarını doğru şekilde tahmin eder ve bunun kesinliği %85'in üzerine çıkar (Grieves, 2016; Parmar vd., 2020).

Güvenlik: Dijital ikiz teknolojisi, sistemin sürekli izlenmesi sayesinde güvenilirliği artırır. Bu teknoloji, ürün yaşam döngüsü boyunca farklı operasyonları optimize etmek ve geliştirmek için büyük bir potansiyel sunar (Zhu vd., 2021).

Teşhis: Dijital ikiz, yaşam döngüsü süresince fiziksel varlık hakkında bilgi toplar ve proje süreçlerini sürekli izler. Bu sayede, olası arızalar doğru bir şekilde tahmin edilebilir, geri besleme yapılabilir ve uyarılar doğrultusunda aksiyon alınabilir (Öztürk, 2021).

Sorgulama: Dijital ikiz, mevcut ve geçmiş verilere dayanarak sorgulamalar yapılabilir. Fiziksel bir ürünle benzer süreçler ve örnekler diğer işletmelerde karşılaştırılabilir (Grieves, 2016).

NASA ve ABD Hava Kuvvetleri, dijital ikiz teknolojisini ilk kez araçlarının güvenliğini sağlamak amacıyla kullanmış, aracın sisteminden, bakım geçmişinden ve filo verilerinden yararlanarak yüksek doğrulukta simülasyonlar yapılmasına olanak sağlamıştır (Tao vd., 2018). Dijital ikiz kavramı, fiziksel bir ürünün sanal bir temsilini ifade eden bir teknoloji olarak tanımlanabilir. Dijital ikiz farklı veri, model ve bilgilerin bir kombinasyonudur. Deng vd. (2021), dijital ikiz kavramını şu özelliklerle tanımlar;

- Fiziksel nesnelerin mikro düzeyden makro düzeye kadar tüm verilerini birleştirir,
- Fiziksel ürünün yaşam döngüsü boyunca var olur, gelişir ve sürekli bilgi biriktirir,
- Fiziksel nesnelerin tanımlanmasını ve optimize edilmesini sağlar.

Sıralanan özellikler doğrultusunda dijital ikiz, dijital temsiller oluşturmak için üç boyutlu modelleme ve sensörler kullanan varlıkların dijital kopyaları olarak ifade edilebilir. Üretim sektörü açısından dijital ikiz, fiziksel bir ürünün daha kaliteli, ekonomik, esnek ve yenilikçi bir şekilde tasarlanıp üretilmesi için kullanılan bir teknoloji olarak tanımlanabilir (Parmar vd., 2020).

Dijital ikiz yeni bir kavram değildir. Otuz yılı aşkın bir süredir modelleme ve simülasyon yöntemleri olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda Endüstri 4.0 teknolojileri olan Nesnelerin İnterneti (IoT), büyük veri ve gerçek zamanlı verilerin artan kullanılabilirliği, yeni nesil dijital ikizlerin gelişmesini sağlamış ve bu teknolojinin bilinirliğini artırmıştır (Parmar vd., 2020). Dijital ikiz, fiziksel olarak üretilmiş bir ürünü, en küçük parçasından en büyük parçasına kadar temsil eder ve sanal varlıkları geliştirmek için donanım, yazılım ve IoT teknolojilerini derinlemesine entegre eder. Dijital ikizler üç ana bölümden oluşur. Bunlar fiziksel ürünler, sanal ürünler ve bunları birbirine bağlayan bağlantılardır (Grieves ve Vickers, 2017)

Günümüzde dijital ikiz teknolojisinin en yaygın kullanımı, fiziksel nesnelerin ve süreçlerin gerçek zamanlı olarak sanal ortamda izlenmesidir. Zira, akıllı bir taşıma bandı, sanal temsil kullanarak, sistemin gerçek durumlarını daha iyi anlamayı ve ölçülmesi güç olan değişkenleri tahmin etmeyi mümkün kılmaktadır. Sanal temsiller, ürünlerin yaşam döngüsü boyunca farklı kaynaklardan gelen geniş veri setlerini depolar. Veriler, karar alma süreçlerini geliştirmek için sürekli olarak güncellenir ve görselleştirilerek, mevcut ve gelecekteki koşullar hakkında bilgiler sağlanır. Dijital ikizler, siber-fiziksel sistemlerle ilgili akıllı nesnelerin geliştirilmesine önemli ölçüde katkıda bulunmuştur. Bu katkı, fiziksel nesnelere yapılacak değişikliklerin, uygulamadan önce sanal ortamda test edilmesine olanak tanımaktadır (Grieves, 2016, Ceylan, 2019).

Dijital ikizler, sorunlar ortaya çıkmadan önce tahmin yapmayı, arızaları ve zaman kayıplarını önlemeyi, hatta simülasyonlar yardımıyla geleceği planlamayı sağlayan bir teknolojidir. Dijital ikizler en çok üretim alanında kullanılsa da, eğitim, sağlık, akıllı şehirler gibi farklı sektörlerde de potansiyel yeni kullanım alanları keşfedilmeye başlanmıştır. Akıllı şehirlerde dijital ikizler, şehir planlaması ve politika kararlarını modellemek için kullanılabilir. Dijital ikizler, şehirlerin gerçek zamanlı izlemelerini gerçekleştirmelerine yardımcı olur ve karar almayı daha etkin hale getirir (Deng vd., 2021).

Akıllı şehirlerin fiziksel değişim kararları, dijital ikizler aracılığıyla geri besleme olarak desteklenebilir. Sağlık sektöründe de dijital ikizler farklı şekillerde kullanılmaktadır. Bunlardan ilki, hastane tasarımlarında, ikincisi ise hastaların bakımında görülmektedir. Akıllı ve giyilebilir cihazlar sayesinde, sağlık verilerini toplayan sensörler, insanların veya diğer tıbbi sistemlerin dijital ikizlerini oluşturabilir. Bu veriler anlık olarak izlenebilir ve böylece önleyici sağlık hizmetleri sağlanabilir. Dijital ikizler, ilk

yardım personeline ve sağlık çalışanlarına ek sistem bilgisi sağlayarak, güvenliği artırmakta ve hizmetin kalitesini yükseltmektedir (Gen, 2020).

Sonuç itibariyle dijital ikiz fiziksel bir nesnenin ya da sistemin dijital bir kopyasının oluşturulmasını ifade ederken bu teknolojiyi fiziksel üretim sisteminde gerçek zamanlı bir takibi ve simülasyonun mümkün kılmaktadır. Dijital ikiz teknolojisini aracılığıyla üretim sürecinde olası hatalarını önceden tespiti mümkün hale gelmektedir. Ayrıca bu teknoloji kullanılarak sistem performansının izlenmesi ve simülasyonlar aracılığıyla süreç iyileştirmeleri yapılmaktadır.

2.2.4. Nesnelerin interneti ve veri analitiği

Son yıllarda "*Endüstri 4.0*" ve "*Dijital Dönüşüm*" kavramlarının yükselişiyle birlikte, Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojisi hem akademik çevrelerde hem de birçok sektörde yoğun bir şekilde tartişılmakta ve ele alınmaktadır. Perakende sektörü de bu tartişmalardan payını almaktadır. Artan işletme giderleri, sertleşen rekabet koşulları ve tüketicilerdeki taleplerindeki artiş, firmaları yenilikçi teknolojiler benimsemeye zorlamaktadır. Bu noktada, Nesnelerin İnterneti 'nin sunduğu olanaklar, hem heyecan verici hem de devrim niteliğinde bir potansiyel taşımaktadır (Gülşen, 2019).

Son yirmi yıl içinde Nesnelerin İnterneti, evrimsel bir yol izleyerek önemli bir gelişim kaydetmiştir. Gartner, McKinsey ve ABI Research gibi saygın yönetim danışmanlık şirketlerinden bazıları, 2020 yılı itibariyle Nesnelerin İnterneti'ne bağlı cihaz sayısının 20 milyarın üzerine çıkacağını belirtmişlerdir. Donanım harcamaları açısından ise, 2020'ye kadar tüketiciler odaklı uygulamalar için 1,534 milyar dolar, işletmelerdeki bağlantılı nesneler için ise 1,477 milyar dolar harcama yapılacağı tahmin edilmektedir (Gartner, 2017).

Gregory (2015) ise, Nesnelerin İnterneti'nin 2030 yılına kadar küresel ekonomiye 14 trilyon doların üzerinde bir katkı sağlayacağını öngörmektedir. "*Nesnelerin İnterneti*" terimi ilk olarak 1999 yılında Kevin Ashton tarafından Procter & Gamble (P&G) şirketinde sunduğu bir sunumda kullanılmak üzere ortaya atılmıştır. Ashton, tedarik zincirinde kullanılacak olan Radyo Frekanslı Tanımlama (RFID) teknolojisini, dönemin dikkat çekici konusu olan internetle ilişkilendirerek yöneticilerin dikkatini çekmeyi amaçlamıştır (Ashton, 2009).

Nesnelerin İnterneti'nin tarihindeki ilk uygulama, 1991 yılında Cambridge niversitesi'nde bir grup akademisyen tarafından yapılan ve internet üzerinden bir kahve

makinesinin kamerası aracılığıyla paylaşılan görüntülerle gerçekleştirilen projedir. Bu sistem 22 Ağustos 2001'e kadar aktif olarak kullanılmıştır (Armentia vd., 2012. Akt: Gökrem ve Bozuklu, 2016).

Nesnelerin İnterneti, nesnelerin birbirini algılayıp iletişim kurabilmesini sağlayan akıllı cihazların bağlantısıdır. Bu fiziksel dünyamızdaki karar alma süreçlerini, kararların nasıl, nerede ve kim tarafından alındığını değiştirmektedir (Albert, 2015). Nesnelerin İnterneti, çok sayıda farklı nesnenin çevreyle etkileşime girmesini sağlamak üzere tasarlanmış bir teknolojidir (Aziez, Benharzallah ve Bennoui, 2019). Radyo frekansı tanımlama (RFID) bakış açısına göre ise, Nesnelerin İnterneti, "dünya çapında birbirine bağlı nesnelere ağı" olarak tanımlanmaktadır (Ghaffari vd., 2019).

Nesnelerin İnterneti için literatürde tek bir tanım bulunmamaktadır, çünkü bu teknoloji sürekli gelişen ve şekillenen bir alandır. En yaygın tanımlardan biri, *"elektronik cihazlar, yazılım, sensörler ve işletim sistemleriyle donatılmış, internet aracılığıyla veri alışverişi yapabilen ve veri toplayabilen nesnelerin bütünüdür"* (Yousuf ve Mir, 2019).

İnternetin geleceğiyle ilgili tartışmalar, Nesnelerin İnterneti ve Endüstriyel İnternet üzerine yapılmadan eksik kalacaktır. İnternet teknolojileri, masaüstü bilgisayarlar, dizüstü bilgisayarlar, tabletler ve akıllı telefonların ötesine geçmekte; tüketici elektroniği, elektrikli cihazlar, otomobiller, tıbbi ekipmanlar, enerji ve su sistemleri, makineler ve hatta giyilebilir teknolojiler gibi alanlara yayılmaktadır. Başka bir deyişle, verileri toplayabilen, internete bağlanabilen, veri analizleri yapabilen ve sensörlerle donatılabilen her nesnenin internete bağlanması beklenmektedir (Gülşen ve Özdemir, 2018).

Nesnelerin İnterneti, düşük maliyetli sensörler, Radyo Frekanslı Kimlik Tanımlama (RFID) etiketleri, büyük veri analitiği yazılımları ve IPv6 gibi teknolojilerle gelişmiş bir altyapıya sahiptir. Çoğu Nesnelerin İnterneti uygulaması, kablosuz iletişim teknolojilerini kullanmaktadır; bunlar arasında mobil ağlar, Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee ve Z-Wave gibi protokoller yer almaktadır. Nesnelerin İnterneti, sağlık, ulaşım, akıllı sanayi, lojistik, enerji, kişisel yaşam, akıllı şehirler, tarım ve acil durum yönetimi gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Ghaffari vd., 2019).

Perakende sektörü de bu kullanım alanları arasında yer almaktadır. Constance (2017)'ye göre, Nesnelerin İnterneti'nin gelecekte çok daha fazla işlevi yerine getireceğini ve bunun pazarlama, satış ve müşteri hizmetleri gibi alanlarda yeni

dinamikler oluşturacağını öngörmektedir. 2020'ye gelindiğinde, internet bağlantılı nesnelerin sayısının insan nüfusunun dört katı olacağı tahmin edilmektedir.

Nesnelerin İnterneti, endüstriyel alandaki tüm işletmelere sunduğu fırsatlar ve faydalar ile önemli bir teknoloji haline gelmiştir. Nesnelerin İnterneti teknolojisi, mevcutta artan yenilik düzeyinde gözlemlense de yakın gelecekte tüm endüstrilerde köklü değişimler yaratacağı, iş yapış şekillerini baştan aşağıya değiştireceği ve müşteri beklentilerini yeniden şekillendireceği öngörülmektedir (Gökrem ve Bozuklu, 2016).

Fiziksel cihazların internet üzerinden birbiri ile veri alışverişi yapmasını sağlayan nesnelerin interneti teknolojisi, üretim hattından veri toplayarak, verilerin gerçek zamanlı analizini yapmakta ve üretim sürecinde hızlı müdahaleyi mümkün hale getirmektedir. Verilerin işlenmesi ve anlamlı sonuçların çıkarılması süreci olarak veri analitiği ise üretim sürecinde arıza tahminlerini ve verimlilik artışını sağlamaktadır.

2.2.5. Büyük veri ve veri analitiği

Bilgi ve iletişim teknolojilerindeki büyük ilerlemeler sayesinde, emek, sermaye ve doğal kaynaklar dışında, bilgi de yeni bir üretim faktörü olarak yerini almıştır. Bu gelişme, organizasyonların rekabet avantajı elde etmesinde temel bir kaynak haline gelmiştir. Organizasyonların uzun vadeli rekabet avantajı sağlamasında yenilikçilik kaçınılmaz bir gerekliliktir. Yenilikçiliğin doğasında ise yine bilginin etkisi büyüktür. Bilgi, verinin bir dönüşüm sürecinden geçirilip, analiz edilerek yönetici ve karar vericilere faydalı bir biçimde sunulmuş halidir (Gökçen, 2011).

Diğer bir ifadeyle yöneticilerin karar alma süreçlerinde kullandıkları bilgi, verinin işlenip anlamlı hale getirilmesiyle oluşur ve bu süreç, kararların başarılı bir şekilde uygulanmasına katkı sağlar. Veri ise işlenmeden önce anlam taşıyan ve yararlı bilgiye dönüşmesi gereken ham bilgiyi ifade etmektedir. Veri temelli bir yaklaşım benimseyerek stratejik kararlar almak, organizasyonların sürdürülebilir bir şekilde varlıklarını devam ettirebilmeleri ve yenilikçi rekabet avantajlarını koruyabilmeleri için çok büyük bir öneme sahiptir (Ersöz ve Ersöz, 2015).

Kişisel bilgisayarlardan nesnelerin internetine geçiş yaşanan dönem içerisinde, RFID (Radyo Frekansı ile Tanımlama) ve sensör teknolojilerinin kullanımı giderek daha yaygın hale gelmektedir. Sensörler ve nesnelerin internetinden gelen veriler, web siteleri, sosyal medya platformları ve mobil uygulamalarda üretilen verilerle birleştiğinde büyük veri kavramı ortaya çıkmaktadır. Büyük veri, dijital dünyada aktivitelerin artmasıyla

birlikte daha geniş kitlelere ulaşan, devasa miktarda veriyi ifade etmektedir. CCTV (Kapalı Devre Televizyon) kameraları, GPS (Küresel Konumlama Sistemi) ve sensör ağlarıyla kaydedilen veriler, dijital metinlerin artan kullanımıyla daha fazla iletişim platformu ve fotoğraf gibi içeriklerin üretimi, analiz için büyük miktarda verinin var olduğunu göstermektedir (Barutçu, 2019; Duman, 2022).

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte kullanılan akıllı cihazların sayısı artmış ve bu cihazlar sensörler aracılığıyla gerçek zamanlı olay kayıtları üretmeye başlamıştır. Bunun yanı sıra mobilite ve internet erişiminin artmasıyla sosyal ağlar, günlük yaşamın ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Bu gelişmeler, etrafımızı saran verinin çeşitliliğini, hızını ve hacmini önemli ölçüde artırmıştır. Bu durum, verinin aynı hızda alınması, depolanması ve işlenmesiyle ilgili bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Bu noktada, büyük veri analitiği, kurumsal verilerle birlikte video, ses, metin dosyaları gibi yapılandırılmamış verileri seçip, depolayarak analiz edilmesini sağlayan bir süreç olarak önem kazanmıştır (Ege, 2013).

Sosyal medya uygulamaları, veri toplayan sensörlerin kullanımı ve akıllı telefonlar, ağlar üzerinden iletilen veri miktarını artırmıştır. Bu veriler çoğunlukla yapılandırılmamış ve farklı kaynaklardan gelen farklı formatlarda olmaktadır. Bu tür büyük ve farklı yapıdaki verileri işlemek için geleneksel ilişkisel veri tabanları yetersiz kalmaktadır ve bunun sonucunda, yapısal olmayan verileri depolayabilen ve dağıtık paralel işleme yeteneğine sahip sistemlerin kullanılması gerekmektedir. Büyük veri analitiği, birçok alanda önemli faydalar sağlamakla birlikte, etik düzenlemelerden, kullanıcıların gizliliği ve güvenliği için gerekli önlemler alınmasına kadar birçok konuyu da gündeme getirmektedir (Manca, Caviglione ve Raffaghelli, 2016).

Büyük veri terimi, ilk kez 1997 yılında Michael Cox ve David Ellsworth tarafından düzenlenen 8. IEEE Görüntüleme Konferansı'nda "Application-Controlled Demand Paging for Out-of-core Visualization" başlıklı makalede kullanılmıştır. Bu çalışma, veri setlerinin büyük boyutlarda olduğunu ve bilgisayar sistemlerinin belleğini, sabit disklerini ve hatta harici disklerini bile doldurduğunu vurgulamıştır. Bu durum, "Büyük Veri Problemi" olarak adlandırılmıştır (Cox ve Ellsworth, 1997). Daha sonra Francis X. Diebold, "Big Data Dynamic Factor Models for Macroeconomic Measurement and Forecasting" adlı çalışmasında büyük veriyi, fizik, biyoloji ve sosyal bilimler gibi birçok alanda karşılaşılan ve kullanılmak zorunda olunan bir fenomen olarak tanımlamıştır (Diebold, 2013).

Büyük veri, geleneksel veri tabanı yönetim sistemleriyle işlenmesi mümkün olmayan, farklı boyutlardaki heterojen verileri tanımlayan yeni bir kavramdır ve çeşitli dijital içeriklerden oluşur. Yapısal veri, modellenmesi, girdi olarak alınması, depolanması, sorgulanması, işlenmesi ve görselleştirilmesi kolay olan veri türlerini ifade eder. Bu veri türü çoğunlukla belirli türlerde ve boyutlarda tanımlanmış alanlarda sunulur ve ilişkisel veri tabanlarında ya da tablolarla yönetilebilir. Yapısal verinin sunduğu netlik, diğer veri türlerine göre daha kolay bilgi elde edilmesine olanak tanır. Yarı yapısal veri, yapısal bir veri türünü yansıtsa da, katı bir modele sahip değildir. Yani, yarı yapısal veri, yapısal modellerin yanı sıra etiketler ve işaretler gibi meta modelleri de içerir. Bu etiketler ve işaretler, verinin hiyerarşik yapısını tanımlayarak, veriyi organize eder. XML ve JSON gibi formatlar bu tür veriye örnek olarak verilebilir. Yapısal olmayan veri, belirli bir formatta sunulmadığı veya depolanmadığı veri türleridir. Bu tür veri serbest formatlarda sunulur ve resimler, sesler, videolar gibi medya içeriklerini içerir. Yapısal olmayan verinin katı bir biçimde sunulması zordur, bu da veri işleme süreçlerinde NoSQL gibi yeni teknolojilerin ortaya çıkmasına neden olmuştur (Aktan, 2018).

Büyük veri, günümüzde çok büyük hacimlere ulaşmış ve farklı kaynaklardan gelen çeşitli verilerle sürekli olarak büyümektedir. Bu büyüklük, geleneksel veri işleme tekniklerinin yetersiz kalmasına ve yeni veri yönetim teknolojilerinin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Büyük verinin gerçekliği, verinin doğruluğu ve güvenilirliğini ifade eder. İş kararlarında kullanılacak verilerin güvenilir olması gerekmektedir. Buna karşın, büyük verinin çeşitliliği, analiz edilen verinin kalitesini ve güvenilirliğini sağlamayı zorlaştırmaktadır. Gerçeklik, büyük verinin önemli bir boyutu olup, veri kalitesini değerlendirir. Güvenilir modeller yalnızca yüksek kaliteli verilerle oluşturulabilir. Fakat çoğu veri, etkiye maruz kalmış veya güdültü seviyesinde olabilir. Bu durum, verinin içinde yer alan anormallikler ya da eksik değerlerin varlığıyla ilişkilidir. Zira, sosyal medya üzerinden elde edilen müşteri duyguları, değerli olsa da kişisel yorum gerektirdiğinden belirsiz unsurlar içerebilir (Aksoy vd., 2017; Duman, 2022).

Belirsiz ve kesin olmayan verilerle başa çıkabilmek, bu verilerin yönetilmesi ve analizi için geliştirilen araçların kullanılması gereken başka bir büyük veri özelliğidir. Dolayısıyla toplanan verinin doğruluğu ve geçerliliği son derece önemli hale gelir. Doğru olmayan veriler, analizler için temel teşkil etmeyecek ve yanlış sonuçlar doğurabilecektir. Toplanan büyük veri, yanlış anlamalara neden olabileceği için, değerli bilgiye ulaşılabilmesi adına verinin doğruluğu çok büyük bir öneme sahiptir. Gerçeklik, verilerin

doğruluğunu doğrulama, gürültü seviyelerini azaltma, ilişkileri tanımlama ve yanıtıcı unsurları tespit etme aşamalarından oluşur. Dolayısıyla veri tutarsızlıkları, eksiklikleri ve yanıtıcı unsurlar, gerçeklik bileşeni ile açıklanır. Bu aşamada amaçlara uygun verinin elde edilmesi için belirli temizlik kontrolleri yapılmalıdır. Büyük ve heterojen veri kaynaklarının bulunduğu ortamda, toplanan verilerin bütünlüğü ve değeri garanti altına alınmak için sıkı kurallar uygulanmalıdır (Çakıt vd., 2020).

Büyük veri, yüksek hacim, hız ve çeşitliliği ile karakterize edilen, teknoloji ve analitik yöntemler gerektiren bilgi kaynaklarıdır. Büyük verinin değeri, organizasyonlar ve toplumlar için ekonomik değer yaratabilecek bir anlayışa dönüşerek ortaya çıkar. Başlangıçta büyük verinin düşük değeri olabilir, fakat geniş hacimli verinin analiz edilmesiyle bu veriler önemli bir değer kazanabilir. Büyük verinin değeri, birbirleriyle ilişkili kişileri ve grupları ya da verinin kendi yapısını anlamak için veri parçaları arasında bağlantılar kurularak elde edilen örüntülerden çıkar. Büyük veri, üretim ve analiz aşamalarından sonra organizasyonların iş süreçlerine değer katmalıdır. Büyük verinin anında karar verme süreçlerine etki etmesi, doğru kararların hızlıca alınabilmesi açısından oldukça önemlidir. Bu süreçte, büyük veriden faydalanmak için yapılan yatırımın, elde edilecek maliyet avantajından fazla olmaması gerekmektedir (Sarıkulak, 2018).

Günümüzde akıllı telefonlar, tabletler, sensörler, tıbbi cihazlar, internet trafiği, sosyal ağ etkileşimleri ve çeşitli alanlarda yapılan bilimsel araştırmalar gibi birçok kaynak, büyük veri üretmektedir. Web ortamındaki artan çeşitlilik, web sayfalarında farklı medya türlerinde ve eğlence, spor, teknoloji gibi konularda büyük veri sağlanmasına olanak tanımaktadır. Büyük veri kaynakları arasında yeni veri kaynaklarının yanı sıra, mevcut verilerin sayısallaştırılması ile ortaya çıkan kaynaklar da bulunmaktadır. Çeşitli endüstriler, yeni veriler üreterek veya mevcut veriyi dijital ortamda toplayarak büyük veri kaynaklarını oluşturur (Tonga ve Tonga, 2022). Büyük veriyi artıran başlıca endüstriler şunlardır (Çetinkaya, 2020);

Taşıma, lojistik, perakende, kamu hizmetleri ve telekomünikasyon: Sıralanan sektörlerde GPS alıcıları, RFID etiket okuyucuları, akıllı sayaçlar ve telefonlardaki sensörler aracılığıyla artan miktarda veri toplanmaktadır. Bu veriler, operasyonel süreçleri iyileştirmek, fırsatları değerlendirmek ve iş zekâsını sağlamak için kullanılmaktadır.

Sağlık sektörü: Elektronik tıbbi görüntüleme ve raporlama sistemlerinin hızla gelişmesi, kısa vadeli halk sağlığı izlemeleri ve uzun vadeli salgın hastalık araştırmaları için büyük veri üretimini tetiklemektedir.

Kamu sektörü: Devlet kurumları, nüfus sayımları, enerji tüketimi, bütçeler, yasalar, seçim sonuçları gibi halkla ilgili verileri dijitalleştirerek erişime sunmaktadır. Bu veriler kamu hizmetleri ve bölgesel yönetim uygulamalarında kullanılmaktadır.

Eğlence sektörü: Medya endüstrisi, kitap, gazete, televizyon, radyo, film, müzik ve oyun gibi alanlarda dijitalleşme süreciyle hızla veri toplamaktadır. Eğlence verisi, toplumların ve bireylerin davranışlarını izlemek amacıyla toplanan veriyi içerir.

Yaşam bilimleri: Genetik araştırmalar, düşük maliyetle gen sayımı yaparak büyük miktarda veriyi analiz etmekte ve tedavi etkinliklerini belirlemeye yönelik veri üretmektedir.

Video teknolojisi: Yeni nesil IP kameraları ile güvenlik ve hizmet geliştirme amacıyla video verisi toplanmakta ve analiz edilmektedir.

Bu bağlamda endüstri 4.0'ın temel yapıtaşlarından biri olarak büyük veri üretim süreçlerini anlamak, analiz etmek ve optimize etmek amacıyla kullanılmaktadır. Verilerin işlenmesini ve üretim süreçlerine dair önemli bilgiler elde edilmesini sağlayan büyük veri, üretim sürecinin verimli hale getirilmesini, kaynakların verimli kullanımını ve hata oranlarının azaltılmasını mümkün hale getirmektedir.

2.2.6. Eklemeli imalat (3D baskı) teknolojileri

Eklemeli üretim, metal, plastik, kompozit ve organik materyaller kullanılarak nesnelerin üç boyutlu (3D) geometrik verilerine göre katmanlar halinde inşa edilmesi prensibine dayanan bir üretim tekniğidir. Bu teknoloji, 2D yazıcılarda kullanılan inkjet baskı teknolojisine benzer olduğu için "*3D baskı*" olarak adlandırılmıştır. Zamanla, bu teknolojiyi kullanan cihazlar da "*3D yazıcı*" olarak bilinmeye başlanmıştır (Erener vd., 2021).

Eklemeli üretimin sunduğu avantajlarla, yüksek geometrik doğruluk ve çözünürlükle 3D üretim yapabilen masaüstü 3D yazıcıların geliştirilmesi, bu teknolojinin diğer üretim yöntemleri arasından öne çıkmasına katkı sağlamıştır. Eklemeli üretimin sağladığı üretim esnekliği, serbest formdaki yüzeylere sahip nesnelerin üretiminde büyük bir avantaj sunmaktadır. 3B baskı ile çalışan yazıcıların bir başka avantajı ise, bulut tabanlı üretime olanak sağlamasıdır. Böylece gelen siparişler yazıcıya iletilir ve herhangi bir kalıp ya da üretim hattına ihtiyaç duymadan hızlı bir şekilde üretim yapılabilir (Özer, 2020).

3D baskı, otomotiv, havacılık, sağlık, eğitim, gıda, sinema ve eğlence gibi birçok sektörde her geçen gün daha fazla kullanım alanı bulmaktadır. Söz konusu yayılma,

Wohlers 2018 raporunda da görülmektedir. Rapora göre, 3D baskı endüstrisi 2017 yılında %21 artışla 7,3 milyar dolara ulaşırken, 2016'daki büyüme oranı %17,4 ve 2015'teki büyüme ise %25,9 olarak kaydedilmiştir. Başlangıçta eklemeli üretim teknolojileri, birçok sektörde sadece görsel doğrulama ve prototip üretimi amacıyla kullanılıyordu. Özellikle otomotiv sektöründe, parçaların prototipleri daha çok görsel değerlendirmeler ve kalite kontrol için üretiliyordu. Urbee adlı 3D yazıcı ile üretilen araçtan sonra otomotivde, eklemeli üretimle fonksiyonel parçaların da üretilbileceği düşüncesi oluşmaya başlamıştır. Ev tipi 3D yazıcıların kullanımı ile fabrikalarda maliyetlerin ve tedarik sürelerinin kısaltılması, aynı zamanda büyük pres makinelerinin kapladığı alanın küçültülmesi ve üretim hatlarının sadeleştirilmesi beklenmektedir (Özsoy ve Duman, 2017).

Havacılık sektöründe ise 3D baskı teknolojisi, özellikle operasyon sürelerinin kısaltılması, üretim maliyetlerinin azaltılması ve hava araçlarında kullanılan parçaların hafifletilmesi gibi konularda kullanılmaktadır. 3D baskı teknolojisinin, yüksek teknoloji gerektiren uçak parçalarını üretme ve onarma imkânı olmayan ülkeler için düşük maliyetle hızlı bir şekilde bu yeteneklere sahip olmalarını sağlaması, önemli bir fırsat olarak görülmektedir (Sürmen, 2019).

3D baskı teknolojilerinin, fonksiyonel parçaların üretimi için profesyonel kullanıma en yaygın olarak hizmet ettiği alanlardan biri biyomedikal sektördür. Biyomedikal cihazlar, hastaya özel olarak tasarlanmış ve geleneksel üretim yöntemleriyle imalatı zor olan, serbest formda geometrik yapılar içerir. Bu özellikler, 3D baskıyı biyomedikal cihazların üretimi için ideal hale getirir. Bunun yanı sıra, manyetik rezonans (MR) ve bilgisayarlı tomografi (CT) gibi tarama teknikleriyle elde edilen veriler, 3D baskı ile üretimi mümkün kılmaktadır. Günümüzde ortopedik implantlar, protezler, diş ürünleri ve cerrahi aletler gibi pek çok biyomedikal ürün 3D yazıcılar ile üretilmektedir. İlaç sektöründe ise tablet ve kapsül üretimi de 3D baskı teknolojisi ile yapılabilmektedir (Özgüner, 2022).

Bunların dışında, 3D baskı tıp alanında biyobaskı olarak da kullanılmaktadır. Bu teknolojiyle, 3D yazıcılar aracılığıyla fonksiyonel, canlı dokular üretmek mümkündür. Bu yazıcılarda hidrojel, silikon ve protein çözeltileri gibi malzemeler kullanılır. Araştırmacıların ana hedeflerinden biri, yakın gelecekte fonksiyonel ve nakledilebilir organların üretimidir. Gıda sektörü de 3D baskının potansiyeline ilgi duymaktadır. Karmaşık geometrili, üç boyutlu objelerin doğrudan üretilmesi ve serbest formda

tasarımların yapılabilmesi, gıda endüstrisinin de dikkatini çekmiştir. Sektör, müşteri taleplerine göre özel tasarlanmış yiyecekler ve sanatsal sunumlar üretmek için bu teknolojiyi kullanmaktadır. FDM, SLS, SLA ve PJ gibi farklı 3D baskı teknolojileri de bu alanda aktif olarak kullanılmaktadır. Eğitim alanında ise 3D baskı teknolojileri özellikle üniversitelerde ve okullarda proje bazlı öğrenme, tasarım odaklı düşünme ve analitik becerilerin geliştirilmesinde kullanılmaktadır. Bu teknolojiler, öğrencilere yaratıcı düşünme ve problem çözme yeteneklerini kazandıran önemli araçlar sunmaktadır (Erener vd., 2021).

Geleneksel üretim yöntemleriyle zor veya karmaşık geometrilere sahip parçaların üretilmesi, artık 3D baskı teknolojileri sayesinde mümkün hale gelmiştir. Bu teknolojiler, üretim hattı kurulumları ve kalıp üretimi gerektirmediği gibi, operasyon süresini kısaltarak tasarımların hızla nihai ürünlere dönüştürülmesini sağlar. Bu özellikleriyle, 3D baskı teknolojileri otomotiv, havacılık, sağlık, eğitim, gıda ve eğlence gibi pek çok sektörde giderek daha yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bugün, birçok firma eklemeli üretimin sağladığı avantajlardan faydalanabilmek için bu teknolojilere adapte olmuştur. Dijital bilgilerin hızla aktarıldığı ve üretim hatlarının dönüşüm gösterdiği bir dönemde, endüstri 4.0 sayesinde eklemeli üretimin çok daha yaygın hale geleceği öngörülmektedir. Çünkü endüstri 4.0, 3D yazıcılarla uyumlu olan nesnelerin interneti, büyük veri, bulut bilişim ve siber-fiziksel sistemler gibi bileşenlere dayanan akıllı bir endüstri modelidir. 3D baskı sektörünün hızla büyüyen pazar değeri, 2020 yılı itibarıyla 21 milyar dolara ulaşması beklenmektedir (Kökhan ve Özcan, 2018; Akbaba ve Akbulut, 2021).

Eklemeli üretim yöntemleri, karmaşık parçaların hızlı bir şekilde üretilmesi, verimli malzeme kullanımı, düşük maliyetler, özgül dayanımı yüksek ürünlerin elde edilmesi, montaj aşamalarının sadeleştirilmesi, iç boşluk ve kanallar içeren parçaların üretimi gibi bir dizi avantaj sunmaktadır. Seri üretime kıyasla eklemeli üretim, her bir parçanın farklı geometrilere üretilmesini mümkün kılar ve bu da büyük esneklik sağlar. Buna karşın, büyük çapta üretim yapıldığında, eklemeli üretim geleneksel seri üretime göre daha pahalı olabilmektedir. Bazı kritik sektörlerde, yüksek mekanik özelliklere sahip ve yüksek çözünürlükle baskı yapabilen 3D yazıcılar tercih edilmektedir ve bu yazıcıların fiyatları, teknolojinin kullanımını sınırlayabilmektedir. 3D baskı teknolojisinin diğer sınırlamaları ise malzeme çeşitliliğinin ve baskı boyutlarının sınırlı olması, üretim sonrası son işlem gereksinimleri gibi faktörlerdir. Firmalar ve üniversiteler tarafından yapılan araştırmalarla bu teknolojiler sürekli olarak gelişmektedir (Sürmen, 2019).

Eklemeli üretim ile karmaşık geometrilere sahip, mikro boyutlu ve büyük parçaların üretimi, geometrik doğruluğun artırılması, dayanıklılığın güçlendirilmesi, maliyetlerin düşürülmesi ve daha geniş malzeme seçeneklerinin kullanılması gibi konularda yapılan akademik çalışmalar teknolojik ilerlemeleri desteklemektedir. Üretim sonrası işlemleri kolaylaştırmak için tasarım konseptleri geliştirilmektedir ve sıvı içinde çözünerek kolayca çıkarılabilen destek yapıları üzerinde de çalışmalar devam etmektedir. Gelecek yıllarda yeni teknolojilerin geliştirilmesi, endüstri 4.0'a geçişin hızlanması ve eklemeli üretim makinelerinin daha yaygın hale gelmesiyle, 3D baskı maliyetlerinin daha da düşmesi, söz konusu teknolojilerin otomotiv, uçak, biyomedikal ve doku mühendisliği gibi kritik alanlarda daha önemli hale gelmesi beklenmektedir (Kökhan ve Özcan, 2018).

Sonuç itibarıyla malzemenin katman katman eklenerek bir ürünün üretilmesi sürecini yansıtan eklemeli imalat, üretim süreçlerinin esnek hale gelmesini ve özelleştirilmiş parçaların üretilmesini mümkün hale getirmektedir. Geleneksel üretim yöntemlerine nazaran daha hızlı, düşük maliyetli ve daha az atık üreten bu teknoloji, tasarım sürecini hızlandırmaktadır.

2.3. Dünya'da ve Türkiye'de Endüstri 4.0

2.3.1. Endüstri 4.0 dünyadaki öncüleri

Endüstri 4.0'ın etkileri küresel boyutta hızla yayılmakta ve pek çok ülke, üretim süreçlerini dijitalleştirerek daha verimli hale getirmek için bu dönüşümü benimsemektedir. Bu bağlamda tez çalışması kapsamında Endüstri 4.0'ın en öncü ülkeleri arasında yer alan ABD, Çin, Almanya, Güney Kore, Japonya, İsviçre ve Meksika incelenecektir.

2.3.1.1. Amerika Birleşik Devletleri

18.yüzyılın sonlarına doğru buhar gücünün keşfiyle başlayan ilk sanayi devrimi, İngiltere'de ortaya çıkmış ve teknolojik ilerlemelerle üretimi artıran İngiltere, devrimin öncüsü olmuştur. Bu devrim, kısa bir süre içinde Avrupa'ya ve ABD'ye yayılmıştır. El emeğinin yerini makinelerin alması, üretim süreçlerini köklü bir şekilde değiştirmiş ve ekonomik ile sosyal yapılar da bu dönüşümden etkilenmiştir. Bu devrimler sonucunda nüfus artışı kaçınılmaz olmuştur. İngiltere dışındaki ülkelerdeki gelişmeler, bu ülkeleri rekabete itmiş ve yeni pazar anlayışları doğrultusunda piyasa hakimiyeti kurma çabaları, sömürgecilik hareketini tetiklemiş, bu da Birinci Dünya Savaşı'na yol açmıştır. İkinci sanayi devrimi ile birlikte seri üretim teknikleri, elektrik ve montaj hatları kullanılarak üretim hızlanmış ve Fordizm anlayışı benimsenmiştir. Dönem içerisinde lider konumda

olan ülkeler yine ABD ve Almanya olmuştur. Birinci sanayi devriminde İngiltere’de kişi başına düşen gelir 3.500 dolarken, ikinci sanayi devriminde bu rakam 4.000 dolara çıkmış ve 1929’da ABD’de 8.000 dolara ulaşmıştır (Sarıkulak, 2018).

İkinci Dünya Savaşı sonrası başlayan ve “Teknoloji Devrimi” olarak da adlandırılan üçüncü sanayi devrimi, bilgisayarlar, internet ve diğer dijital teknolojilerin kullanımına dayalı olarak hızla gelişmiştir. Aynı dönemde, atom enerjisi, mikro çipler ve fiber optik gibi teknolojiler de ilerlemiştir. 1969 yılında Amerikan Savunma Bakanlığı tarafından geliştirilen ARPANET ağı, ABD’deki ve dünya çapındaki çeşitli kurumların bilgisayarları aracılığıyla birbirleriyle iletişim kurmalarını sağlamıştır (Koç, 2020).

Günümüze geldiğimizde, 2006 yılında Lee tarafından tanıtilen Siber Fiziksel Sistemler kavramı, aslında ABD’de başlayan dördüncü sanayi devriminin temelini atmıştır, kavram ilk kez 2011 yılında Almanya’da büyük ilgi görmüştür (Alçın, 2016). ABD, dördüncü sanayi devrimini yönlendiren başlıca girişimlerden biri olan Endüstriyel İnternet Konsorsiyumu (IIC) ile süreci yönetmektedir. IIC, endüstriyel internetin büyümesini hızlandırmak amacıyla en iyi uygulamaları keşfeder, birleştirir ve test eder, aynı zamanda teşvikler sağlayarak bu alanda gelişimi destekler. 2014 yılında General Electric, CISCO, AT&T, IBM ve Intel gibi devler, endüstriyel internetin hızını artırmayı hedefleyerek bir araya gelmişlerdir (Çetinkaya, 2020).

Endüstri 4.0 sürecine katılan tüm ülkeler gibi ABD’nin de amacı, ekonomisini büyütmek ve küresel rekabette önde kalmaktır. ABD, özel sektöre dayalı bu dönüşüm sürecini desteklemek için Ar-Ge çalışmalarına yatırım yaparak, bu alanda diğer ülkelerle rekabet avantajı sağlamayı amaçlamaktadır. 2000 ile 2017 yılları arasında ABD, bilimsel araştırmalar ve geliştirmeye yıllık ortalama %4,3 oranında yatırım yaparak liderliğini korumuştur. Aynı dönemde Çin, ABD ile olan inovasyon farkını kapatılmak için %17’den fazla bir büyüme kaydetmiştir. ABD Ulusal Bilim Vakfı (NSF) tarafından yayımlanan rapora göre, küresel Ar-Ge harcamaları bu süre zarfında üç kat artarak 722 milyar dolardan 2,2 trilyon dolara yükselmiştir (McCarthy, 2020).

Avrupa, elektrik kullanımı konusunda öncü olmasına rağmen, ticari başarıda ABD’nin gerisinde kalmıştır. Bunun yanı sıra, robot teknolojisinde de ABD, Japonya’nın gerisinde kalmıştır. Japonya, Kawasaki Robotics’in Unimation makinelerini üretmesiyle bu alanda hızlı bir ilerleme kaydetmiştir. 1980’li yıllarda Japonya’da 47.000 robot bulunurken, ABD’de bu sayı 3.200, Almanya’da ise 6.000’in altındaydı. 2000’li yıllara

gelindiğinde ise Japonya, 389.400 endüstriyel robota sahip olmuş ve Güney Kore bu alanda önemli bir oyuncu haline gelmiştir (Bilgin, 2018).

Siber fiziksel sistemler, dijital üretim, robot teknolojisi ve yapay zeka gibi alanlarda hedeflerine ulaşmak isteyen ABD, bu alanlara büyük bir önem vermektedir. Günümüzde, insan benzeri robotlar birçok işi hızlı, güvenilir ve verimli şekilde yapabilmektedir. Örnek vermek gerekirse bir otomobil fabrikasında, mühendisler tarafından tasarlanan bir aracın üretim sürecinde robotlar tüm aşamalarda görev almaktadır. Üretim bandında yer alan robotlar, aracın parçalarını birleştirmeden aracın son şekli alana kadar her noktada aktif rol oynamaktadır. Gelişen robot teknolojileri ile birlikte birçok mesleğin ortadan kalkacağı öngörülmektedir. Kaybolan her meslek, yeni iş fırsatlarının doğmasına yol açacaktır. Ulusal Robotik Federasyonu tarafından yayımlanan bir raporda, artan otomasyonun üretim maliyetlerini ve ürün fiyatlarını düşürdüğü, bunun sonucunda ürün talebinin arttığı ve istihdamın arttığı belirtilmiştir. Zira Almanya'daki otomobil üretim sektöründe robot kullanımı 2010-2015 yılları arasında %3 artarken, ABD'de ise endüstriyel robotların iş gücüne olan etkisi üzerine yapılan araştırmalar da bulunmaktadır (Brown, 2018: 363; EBSO, 2017).

Sonuç itibarıyla ABD, teknoloji ve inovasyon alanındaki güçlü altyapısı sayesinde bu dönüşümü hızlı bir şekilde benimsemiştir. Akıllı fabrikalar, robotik sistemler ve yapay zeka uygulamaları olmak üzere ileri teknolojilerin yaygınlaşması, Amerikan üretim sektöründe daha verimli ve sürdürülebilir çözümler sunulmasına olanak tanımaktadır. Bunun yanı sıra ABD'nin dünya çapında büyük teknoloji firmalarına ev sahipliği yapması, Endüstri 4.0'a geçişin hızlanmasında önemli bir etken olmuştur.

2.3.1.2. Çin

Endüstri 4.0 terimi Almanya'da ortaya çıkmış olsa da, gelişmiş ekonomilere sahip ülkeler, coğrafi konumları, doğal kaynakları ve düşük maliyetli iş gücü gibi avantajları sayesinde endüstriyel dönüşümü kendi stratejileri doğrultusunda başarıyla hayata geçirmektedir. Ülkelerin geçmişteki sanayileşme süreçleri ile günümüzdeki kişi başına düşen milli gelir seviyelerini karşılaştırarak bu ekonomik büyümeyi gözlemlemek mümkündür. Almanya ve Japonya, otomotiv ve robot teknolojilerinde önemli ilerlemeler kaydederken, ABD yapay zekâya odaklanmıştır. Çin de alternatif teknolojilere yönelmiştir. Çin'de kurulan ilk karanlık fabrika, akıllı telefon parçaları üretmiştir. Fabrika yöneticisi, bu tür bir üretim modelinin benimsenmesinin ardından, insan gücüne olan gereksinimin %90 oranında azaldığını ve üretim hatasında meydana gelen kusurların

%25'ten %5'e indiğini ifade etmiştir. Sadece makinelerin çalıştığı bu akıllı fabrikalar, Endüstri 4.0 sürecine dahil olan ülkeler tarafından büyük avantajlar sunduğu için tercih edilmiştir (Liu vd. 2024; EBSO, 2017).

Her ülke gibi Çin de dönüşüm sürecine başladığında kendi yol haritasını oluşturmuştur. 2014 yılı başlarında sanayi sektöründe önemli bir değişim sürecine adım atan Çin, "*Made in China 2025*" vizyonunu uygulamaya koymuştur. Bu strateji üç aşamadan oluşmakta olup, ilk aşama olan 2025'e kadar, geleneksel sektörlerde daha yüksek katma değerli üretime geçiş ve yeniden yapılandırma hedeflenmektedir. 2035 yılına kadar ise teknoloji ve yenilik alanlarında lider bir konumda olmayı amaçlayan Çin, nihayetinde 2049 yılında, ülkesinin kuruluşunun yüzüncü yılında, yüksek teknolojiye dayalı bir ülke olarak sektördeki küresel liderliğini pekiştirmeyi planlamaktadır. Çin'in dönüşüm stratejisinin amacı teknoloji alanında dünya çapında bir güç haline gelmek ve diğer ülkeleri de kendisini izlemeye zorlamaktır (Gürlesel, 2018).

"*Made in China 2025*" planı, sanayinin genelinde büyük değişiklikler yaratmayı hedeflemekle birlikte, özellikle ileri düzey bilgi teknolojileri, robotik ve otomasyon, uzay ve havacılık, denizcilik, modern ulaşım araçları, biyoteknoloji ve ileri düzey tıbbi cihazlar gibi alanlara öncelik vermektedir (BSTB, 2018).

Görüldüğü üzere Çin, geniş üretim altyapısı, devasa iç pazarı ve devlet destekli sanayi reformları ile Endüstri 4.0 teknolojilerini en hızlı şekilde entegre eden ülkelerden biri olmuştur. Akıllı üretim ve robot teknolojileri konusunda yapılan büyük yatırımlar, Çin'in üretim gücünü global ölçekte artırmaktadır. Ayrıca Çin'in uyguladığı politikalar, Endüstri 4.0 teknolojilerinin gelişmesini teşvik etmektedir.

2.3.1.3. Almanya

İlk sanayi devrimi İngiltere'de başladığında ülkeler arasındaki teknolojik rekabet, dördüncü sanayi devrimine kadar devam etmiştir ve etmeye devam edeceği öngörülmektedir. Endüstri 4.0 kavramı, özellikle dijital ortamda sıkça araştırılan bir terim haline gelmiştir ve 2011 yılında Almanya'da bu kavram önemli bir gündem maddesi olmuştur. Bu sebeple Endüstri 4.0'ın öncüsü Almanya'dır. Almanya, endüstriyel devrime İngiltere'den sonra başlamış, başlangıçta İngiltere'nin teknolojisini taklit ederek önemli bir gelişim göstermiştir. Almanya, özellikle makine, otomotiv ve kimya sektörlerinde sanayileşmiş ve zamanla dünya çapında talep gören makineler üretmiştir. 2011 yılında gündeme gelen Endüstri 4.0 kavramının etkisiyle, Almanya'nın makine sektörü büyük bir

büyüme yaşamış ve 2,1 trilyon dolarlık bir ciroya ulaşmıştır. Dönem içerisinde Almanya ve Çin, sektördeki en büyük kazanan ülkeler olmuştur. 2004-2008 yılları arasında görülen hızlı büyüme, 2009'da yaşanan krizle azalmış, fakat 2014 yılında sektörde %3'lük bir büyüme beklenmiştir. Sonuç olarak, Almanya makine üretiminde dünya lideridir (Yılmaz, 2019).

Buhar makinesinin icadı ve ilk sanayi devriminin İngiltere'de yaşanmasının ardından, İngiltere parlamentosu, makine ihracatını yasaklamıştı. 1824'te bu yasağın kaldırılmasıyla birlikte gelişmeler yalnızca İngiltere ile sınırlı kalmamış, Avrupa'daki diğer ülkelere de yayılmıştır. Almanya, başlangıçta tarım ülkesiyken, İngiltere'den ithal ettiği makineler ve diğer teknolojileri taklit ederek sanayileşme sürecine başlamıştır. Almanya, aynı zamanda uyguladığı yüksek gümrük vergileriyle iç üretimini de korumuştur (Bayrak, 2018).

Almanya, kömür ve demir-çelik kaynakları bakımından zengin bir ülke olup, bu kaynakları kullanarak gelişmiş bir demiryolu ağı kurmuş ve önemli bir ulaşım gücü oluşturmuştur. İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra toparlanmaya başlayan Almanya, bugün eğitim, teknoloji, endüstriyel makineler ve sanayileşme denildiğinde akla gelen ilk ülkelerden biridir. Endüstri 4.0'ın önemli unsurlarından biri olan üniversite-sanayi işbirliğini etkili şekilde gerçekleştiren Almanya, güçlü bir ekonomiye ve makine teknolojisi üretiminde lider konumda olan bir ülke olmuştur. Almanya, geniş demiryolu ağı sayesinde Avrupa ülkeleri ve denizaşırı ülkelerle ticaretini geliştirmiştir ve büyümesine devam etmektedir (Aydın, 2016).

1960'ların sonlarına doğru, elektronik ve endüstriyel süreçlerde bilgisayar teknolojilerinin kullanımı yeni bir dönemin başlangıcını işaret etmiştir. Bu dönemin merkezi olan Almanya, dünyanın en rekabetçi ve yenilikçi sanayi sektörlerinden birine sahip olup, endüstriyel üretimdeki araştırma ve geliştirmelerde teknolojik liderliği elinde bulundurmaktadır (GTAI, 2018). Almanya, dijitalleşme ve dijital teknoloji kullanımı konusunda dünyanın önde gelen ülkelerindedir. Alman şirketlerinin %65'i Endüstri 4.0 uygulamalarını kullanmakta ya da kullanmayı planlamaktadır. Üretim sektöründe, her dört firmadan üçü bulut bilişimini kullanırken, üçte biri büyük veri analizinden yararlanmaktadır. Otomasyon ve yazılım sistemleri, Endüstri 4.0'ın uzun vadeli başarısının temel nedenlerindedir (GTAI, 2018). Almanya'nın imalat endüstrisinde rekabeti artırmak amacıyla dijitalleşme fırsatları dört ana alanda öne çıkmaktadır. Bunlar üretim süreçlerinde kaynak optimizasyonu sağlanarak daha verimli üretim yapılmakta,

lojistikte ise malzeme ve bilgi akışının verimli hale getirilmesi sağlanmaktadır. Müşteri ilişkileri daha hedef odaklı şekilde yönetilmekte, hibrit ürünler ve akıllı hizmetler ile bakım ve onarım süreçleri iyileştirilmektedir (Schwab, 2017).

2011 yılından itibaren Endüstri 4.0 ile önemli bir gelişim gösteren Almanya'da işsizlik oranlarında önemli değişiklikler yaşanmıştır. Yapılan doğru yatırımlar ve harcamalar ülke ekonomisini doğrudan etkilemiş ve 2013'te belirlenen yol haritası doğrultusunda yeni iş alanları ortaya çıkmıştır. Bu süreçte, eski sisteme uyum sağlayamayanlar kadar, yeniliklere hızla adapte olan vasıflı iş gücü de artmıştır. Almanya, Endüstri 4.0 sürecindeki verimliliği ve koordinasyonu sağlamak için birçok kurumla işbirliği yapmaktadır. Almanya Yapay Zeka Araştırma Merkezi (DFK), Fraunhofer Araştırma Birliği, Industry 4.0 Platformu, Siemens gibi önde gelen kuruluşlar, bu dönüşümün önemli aktörlerindedir (Ertuğrul ve Deniz, 2018).

Almanya, ABD gibi teknoloji ve ekonomi alanlarında zirvede yer alan ülkelerle birlikte Çin ve Hindistan gibi yükselen ekonomilerle rekabet etmek için sürekli olarak gelişmek zorundadır. Siemens, BMW ve Bosch gibi sektör devleri, Almanya'nın milli gelirine ve istihdamına büyük katkı sağlamaktadır. Almanya Başbakanı Angela Merkel, Endüstri 4.0'ı bir fırsat olarak değerlendirdiklerini ve bu dönüşümün sadece büyük şirketlerle değil, aynı zamanda start-up girişimleriyle de güçlü bir bağ kurduğunu ifade etmiştir (Yılmaz, 2019).

Dördüncü sanayi devriminin küresel ekonomi üzerindeki etkilerinin çok yönlü olacağı ve GSYH, yatırım, tüketim, istihdam, ticaret gibi makroekonomik göstergeleri önemli ölçüde etkileyeceği öngörülmektedir. Bu alanda lider olan Almanya, gelişmiş ülkelerle işbirlikleri yaparak ekonomik büyüme ve rekabet konusunda soruları ve belirsizlikleri gidermeyi amaçlamaktadır. Almanya ile Çin arasında 2015 ve 2016 yıllarında işbirliği planları ve anlaşmalar yapılmışken, Almanya ve Japonya arasındaki işbirliği ise 2017'de Hannover Beyannamesi ile daha da pekiştirilmiştir (Schwab, 2017).

Bu bağlamda, Almanya Endüstri 4.0'ın doğduğu ve en etkin şekilde uygulandığı ülkelerden biridir. "*Industry 4.0*" terimi ilk kez Almanya'da gündeme gelmiş ve burada uygulamaya konmuştur. Almanya otomasyon başta olmak üzere robot teknolojisi ve dijital üretim konularında liderdir. Almanya, küçük ve orta ölçekli işletmelerin dijitalleşmesine yardımcı olan güçlü altyapılar kurarak, Endüstri 4.0'ın pratikte başarılı bir şekilde uygulanmasını sağlamaktadır.

2.3.1.4. Güney Kore

Sanayi devrimlerinin ucuz iş gücü, zengin hammadde kaynakları ve stratejik coğrafi konum avantajları nedeniyle, üretim süreçlerinin Çin ve Hindistan gibi Asya ülkelerine kayması, Batılı ülkeleri harekete geçirmiştir. Bu durum, teknolojik yeniliklerin hızla gelişmesi ve verimliliğin artmasıyla bu ülkelerdeki üretimin güçlenmesine yol açmıştır. Almanya ve ABD gibi güçlü ekonomiler, geleneksel üretim biçimlerini modernleşmiş üretim yöntemleriyle birleştirerek, bu ülkelerdeki ucuz iş gücü ve hammadde kaynaklarıyla işbirliği yaparak, teknolojik bilgi ve deneyimlerini birleştirmenin avantajlarını keşfetmiştir (Coşkunoglu, 2016).

İkinci Dünya Savaşı'nda Japonya'nın yenilmesi sonrası Kore, Güney Kore'nin ABD işgali ve Kuzey Kore'nin SSCB işgali altına girmiştir. 1950 yılında dünyanın en yoksul ülkelerinden biri olan Kore için, Birleşmiş Milletler Kuvvetleri'nin başkomutanı Douglas MacArthur, Kore'nin yeniden inşasının yüz yılı bulacağını ifade etmiştir. 1960 yılına gelindiğinde Kore'nin ihracatının çoğu tarım ürünleri, balık ve doğal kaynaklarla sınırlıydı. Ülkenin yeniden kalkınması için bilim ve teknolojiye odaklanmak gerektiği anlaşılmıştır. 1967'de Bilim ve Teknoloji Bakanlığı, 1971'de ise Kore İleri Bilim ve Teknoloji Enstitüsü (KAIST) kurulmuştur. KAIST, ülkenin ileri teknoloji sanayisi için her zaman nitelikli ve eğitilmiş bireyler yetiştiren bir eğitim kurumu olmuştur (Yıldırım, 2019).

2016 yılında Dünya Ekonomik Forumu, İsviçre'deki UBS bankası ile birlikte Endüstri 4.0 konusunu ele alan bir toplantı düzenlemiş ve bu toplantı kapsamında hazırlanan Küresel Rekabetçilik Raporu'nda Güney Kore'nin Endüstri 4.0'a ne kadar hazır olduğu değerlendirilmiştir. Güney Kore, 25. sırada yer alırken, Türkiye 39. sıradaydı (Leaders Y.G. 2016). Dönem içerisinde, Koreli Go şampiyonunun Google'ın AlphaGo yapay zeka yazılımına yenilmesi, ülkede yapay zeka alanındaki eksiklikleri gündeme getirmiştir. Otomobil, dijital teknoloji, Ar-Ge, eğitim ve inovasyon alanlarında lider konumda olan Kore, yapay zeka konusunda ABD'ye karşı geride kalmıştı. Samsung, Hyundai ve SK Telekom gibi büyük şirketler, bu alanda gelişmeleri desteklemek amacıyla Yapay Zeka Araştırma Enstitüsü kurmuşlardır. Kore'nin bu stratejik adımları, küresel rekabet gücünü artırmış ve uluslararası alandaki konumunu güçlendirmiştir (Coşkunoglu, 2016).

Güney Kore 2018-2019 döneminde ABD için yedinci sırada yer almıştır. 2020'de Güney Kore, küçük ve orta ölçekli işletmelerin teknolojilerini geliştirmelerini sağlamak

amacıyla 414,4 milyon dolar yatırım yapmıştır. Büyük veri, siber fiziksel sistemler, akıllı sensörler, kablosuz ağlar ve işbirliğine dayalı robot teknolojileri gibi alanlarda devlet desteği sağlanmaktadır. 2025 yılına kadar, Kore'deki her büyük sektörde 4500 akıllı fabrikanın faaliyet göstermesi planlanmaktadır. Hükümetin sağladığı fonlar sayesinde akıllı fabrikaların verimliliği %25 oranında artmış, üretim hatalarındaki azalma ise %27 olmuştur (Koç vd., 2018).

Sonuç itibarıyla Güney Kore, yüksek teknoloji ve inovasyon alanlarında güçlü bir ülke olması sebebiyle Endüstri 4.0'a hızlı bir geçiş yapmıştır. Akıllı fabrikalar, robotik üretim sistemleri ve IoT teknolojilerini kullanarak, üretim süreçlerini optimize etmekte ve yüksek verimlilik elde etmektedir. Dolayısıyla Güney Kore'nin, devlet desteği ve sanayi işbirlikleri sayesinde Endüstri 4.0'ı kendi üretim süreçlerine başarıyla entegre ettiği söylenebilir.

2.3.1.5. Japonya

19.yüzyılın ikinci yarısında, Meiji Restorasyonu sonrasında Japonya, Batı ile ticaret yapmaya başlamış ve nüfus artışına paralel olarak ekonomik gelişmeler iki aşamada gerçekleşmiştir. Birinci aşama 1866'dan İkinci Dünya Savaşı'na kadar sürerken, ikinci aşama 1945'ten 1980'e kadar devam etmiştir. Meiji dönemi (1868-1912) sırasında hükümet, "*Zengin Devlet ve Güçlü Ordu*" politikası izleyerek, binlerce öğrenci gönderdiği Amerika ve Avrupa'da Batı eğitim sisteminin benimsenmesine zemin hazırlamıştır. Aynı dönemde Japonya'da 3.000'den fazla öğretmen, matematik, teknoloji ve yabancı dil dersleri vererek eğitimdeki Batılılaşma sürecini hızlandırmıştır. Savaş sonrası dönemde ise Japonya, reel ekonomik büyüme ile önemli bir sıçrama yapmış ve 1960'larda %10, 1970'lerde %5, 1980'lerde ise %4 civarında büyüme oranları elde etmiştir. Japonya, 1953 ile 1973 arasındaki dönemde, büyük bir tarım ülkesi olmasına rağmen, çelik ve otomobil ihracatında dünya lideri haline gelirken, Tokyo dünyanın en büyük ve en hareketli metropolü haline gelmiştir (Krugman, 1999).

Savaşın ardından yorgun bir şekilde kaybeden ülkelerden Almanya ve Japonya, diğer ülkelere göre çok daha hızlı bir toparlanma süreci yaşamış, dijital dönüşümde Almanya, İngiltere'yi geride bırakırken, Japonya da ABD ve Avrupa'ya karşı güçlü bir rekabet sergilemiştir. Almanya ve Japonya'nın tarım temelli ekonomileri ve çelik gibi stratejik hammaddelere sahip olmaları, sanayileşme sürecinde önemli bir avantaj sağlamıştır. Her iki ülkenin eğitim ve bilime verdikleri önem, kaliteli tüketim malları üretme konusundaki başarıları, düşük maliyetlerle yüksek kaliteli ürünler sunmaları, ve

sanayideki dönüşüm süreçlerinde izledikleri politikalar sayesinde, günümüzde dünya çapında teknoloji ve ekonomi alanlarında önde gelen ülkeler arasında yer almaktadır. Bu ülkelerin eğitim sistemlerinde yapılan reformların teknoloji ve bilim alanındaki ilerlemeleri ne denli büyük bir etki yaratabileceğini göstermektedir (Kılıç ve Alkan, 2018).

Günümüzün gelişmiş ülkeleri, dönemin ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla mevcut teknolojileri kullanarak ve geliştirerek bu süreci ilerletmişlerdir. İngiltere'nin buhar gücünü kullanmaya başlamasıyla başlayan süreç, Almanya ve ABD'nin elektrik kullanımı ile devam etmiş ve günümüzde internetin gelişimi ile ABD, Japonya ve Güney Kore endüstriyel robotları kullanarak üretim süreçlerini değiştirmiştir. ABD, yapay zekâya odaklanırken, Japonya ve Güney Kore robot teknolojisini geliştirmeye öncelik vermiş, Almanya ise bu alanda büyük yatırımlar yapmıştır (Kabarlarlı, 2016).

Endüstriyel dönüşüm süreci, Almanya'da "*Endüstri 4.0*", ABD'de "*Akıllı Üretim Sistemleri*", G20 ülkeleri tarafından "*Yeni Sanayi Devrimi*" olarak tanımlanmış ve genel olarak Endüstri 4.0 terimiyle anılmaktadır. Japonya ise büyük veri, yapay zeka ve robot teknolojilerini hem endüstriye hem de topluma entegre ederek, "*Süper Akıllı Toplum*" kavramını geliştirmiştir. Bu kavram, 2016 yılı Ocak ayında Japonya'nın Bilim, Teknoloji ve İnovasyon Konseyi'nde ilk kez ortaya atılmıştır. Japonya'nın "*Toplum 5.0*" vizyonu, dijital dönüşüm sürecine bireyleri ve toplumu uyarlamayı amaçlamaktadır. Bu kavram, yaşlanan nüfus sorunları, sanal dünya ile gerçek dünyanın entegrasyonu, IoT teknolojilerinin toplum yararına kullanılması, çevre kirliliği ve doğal afetler için çözüm önerileri gibi hedefler doğrultusunda şekillenmiştir ve esas olarak toplum ile bireylerin çıkarlarını gözetmektedir (Arı 2021).

Avrupa ve ABD, dönüşüm sürecine ayak uydururken, Japonya bu süreçte sosyal sorunlara odaklanmış ve yol haritasını buna göre şekillendirmiştir. Japonya, yaşlanan nüfusa yönelik yeni teknolojiler geliştirmiş, sürdürülebilir büyüme hedefiyle yeşil inovasyonlara ve enerji verimliliğine odaklanmıştır. Çevreye dost teknolojiler üreterek karbon kullanımını azaltmayı ve kaynaklardan daha fazla verim almayı amaçlayan akıllı üretim yöntemlerini benimsemiştir. Japonya, bu yaklaşıma "*Monozukuri*" adını vermekte olup, çevreye zarar vermeyen etkin ve mükemmel bir üretim anlayışını ifade etmektedir. Japonya "*Yeşil Nanoteknoloji*", "*Nano-Bio*", ve "*Nanoelektronik*" gibi yeni teknoloji ürünlerine ve yeni nesil yakıt pillerine büyük yatırımlar yapmaktadır (Bağcı, 2018).

Bu bağlamda Japonya, robotik üretim ve otomasyonun en yoğun olduğu ülkelerden biri olması sebebiyle robot teknolojileri ve otomasyon sistemlerinde uzun bir geçmişe sahiptir. Bunun yanı sıra Japonya'nın gelişmiş altyapısı, Endüstri 4.0'ın üretim süreçlerine entegrasyonu konusunda büyük bir avantaj sağlamaktadır.

2.3.1.6. İsviçre

18. yüzyılın sonlarına doğru İngiltere'nin öncülüğünde başlayan sanayi dönüşümüne Almanya, ABD ve Batı Avrupa'nın yanı sıra İsviçre de önemli katkılar sağlamıştır. İsviçre, bu dönüşüm sürecinde kaydettiği büyük ilerlemelerle günümüzde de güçlü bir ekonomik yapıya sahip olmayı başarmıştır. 1990'lı yıllarda İsviçre ekonomisi büyük yapısal değişikliklere uğramış ve küreselleşmenin etkisiyle birçok kurum ve şirket yeniden organize olmuştur. 1991-1993 yıllarında ekonomik durgunluk yaşanmasına rağmen, uygulanan doğru politikalar ve stratejiler sayesinde 1997 yılına kadar enflasyon oranını başarıyla düşürerek bu olumsuz durumdan çıkmayı başarmıştır (Erol, 2016; Acet ve Koç, 2020).

İsviçre'nin coğrafi özellikleri ve iklim koşulları göz önüne alındığında, tarımla ilgilenen nüfusun az olması olasılığı yüksektir. Peynir ve şarap üretimi gibi alanlarda dünyada önemli bir yere sahip olan İsviçre, hammadde açısından ise yeterli kaynağa sahip değildir. 2019 yılına ait bir ülke raporunda, İsviçre'nin dünya çapında rekabet gücü en yüksek ülkelerden biri olarak gösterildiği ve gayri safi yurtiçi hasılası (GSYH) kapsamında mal ve hizmet ihracatındaki payının hızla arttığı belirtilmiştir. İsviçre, özellikle banka ve finans sektörüyle ön plana çıkarken, aynı zamanda ileri teknoloji üretimi, bilgi tabanlı üretim, nitelikli iş gücü ve gelişmiş altyapı gibi alanlarda da önemli bir konum elde etmiştir. Saatçilik, hassas aletler ve makine üretimi gibi geleneksel sanayi dallarının yanı sıra, İsviçre'nin ileri teknolojiyi özellikle ilaç ve biyomedikal alanlarında yoğun bir şekilde kullandığı görülmektedir. Göç veren bir ülke konumuna gelen İsviçre, eğitim ve iş gücü alanlarında birçok Avrupa ülkesine fark atmış ve hizmet sektörü konusunda liderlik konumunu elde etmiştir (İsviçre Ülke Raporu, 2019).

Görüldüğü üzere İsviçre, Endüstri 4.0'ı benimseyen ancak aynı zamanda yüksek kaliteli üretimi ile tanınan bir diğer ülkedir. Ülkedeki sanayi sektörü, dijitalleşme ve otomasyonu etkili bir şekilde kullanarak üretim süreçlerini iyileştirmektedir. İsviçre, hassas mühendislik ve otomasyon sistemleri alanında dünya çapında bir üne sahiptir.

2.3.1.7. Meksika

IMF'nin 2019 verilerine göre, Meksika 1,22 trilyon dolarlık nominal GSYH ile dünyanın en büyük ekonomileri arasında 15. sırada yer almaktadır. Meksika'nın bugünkü ekonomik durumu diğer ülkelerle karşılaştırıldığında kolayca elde edilmemiştir. 18.yüzyılın sonlarında İngiltere'de başlayan sanayi devrimini Meksika, sahip olduğu doğal kaynaklar ve tarım ürünlerinin sömürülmesinden dolayı zamanında yakalayamamıştır. Mevcut ekonomik koşullar ve merkantilist politikalar, ülkenin sanayileşme sürecini geciktirmiş ve yaklaşık 150 yıl geride kalmasına neden olmuştur. General Porfirio Díaz'ın (1876-1911) hükümetinde, demiryolu ağının kurulması ve genişletilmesiyle, farklı bölgelerle iletişim kurulmuş ve ticaretin artması sağlanarak ekonomik büyüme için temel atılmıştır. Coğrafi konumu ve ABD'ye yakınlığı sayesinde Meksika, ticaretinde büyük bir patlama yaşamış ve Latin Amerika'daki en güçlü ticaret gücü haline gelmiştir. Meksika ekonomisi 1910-1920 yıllarında iç savaşların etkisiyle büyük bir durgunluk dönemi geçirmiştir. Meksika Devrimi olarak bilinen dönemde, ülkenin sanayileşmesini sağlamak amacıyla büyük hedefler belirlenmiştir. 1940'larda ise sanayiye yönelik ilgi artmaya başlamıştır (Bayrak, 2018; Ertuğrul ve Deniz, 2018).

1970'lerdeki kötü yönetim nedeniyle sanayi sektörü zayıflamış ve yatırım ortamı bozulmuştur. 1976-1982 yılları arasında sanayi sektörü %6 büyüme göstermiş olsa da, bu dönemdeki ekonomik krizler Meksika'nın ekonomik dengesini bozmaya devam etmiştir. 1994'te kurulan Kuzey Amerika Serbest Ticaret Anlaşması (NAFTA), Meksika'nın sanayisinin gelişmesine önemli katkılar sağlamış ve büyük bir ivme kazandırmıştır. Sınırdan yer alan "Maquiladora" şehirlerinde, dünya çapında markaların fabrikaları kurulmuş ve Meksika, ABD'ye ihracatını büyük ölçüde arttırmıştır. Otomotiv sektörü, Meksika'nın en önemli gelir kaynağı haline gelmiş, bu sektörde imalat sanayinin %30'u, GSYH'nin %16'sı, ihracatın %16'sı ve yabancı sermaye yatırımlarının %5'i karşılanmaktadır (Koç vd., 2018).

Çin ve Hindistan'dan sonra Meksika, ucuz iş gücü ve ABD'ye olan yakınlığı sayesinde hem yerel hem de yabancı yatırımcılar için önemli bir avantaj sunmaktadır. Meksika, ABD pazarının büyük bir kısmını Çin'e kaybetmiş olsa da, coğrafi yakınlık sayesinde küresel ticaretteki pozisyonunu sürdürmeyi başarmıştır. ABD ile serbest ticaret anlaşması, yabancı yatırımcıları Meksika'ya çekerek, üretim faaliyetlerini bu ülkeye kaydırmalarını sağlamıştır. Buna karşın yapılan analizlerde, Meksika'nın Endüstri 4.0 sürecinde henüz büyük adımlar atmadığı görülmektedir. Siemens ve Qualcomm gibi önde

gelen şirketler, 2026 yılına kadar bu alanda büyük ilerlemeler kaydedileceğini öngörmektedir. Yüksek otomasyon maliyetleri, düşük iş gücü maliyetlerine karşılık sanayi dönüşümünü yavaşlatmaktadır (Barutçu, 2019).

Meksika'nın gelecekte başarılı olabilmesi için doğru stratejiler geliştirmesi ve bu stratejileri etkin bir şekilde uygulaması önemlidir. Bunun yanı sıra, artan otomasyon teknolojileri karşısında nitelikli ve eğitilmiş iş gücüne ihtiyaç duyulacağı için, eğitim alanında da ciddi iyileştirmeler yapılması gerekmektedir. Söz konusu adımlar, ülkenin sanayi sektöründeki gelişimini hızlandıracak ve Meksika'yı küresel pazarda daha güçlü bir konuma getirecektir (Biekmann, 2020; Say, 2021b).

Meksika, Endüstri 4.0'a geçiş sürecinde son yıllarda önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Başta otomotiv olmak üzere elektronik ve beyaz eşya üretimi gibi alanlarda dijitalleşme adımlarını hızlandırmıştır. Günümüzde Meksika, düşük maliyetli üretim ile Endüstri 4.0 teknolojilerini entegre etmeye çalışan gelişmekte olan bir ülke olarak dikkat çekmektedir.

2.3.2. Türkiye'de Endüstri 4.0

Sanayi devrimleri, ülkelerin ekonomik büyümesine doğrudan katkı sağlar. Endüstri 3.0 ile geliştirilen robotlar ve 3D yazılım araçları, Endüstri 4.0'ın yapay zeka teknolojileriyle birleşerek üretimde kalite ve verimliliği artırmaya olanak sağlamıştır (Ayboğa ve Görmüş, 2022).

Asya ve Avrupa arasında stratejik bir köprü oluşturan Türkiye, sahip olduğu lojistik avantajlar ve düşük maliyetli iş gücü sayesinde esnek ve düşük maliyetli üretim yaparak küresel pazarda rekabetçi bir konumda bulunmaktadır. 2016 yılında yayımlanan BCG Global Üretim Maliyeti Endeksi'ne göre, Türkiye'nin üretim maliyeti 98 birim iken, ABD'nin maliyeti 100 birim, Almanya'nın ise 121 birimdir. Bu veriler, Türkiye'nin küresel tedarik zincirinde yer alabilmesi ve ihracatını güçlendirebilmesi için sahip olduğu avantajları kullanmasının önemini göstermektedir (TÜSİAD, 2016).

Osmanlı döneminde, 19. yüzyılda sanayileşme hareketliliği başlamış olsa da, Türkiye hammadde ihraç eden, mamul ürün ithal eden ve sanayileşme konusunda başkalarına bağımlı bir durumdaydı. 21. yüzyıl itibarıyla Türkiye sanayideki yapısal değişikliklerle ekonomisini büyütmeğe devam etmiştir. İkinci sanayi devrimiyle elektrik kullanımının yaygınlaşması, sanayide köklü değişikliklerin kapısını aralamıştır. 1929 Dünya Ekonomik Buhranı'nın ardından Türkiye, üretim süreçlerinde önemli gelişmeler

kaydetmiş ve devletçilik anlayışı ile sanayi sektöründe ilerleme sağlanmıştır. Kalkınma planları ile sanayileşme hedeflenmiş Türkiye, ara mal ithalatçısı olma durumundan çıkamamıştır. İthal ikameci politikadan ihracat odaklı büyüme modeline geçiş de büyüme hedeflerini karşılamakta yetersiz kalmıştır (Kalaycı, 2020).

Otomotiv sektörü, Endüstri 4.0 ile daha da gelişmeye devam etmektedir. Yapay zekâ ile kontrol edilen makineler ve robotlar, yaşam tarzımızı değiştirmeye başlamıştır. Türkiye’de Endüstri 4.0 ile ilgili birçok çalışma yürütülmekle birlikte, bazı yorumlara göre ülke hâlâ Endüstri 2.0 ve 3.0 aşamaları arasında bir geçiş süreci yaşamaktadır. Türkiye’deki yabancı ve yerli firmalar, üretim süreçlerini Endüstri 4.0 teknolojileriyle donatarak önemli adımlar atmıştır. Siber fiziksel sistemler ve yapay zekânın gücü, üretimi artırmakla birlikte, tüketici taleplerine hızla uyum sağlayarak dinamik bir gelişim yaratmıştır. Türkiye, düşük maliyetli iş gücü ve rekabet avantajı sayesinde, Endüstri 4.0’ın getirdiği rekabet değişimleriyle her alanda başarılı bir entegrasyon sağlama fırsatına sahip olmuştur (Bilgin, 2018; Koç vd., 2018).

Gelişmekte olan ülkelerde otomotiv sektörü, diğer sektörlerden daha hızlı büyümekte ve bu alandaki firmalar arasındaki rekabet, verimliliği artırmak ve kaynakları daha verimli kullanmak adına önemli bir tetikleyici olmuştur. Türkiye’de de otomotiv sektörü, sanayi üretiminin önemli bir kısmını oluşturarak ülke ekonomisine büyük katkılar sağlamaktadır. Türkiye’de otomotiv sektörünün güçlü sermayesi, yabancı ortaklıkları, gelişmiş yan sanayisi, nitelikli iş gücü ve coğrafi konumunun sağladığı avantajlar, küresel pazarda rekabet şansı sunmaktadır. Yüksek üretim maliyetleri, düşük kapasite, pazarlama sorunları ve sanayinin ana ve yan sanayilerinin yetersizliği, sektördeki zayıf noktalar arasında yer aldığı bilinmektedir. Türkiye’de 2018 yılına göre 2019’da otomotiv pazarındaki satışlar %23,3 oranında azalarak 491.900 adede düşerken, üretim %5,7 oranında azalarak 1.461.244 adede gerilemiştir. 2020 yılına geldiğimizde ise otomotiv pazarı %61,9 oranında artış gösterirken, üretim %11,2 azalarak 1.297.854 adede inmiştir (Yüksekbilgili ve Çevik, 2018; Cerit ve Ören, 2022).

Sanayi Stratejisi Belgesi (2011-2014) çerçevesinde Türkiye’nin hedefi, Avrasya’nın ileri teknoloji ürünlerinde üretim üssü olmaktır. Türkiye, sahip olduğu know-how, altyapı ve üretim kapasitesi ile bu hedefe ulaşarak, Avrasya ekonomisinde güçlü bir üretici konumuna gelecektir. Türkiye Metal Sanayicileri Sendikası (MESS) ve Dünya Ekonomik Forumu (WEF) işbirliğiyle kurulan Türkiye Dördüncü Sanayi Devrimi

Merkezi, ülkenin teknolojik dönüşümüne hız katacak önemli bir adım olmuştur (Genç, 2018).

Bakanlık tarafından hazırlanan yol haritasında ise şu hedefler yer almaktadır;

- Eğitim altyapısının güçlendirilmesiyle nitelikli iş gücü yetiştirilmesi,
- Teknoloji ve yenilik kapasitesinin artırılması,
- Veri iletişim altyapısının güçlendirilmesi,
- Ulusal teknoloji tedarikçilerinin desteklenmesi,
- Kullanıcıların dijital dönüşüm süreçlerinin desteklenmesi ve kurumsal yönetişimin güçlendirilmesi.

Sıralanan hedefler, Türkiye'nin Endüstri 4.0'a entegrasyonunu hızlandırmayı ve küresel rekabette daha güçlü bir konum elde etmeyi amaçlamaktadır (BSTB, 2018; Osman, 2019).

Buhar makinelerinden yapay zeka ile kontrol edilen robotlara geçiş sürecinde, bu değişimden olumlu ya da olumsuz şekilde etkilenen pek çok sektör ve meslek dalı bulunmaktadır. Birçok iş kolu bu teknolojik gelişmelere uyum sağlayamayarak yok olurken, özellikle otomotiv sektörü başta olmak üzere diğer endüstriler için bu dönüşüm, adeta yeniden doğuş anlamına gelmektedir. Kısacası, Endüstri 4.0'a adapte olmak isteyen bir işletme, bu değişim sürecine uyum sağlamak zorundadır. Yol haritasında yer alan önemli unsurlardan biri olan eğitim de bu noktada çok büyük bir öneme sahiptir. Aslında, Endüstri 4.0 sürecinde üretimi sürdürebilmek için sadece teknolojik altyapıya değil, aynı zamanda insana da yatırım yapılması gerektiği aşikârdır (Özdem ve Bora, 2022).

2.3.2.1. Ar-Ge yatırımları

Türkiye'de bilimsel ve teknolojik alandaki çalışmalar, özellikle kalkınma planlarının hazırlanmasıyla önemli bir ivme kazanmış, süreç içerisinde Ar-Ge faaliyetleri üniversiteler, kamu kurumları ve özel sektör tarafından yürütülmektedir. Eğitim sektöründe araştırma ve geliştirme çabaları, mesleki eğitim alanlarına katkı sağlamaktadır (Aslay, 2017).

Bilim, teknoloji ve yenilikçilik politikaları, işletmelerin daha etkin ve verimli çalışabilmesi için Ar-Ge faaliyetlerinin önemini vurgulamaktadır. Ülkelerin küresel pazarda rekabet edebilmek ve diğer ülkelerle arasındaki farkları açabilmek için Ar-Ge

yatırımlarına ağırlık vermesi gerektiğini belirtmektedir. OECD ülkelerinin yıllık ortalama harcama oranları yaklaşık %2,3 civarındayken, Türkiye GSYH'den Ar-Ge için ayırdığı %1'lik pay ile bu ortalamanın oldukça gerisindedir. Bunun başlıca sebeplerinden biri, Türkiye'nin sanayileşme sürecine geç başlamış olmasıdır. 2011'de başlayan Endüstri 4.0 hareketine Türkiye 2015 yılında dahil olmuş ve bu dönemde strateji ve yol haritası belirlenmiş olsa da, Ar-Ge yatırımları bakımından birçok ülkenin gerisinde kalmıştır (Kamber, 2019).

Türkiye'nin 2023 hedefleri arasında Ar-Ge yatırımlarının GSYH içindeki oranını arttırmak yer almaktadır. Hedefe ulaşmak için vergi teşvikleri ve diğer mali destek araçlarının kullanılması planlanmış olmasına karşın tam anlamıyla başarı sağlandığı söylenemez. 2023 hedefine ulaşabilmek için Ar-Ge yatırımlarının artırılması gerektiği ve bunun istihdamı artırma potansiyeli taşıdığı açıktır (Sarısoy, 2017).

Sonuç itibarıyla Türkiye'deki Ar-Ge yatırımları, Endüstri 4.0 teknolojilerinin benimsenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Sanayi Bakanlığı, KOSGEB ve TÜBİTAK gibi kuruluşlar, özellikle küçük ve orta ölçekli işletmelerin (KOBİ) dijital dönüşüm süreçlerini hızlandırmak için çeşitli teşvik programları düzenlemektedir. Teknoloji ve Yenilik Destek Programları (TEYDEB) gibi programlar, yerli Ar-Ge projelerini destekleyerek Endüstri 4.0'ın bileşenlerinin ülke genelinde yayılmasına yardımcı olmaktadır. Bu tür programlar, Türk sanayisinin küresel pazarda daha rekabetçi olmasını sağlamak için büyük bir öneme sahiptir.

2.3.2.2. Politikalar

Bilim, teknoloji ve yenilikçilik politikalarının temel amacı, henüz var olmayan yeni fikirler ve projelere sahip girişimciler ya da firmalar için Ar-Ge faaliyetleriyle destek sağlamaktır. Bilim, teknoloji ve yenilikçilik politikalarının etkili ve verimli olabilmesi için, bir ülkenin belirli bir sanayileşme düzeyine ulaşmış olması gerekmektedir. Eğer ülkenin sanayi altyapısı, Bilim, teknoloji ve yenilikçilik desteklerinin uygulanması için yeterli değilse, bu durum hem kaynakların hem de desteklerin israfına yol açabilir. Girişimciler ya da şirketlerin geliştirdiği projelerin verimli şekilde ilerleyememesi, ekonomik olarak yeterli fayda sağlamayacaktır (Kalaycı, 2020).

Türkiye'nin yüksek katma değerli ürünler üretmesi, sanayi alanında önemli bir aşama kaydetmesiyle doğrudan ilişkilidir. Gelişmiş bir sanayi yapısı, Bilim, teknoloji ve yenilikçilik politikalarının etkinliğini ve uygulanabilirliğini önemli ölçüde artırır. Bunun

yanı sıra bilim, teknoloji ve yenilikçilik politikasının başarısı için Ar-Ge yatırımlarının da uygun şekilde desteklenmesi gerekmektedir (Kılıç ve Alkan, 2018).

2.3.3. Endüstri 4.0. gelecek perspektifleri

Endüstri 4.0'ın temelinde bulunan bilişim altyapısı, akıllı üretim sistemlerinin hayata geçmesiyle yeni iş modellerinin ortaya çıkmasına yol açmakta ve bu da günlük yaşamdan çalışma hayatına, ürün yapılarından tedarik ve satış süreçlerine kadar geniş bir alanda önemli değişimler yaşanacağına işaret etmektedir (İyigün, 2021).

Endüstri 4.0 ile artan otomasyon sayesinde, birçok mevcut işin daha kısa sürede, daha düşük maliyetle ve daha yüksek kalitede yapılabileceği öngörülmektedir. Bu gelişme, kâr amacı güden işletmelerin üretim süreçlerini verimli bir şekilde gerçekleştirebilmesi için yoğun bir şekilde otomasyona yönelmeleri gerektiğini ortaya koymaktadır. Dijitalleşme ile birlikte 2020 yılı itibariyle yaklaşık 50 milyar cihazın ağlar aracılığıyla birbirleriyle iletişim kurarak çalışması beklenmektedir. Akıllı üretim sistemleri, akıllı şehirler, akıllı fabrikalar, akıllı evler, akıllı lojistik ve akıllı ulaşım gibi unsurların ağlarla birleşmesiyle, önümüzdeki yıllarda küresel ticaret hacminin büyük bir kısmına hâkim olunacağı tahmin edilmektedir.

Degryse (2016), dijitalleşmenin iş gücü piyasasına etkilerini incelediği çalışmasında mevcut mesleklerin farklılaşması ve bazılarının tamamen ortadan kalkma olasılığı olduğunu belirtmiş, aynı zamanda teknolojinin gelişmesiyle yeni mesleklerin ortaya çıkacağına dikkat çekmiştir. Endüstri 4.0'ın Türkiye üzerindeki potansiyel etkileri değerlendirildiğinde, üretim sektöründe verimliliğin %4 ile %7 arasında artacağı, rekabet gücü ve sürdürülebilirlik açısından önemli katkılar sağlayacağı öngörülmektedir.

TÜSİAD tarafından 2016'da yayımlanan bir raporda, Endüstri 4.0'ın Türkiye'ye sağladığı potansiyel faydaların yanı sıra, ülkenin düşük katma değerli üretim döngüsünden yüksek katma değerli yatırımlar döngüsüne geçiş yapma fırsatını sunduğu vurgulanmaktadır. Raporda, Endüstri 4.0'ın entegrasyonunun sağlanmasıyla üç ana faydanın elde edileceği belirtilmektedir: Küresel rekabet gücünün artması, küresel değer zincirinden daha yüksek katma değerli ürün payının alınması ve iş gücü profiline gelişmesi. Bu dönüşümün, üretim süreçleri, müşteri ilişkileri ve destek birimlerinde daha gelişmiş bağlantılar kurarak yeni iş olanakları yaratması ve nitelikli iş gücü tarafından gerçekleştirilen yeni iş tanımlarının ortaya çıkması beklenmektedir (TÜSİAD, 2016).

Endüstri 4.0'ın getireceği değişikliklerle, üretim süreçlerinin hızlanması ve etkinliğin artması beklenmektedir. Bunun yanı sıra, büyük verinin kullanımıyla birlikte ürün kalitesinin yükselmesi ve müşteri memnuniyetinin artması da hedeflenen sonuçlar arasında yer almaktadır. Bunun yanı sıra Endüstri 4.0 ile daha fazla otomasyonlu üretim, müşteri taleplerine uygun üretim süreçlerinin gelişmesi, daha kaliteli ve yenilikçi ürünlerin üretilmesi, kişiselleştirilmiş ürünlerin müşterilere sunulması ve genel olarak üretkenlik ile verimliliğin artması beklenmektedir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu araştırma, 2013 yılı Ocak ayından başlayarak 2024 yılı Aralık ayı sonuna kadar ayına kadar Endüstri 4.0 merkezinde önceden belirlenen anahtar kelimeler merkezinde veri toplayarak ilgili teknolojilerdeki araştırma eğilimlerinin sistematik bir bibliyometrik analizini sunmayı amaçlamaktadır. Metodoloji, nicel bibliyometrik göstergeleri, ağ analizini ve tematik haritalamayı entegre etmektedir. Aşağıda metodolojik bir sıralama ve aşamaların önemli hususlarına değinilerek detaylandırılmıştır:

3.1. Veri Toplama

Web of Science (WoS) çeşitli disiplinlerde yayın yapan bilimsel dergilerin etki gücünü, yayınlanan makalelerin aldığı atıf sayısını gösteren ve ayrıca yazarların makaleleri ve makalelerin kaynakçalarını listeleyen bibliyografik bir veri tabanıdır. Bu veri tabanı tez çalışmasının evrenini oluşturmaktadır. Bu evrende yapılacak olan çalışmaların bibliyometrik analizini yapmak adına belirlenen anahtar kelimeler şu şekilde sıralanmıştır:

- Yapay Zeka (Artificial Intelligence)
- Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)
- Makine Öğrenimi (Machine Learning)
- Dijitalleşme (Digitalization)
- Sanal Gerçeklik (Virtual Reality)
- Artırılmış Gerçeklik (Augmented Reality)
- Bulut Bilişim (Cloud Computing)
- Blok Zincir (Block Chain)
- Siber Fiziksel Sistemler (Cyber Physical Systems)
- Akıllı Fabrikalar (Smart Factories)
- Akıllı Üretim Sistemleri (Smart Production Systems)
- Karanlık Fabrikalar (Light-out Factories, Dark Factories)
- Büyük Veri (Big Data)

3.1.1. Veri kaynakları ve arama stratejisi

Bilimsel yayınlara erişim noktasında, mühendislik, bilgisayar bilimleri ve disiplinler arası araştırmaları kapsamlı bir şekilde kapsamı nedeniyle araştırmanın evrenini temsil eden örneklem Web of Science'tan oluşturulmuştur. Yukarıda ifade edilen

yaygın taranan anahtar kelimeleri filtreleyerek çalışmanın sınırları belirlenmiştir. Aşağıdaki anahtar kelimeler kullanılarak bir Boolean arama dizesi oluşturulmuştur:

- "Endüstri 4.0" VEYA "Dördüncü Sanayi Devrimi"
- "Yapay Zekâ" VEYA "AI" VEYA "Makine Öğrenimi" VEYA "ML"
- "Dijitalleşme" VEYA "Dijital Dönüşüm"
- "Akıllı Üretim" VEYA "Akıllı Fabrika"

Disiplinler arası kesişimleri yakalamak için "Edge Computing", "Blockchain", "Digital Twins" ve "VR/AR" gibi ek terimler dahil edilmiştir. Bu aşama farklı bilim dallarından Endüstri 4.0 kavramına katkı sunan akademik çalışmaların kapsamlı bir şekilde incelenmesini sağlarken aynı zamanda detaylı bir arama yapma imkânı da sunmuştur. Literatür araştırması, Ocak 2013 ile Aralık 2024 arasında yayınlanan literatürü kapsamakta olup, böylece hem temel çalışmaları hem de yeni ortaya çıkan eğilimleri içermektedir.

3.1.2. Dahil etme ve dışlama kriterleri

Analiz, İngilizce yayınlanan hakemli dergi makalelerini, konferans bildirimlerini ve derleme makaleleri içermektedir. Kitaplar, hakemli olmayan raporlar, patentler ve İngilizce olmayan yayınlar gibi öğeler araştırma dışında tutulmuştur.

3.1.3. Veri çıkarma

Veri toplama kapsamında önemli görünen bir diğer adım veri çıkarma aşamasıdır. Büchter vd., (2020)'ye göre sistematik incelemelerde araştırmaya dahil edilen çalışmalardan önceden tanımlanmış bilgilerin yapılandırılmış biçimde (örneğin tablo, form ya da veri giriş sistemi) çekilmesi işleme verilen addır. Bu işlem, çalışmanın tasarımı, sonuçları, demografik veriler gibi kritik bilgileri içerebilir ve doğruluk, tutarlılık ve şeffaflık için genellikle çift veri çıkarımı önerilir. Öncelikli kriter Endüstri 4.0 kavramı ve anahtar kelimelerin akademik çalışmalarda geçmesi olmuştur. Bunun yanı sıra her yayın için, aşağıdakileri de içeren meta veriler çıkarılmıştır:

- Tanımlayıcı Veriler: Başlık, özet, anahtar kelimeler, yayın yılı ve kaynak (dergi veya konferans adı) gibi verileri içermektedir.
- Katılımcı Verileri: Yazar adları, kurumsal bağlantılar ve menşe ülkelerden oluşmaktadır.

- Etki Ölçütleri: Atıf sayıları ve referans listelerini kapsamaktadır.

Başlangıçta 12.387 yayından oluşan set, tekilleştirme ve dahil etme kriterlerinin uygulanmasının ardından 11.031'e indirilmiştir.

3.1.4. Veri işleme

Veri işleme iki aşamalı bir süreçtir. İlk aşamada temizleme ve normalleştirme ile tutarlılık sağlanırken ikinci aşama olan şebeke inşaatında ise ortak yazarlık, anahtar kelime ve kurumsal iş birliği ağı üzerinde odaklanılır.

3.1.4.1. Temizleme ve normalleştirme

Tutarlılığı sağlamak için:

- Yazar Anlam Ayrımı: Yazar adlarındaki farklılıklar (örneğin, "Zhang, J." ve "Zhang, Jie") ORCID tanımlayıcıları ve kurumsal veriler kullanılarak çözülmüştür.
- Ortaklık Standardizasyonu: Kurum adları normalleştirilmiştir (örneğin, "MIT", "Massachusetts Institute of Technology" olarak standartlaştırıldı).
- Anahtar Kelime Konsolidasyonu: Eşanlamlı terimler (örneğin, "AI", "Yapay Zeka" ile birleştirildi) ve yazım hataları önceden tanımlanmış bir eşanlamlılar sözlüğü kullanılarak düzeltilmiştir.

3.1.4.2. Şebeke inşaatı

Python (NetworkX kütüphanesi ile) ve görselleştirme için Gephi kullanılarak üç ana ağ oluşturulmuştur:

- Ortak Yazarlık Ağı: 37566 yazar (2024 itibarıyla) ve 107562 iş birliği bağlantısından oluşmaktadır.
- Anahtar Kelime Birlikte Oluşum Ağı: 160619 eşleştirilmiş ilişki ile bağlanan 23723 farklı anahtar kelime içermektedir.
- Kurumsal İş birliği Ağı: 31777 İş birliği bağı oluşturan 4312 kurum dahil edilmiştir.

3.1.5. Analitik Teknikler

Bibliyometrik analiz kapsamında veri toplama aşamasının analitik teknikler bölümü altı ana süreçten meydana gelmektedir.

3.1.5.1. Bibliyometrik Göstergeler

Eğilimleri ve etkileri belirlemek için nicel analiz yapılmıştır:

Büyüme Eğilimleri: Yıllık yayın sayısı 2013'te 51'den 2024'te 2.714'e çıkarak önemli ölçüde artmıştır.

Atıf Analizi: Etkili çalışmalar (örneğin, Shi vd., 2016; Lei vd., 2017) 2016 ve 2018 yılları arasında atıf artışları sergilemiştir. Artan yayın hacmi ışığında atıf seyreltmesini hesaba katmak için ayarlamalar yapılmıştır.

Atıf Patlamaları: Atıflardaki hızlı artışlar (örneğin, Holzinger vd., (2020) tarafından YZ'de "nedensellik" üzerine yapılan çalışmalar etkili yayınların belirlenmesine yardımcı olmuştur.

3.1.5.2. Ağ Analizi

Etkili araştırmacıları ve kurumları ortaya çıkarmak için çeşitli merkezilik ölçütleri uygulanmıştır:

Derece Merkeziliği: Bir düğümün doğrudan bağlantı sayısının ölçüsüne verilen addır. Sosyal ağ analizlerinde, yüksek derece merkeziliğe sahip düğümler, ağı doğrudan bağlayan "hub" (merkezi) konumundadır (Zhang ve Luo, 2017: 1). Üretken katılımcıları (örneğin, 350'den fazla yayını olan Amir Masoud Rahmani) ve kilit kurumları (örneğin, Çin Bilimler Akademisi) belirlemiştir.

Arasındalık Merkeziliği: Bir düğümün diğer tüm düğümler arasındaki en kısa yollar üzerindeki "köprü" konumunu ölçer. Yüksek arası-ndalık merkeziliği, bir düğümün ağ içinde bilgi akışını kontrol edebilme potansiyelini gösterir (Zhang ve Luo, 2017: 2). CNRS ve DOE gibi farklı araştırma kümelerini birbirine bağlayan köprü kurumları ortaya çıkarmıştır.

Yakınlık Merkeziliği: Bir düğümün ağıdaki diğer tüm düğümlere olan ortalama uzaklığının tersidir. Yani, bir düğüm küçüklü-yüksek ölçekte uzaklığa göre daha merkeziyse, bilgiye daha hızlı erişebilme avantajına sahiptir (Zhang ve Luo, 2017: 3). Muhammad Khurram Khan ve Abdullah Gani gibi araştırmacıların yüksek yakınlık gösterdiği (0,006'nın üzerinde) bireysel düğümlerin erişimini değerlendirmeyi sağlamıştır.

Louvain algoritması büyük ölçekli ağlarda topluluk (community) yapısını ortaya çıkarmak için kullanılan, modülerite optimizasyonuna dayalı bir algoritmadır. Ağ yapısını optimize ederek düğümleri topluluklar halinde bölümlenmeyi amaçlar (Blondel vd., 2008: 1). Bu algoritma aracılığıyla topluluk tespiti, kurumsal ağı 98 kümeye ayırmış ve en

büyük topluluk 3953 düğümü kapsamıştır. Yüksek ortalama kümeleme katsayısı (0,8968), güçlü yerleştirilmiş iş birliği modellerinin varlığını pekiştirerek doğrulamıştır. 0.8968 katsayısının 1 sayısına yakın olması neredeyse tüm makalelerin iki ve daha fazla yazarlı olduğunu işaret etmektedir.

3.1.5.3. Tematik Evrim

Gephi kullanılarak görselleştirilen anahtar kelime eş-oluşum haritalaması, gelişen araştırma temaları hakkında içgörü sağlamıştır:

- 2016-2018: "Uç Bilişim" ve "Kestirimci Bakım "a vurgu yapıldığı gözlenmiştir.
- 2019-2021: "Yapay Zekâ Açıklanabilirliği" ve "Blok Zinciri" gibi konulara doğru bir evrilme tespit edilmiştir.
- 2021-2024: "Dijital İkizler" ve "6G Ağları "na odaklanıldığı gözlenmiştir.

3.1.5.4. Araçlar ve Yazılımlar

Veri analizi ve görselleştirme şu şekilde gerçekleştirilmiştir:

- Python: Veri temizleme için Pandas, ağ analizi için NetworkX ve istatistiksel değerlendirmeler için SciPy gibi kütüphanelerden yararlanılmıştır.
- VOSviewer: Anahtar kelime yoğunluk haritaları oluşturmak için kullanılmıştır.
- Gephi (v0.10): ForceAtlas2 düzeni ile ortak yazarlık ve anahtar kelime ağları oluşturmak ve görselleştirmek için faydalanılmıştır.
- Tableau: Zamansal trend görselleştirmeleri oluşturmak için kullanılmıştır.

3.1.5.5. Etik Hususlar

Çalışmada etik standartlara bağlı kalınmıştır:

- Veri Gizliliği: Yalnızca kamuya açık meta veriler kullanılmış, hiçbir hassas kişisel veri toplanmamıştır.
- Önyargı Azaltma: Arama dizileri, konuların kapsamlı ve tarafsız bir şekilde ele alınmasını sağlamak için üç bağımsız araştırmacı tarafından incelenmiştir.

3.1.5.6. Sınırlamalar

Araştırma kapsamında dikkat edilen sınırlamalar ya da kısıtlamalar aşağıdaki gibi belirtilmiştir:

- Veritabanı Yanlılığı: Scopus ve Web of Science gibi büyük veritabanları, İngilizce olmayan yayınları ve konferans yayınlarını eksik temsil edebilir.
- Atıf Zaman Gecikmesi: Yakın tarihli yayınlar (2023-2024), akademik atıflardaki doğal gecikme nedeniyle daha düşük atıf sayılarına sahip olabilir.
- Disiplinler Arası Çakışma: Ek anahtar kelimelerin dahil edilmesine rağmen, bazı niş konular yanlışlıkla gözden kaçmış olabilir.

Nicel göstergeleri, ağ analizini ve tematik haritalamayı entegre eden titiz bir bibliyometrik çerçeve kullanan bu çalışma, Endüstri 4.0, Yalın Düşünce ve ilgili teknolojik yeniliklerin evrimi hakkında değerli bilgiler sunmaktadır. Burada detaylandırılan yöntemler, tekrarlanabilirliği ve mevcut akademik standartlarla uyumu sağlayarak, hızla gelişen bu araştırma ortamına ilişkin daha fazla sorgulama için zemin hazırlamaktadır.

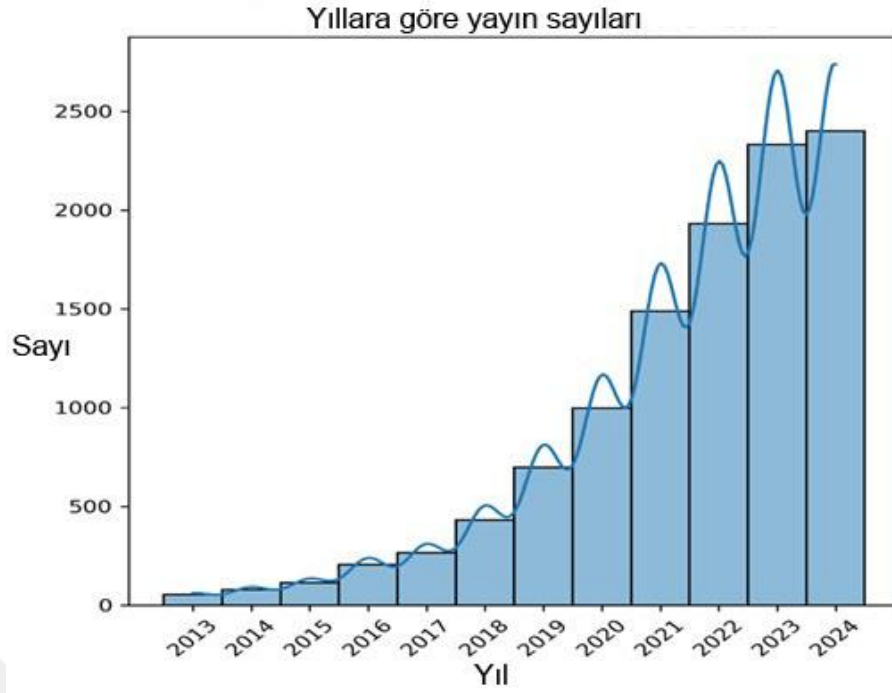
3.2. Analiz

Bu bölümde araştırmanın analiz aşamaları detaylı bir biçimde sunulmuştur. Ana başlıklar literatür analizi ve eğilimler, atıf analizi, bölgesel ve kurumsal analiz, bölgesel yayın ve atıf eğilimleri olmak üzere sırasıyla ifade edilmiştir.

3.2.1. Literatür analizi ve eğilimler

3.2.1.1. Araştırma ortamına genel bakış

Bibliyometrik analiz, Endüstri 4.0 ve teknoloji tabanlı üretime (yapay zeka, makine öğrenimi, dijitalleşme, VR/AR, bulut bilişim ve akıllı üretimi kapsayan) uygulanan yalın düşünce alanındaki araştırmaların son on yılda patlayıcı bir büyüme yaşadığını ortaya koymaktadır. Küçük bir sayıda yayınlara 2013 yılında başlayan bu alan, 2018-2021 yılları arasında önemli bir artış göstererek istikrarlı bir yükselişe tanıklık etmiş ve 2023-2024 yıllarında en yüksek yayın sayısına ulaşmıştır (Şekil 3.1.). Bu eğilim, yapay zekâ ve dijital teknolojilerdeki ilerlemelerin inovasyonu yönlendirmeye devam ettiği akademik çalışma sayılarında da görülen bir yansımadır.



Şekil 3.1. Araştırmanın örneklemindeki yıllık yayın sayısı

3.2.1.2. Ana temalar ve konular

Literatür tutarlı bir şekilde birkaç ana temayı vurgulamaktadır (Şekil 3.2.):

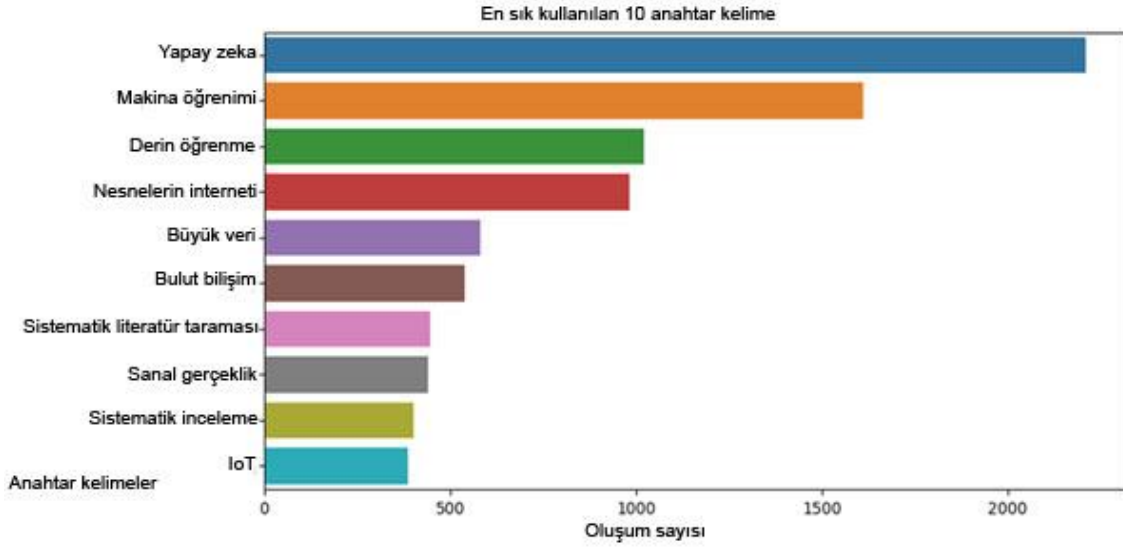
Dijital Dönüşüm ve Endüstri 4.0: Araştırmacılar, Endüstri 4.0 süreçlerini ve kaynak verimliliğini optimize etmek için dijitalleşme stratejileriyle bütünleştirmektedirler.

İleri Hesaplama Teknolojileri: Temel konular arasında yapay zekâ ve makine öğrenimi uygulamaları, uç bilişim ve blok zinciri teknolojileri yer almaktadır. Çığır açan çalışmalar (örneğin Shi vd. 2016 tarihli uç bilişim makalesi ve Lei vd. 2017 tarihli kestirimci bakım çalışması) akıllı fabrikalarda gerçek zamanlı veri işleme, arıza tespiti ve otomasyon için zemin hazırladığı düşünülmektedir.

Güvenlik, Güven ve Açıklanabilirlik: "Kara kutu" YZ'nin yükselişiyle birlikte, belirsizlik ölçümü (Abdar vd., 2019) ve açıklanabilir YZ (Holzinger vd., 2020) üzerine yapılan çalışmalar, otomatik karar vermede şeffaflık ve güvenilirlik sağlamak için kritik hale gelmiştir.

Dijital İkizler ve Siber-Fiziksel Sistemler: Daha yakın tarihli çalışmalar, simülasyon, gerçek zamanlı izleme ve öngörücü bakımı vurgulayarak, üretim ve kentsel

planlamanın geliştirilmesinde dijital ikizlerin ve IoT tabanlı çerçevelerin kullanımını vurgulamaktadır.

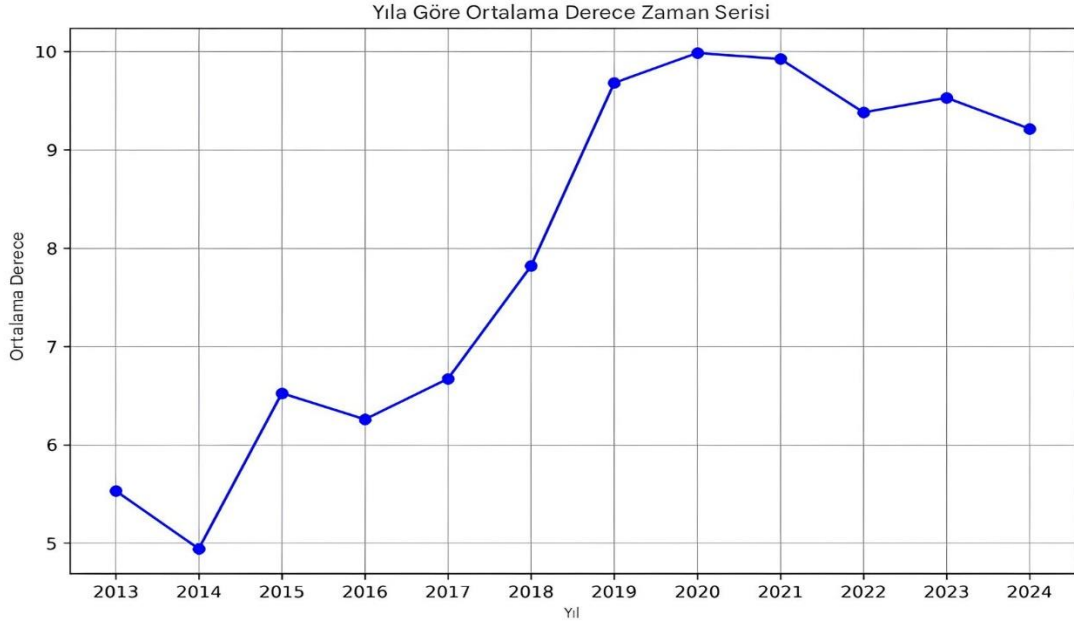


Şekil 3.2. Görülme sıklığına göre anahtar kelimeler

3.2.1.3. Yayınların Yıllar İçindeki Trendlerinin Evrimi

Yayın Büyümesi ve Atıf Dinamikleri: Yıllık yayın sayısı 2013'te birkaç düzine iken 2024'e kadar binlere ulaşmıştır. Atıf eğilimleri, uç bilişim ve kestirimci bakım üzerine temel çalışmalara odaklanarak 2016 yılında bir zirve ortaya koymaktadır ve bunu, artan araştırma hacmi nedeniyle makale başına ortalama atıflarda doğal bir düşüş izlediği gözlenmektedir.

Disiplinler Arası Genişleme: Anahtar kelime eş-oluşum analizi, ortalama ağ derecesinin 2014'te 5 iken 2021'de 9,8'e ve 2024'te 9'a yaklaştığını göstermektedir (Şekil 3.3.), bu da araştırma makalelerinin yapay zeka ve makine öğrenmesinden blok zinciri ve IoT'ye kadar çeşitli temaları giderek daha fazla entegre ettiğini göstermektedir.



Şekil 3.3. Yıllara göre ortalama zaman serisi

Bu büyümeye rağmen, anahtar kelime ağlarının genel yoğunluğu azalmaktadır (Şekil 3.4.), yeni konular ortaya çıkarken, bunların genellikle daha uzmanlaşmış ve yerleşik araştırma alanlarıyla daha az bağlantılı olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.4. Anahtar kelime ağlarının genel yoğunluğunun zaman serisi

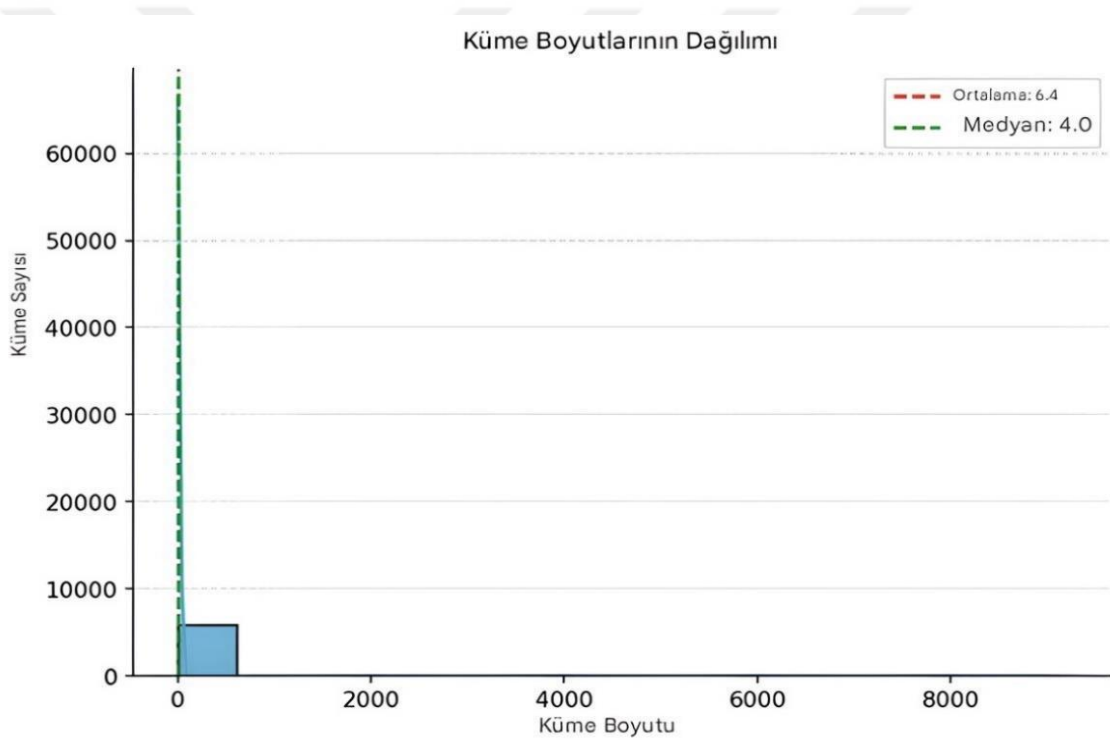
Bir grafiğin yoğunluğu, grafiğin tam olmaya ne kadar yakın olduğunu (yani, tüm olası kenarlara- anahtar kelimelere sahip olduğunu) ölçmektedir.

Bu örüntü, olgunlaşan ve çeşitlenen bir araştırma alanının göstergesidir. Yerleşik araştırma alanları yoğun bir şekilde birbiriyle bağlantılı anahtar kelimelere sahip olabilir,

ancak disiplinler arası entegrasyondan yeni fikirler ortaya çıktıkça, bu yeni anahtar kelimeler daha eski, daha konsolide terimler kadar çok sayıda çapraz konu bağlantısı oluşturmadan daha küçük, niş kümeler içinde bağlantı kurma eğilimindedir. Bu durum, anahtar kelime başına ortalama bağlantı sayısında artışa (daha yüksek derece) yol açarken, aynı zamanda tüm olası bağlantılara göre gerçekleşen bağlantıların oranında azalma olacağı şeklinde yorumlanabilir (daha düşük yoğunluk).

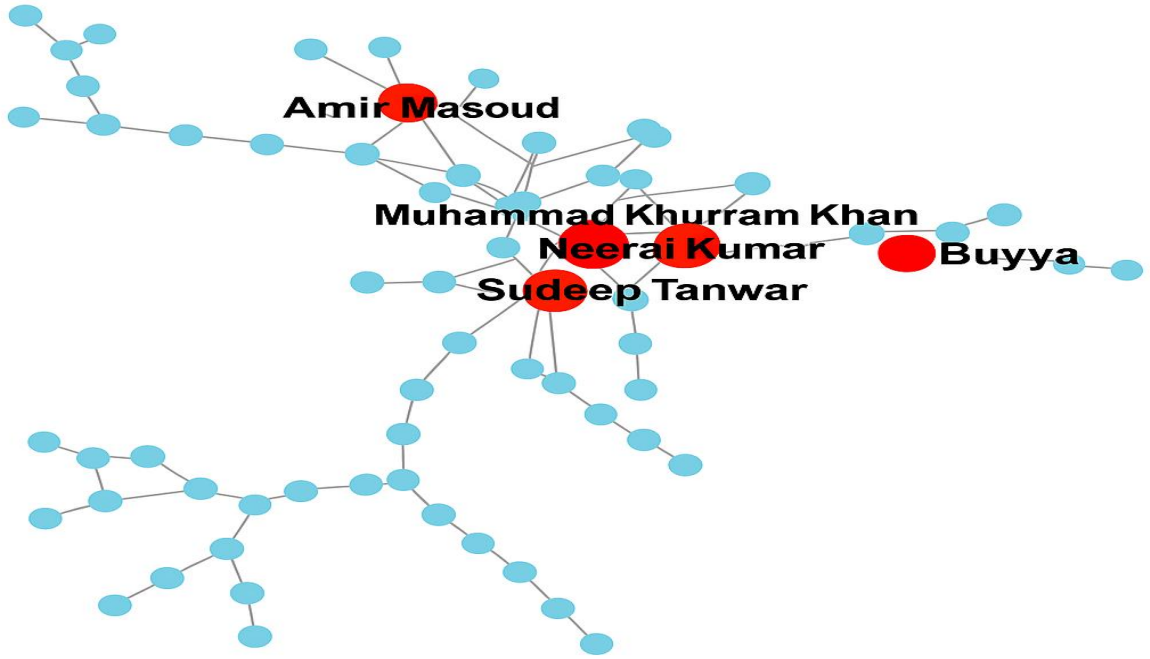
3.2.1.4. İş birliği Ağı Dinamikleri

Ortak yazarlık ağı 5874 farklı iş birliği kümesi ile hem daha büyük hem de daha parçalı hale gelmiştir. En büyük bileşen 9204 gibi devasa bir boyutta olsa da, 3746'dan fazla küme 5'ten az yazar içermektedir.



Şekil 3.5. Yazar ağının küme büyüklüğü histogramı

Ortak yazarlık ağının büyüklüğünün histogramda görüldüğü üzere 5874 bağlantı bileşeninin varken yazar sayısında kayda değer bir azalma gözlemlenmiştir. Başka bir deyişle bazı yazar kümeleri beş ya da altı yazarla bağlantılı iken bazı popüler yazarların çok büyük sayıda yazarla etkileşimde olduğu görülmektedir. Bu durum Şekil 3.6'da ifade edilmiştir.



Şekil 3.6. Yazar Ağındaki en büyük bağlantılı bileşen.

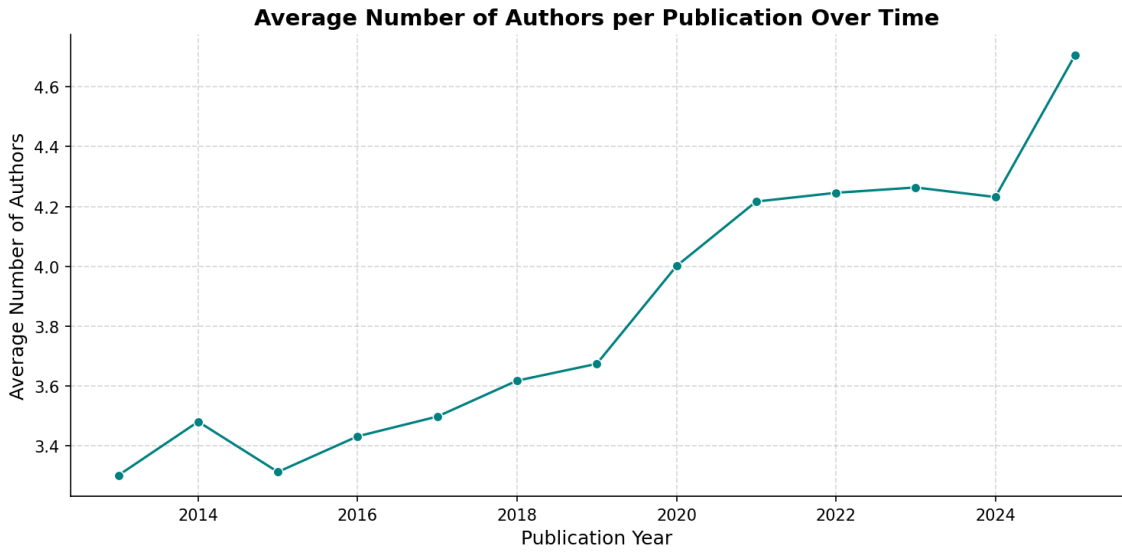
Çizelge 3.1., yazar iş birliği ağının en büyük bağlantılı bileşenindeki 400 yazarı listelemektedir. Genel olarak 2.714 düğüme sahip olan daha büyük ağın sadece küçük bir bölümünü oluşturan bu sayı, katkıda bulunanların sayısı zamanla artmış olsa bile yazar ağının zayıf dünya çapında entegrasyon gösterdiğini yansıtır.

Bu ağ, yazarların genellikle sıkı sıkıya bağlı gruplar halinde çalıştığını (genellikle aynı kurum veya bölge içinde) gösteren yüksek ortalama kümeleme katsayısı (yaklaşık 0,9) ile öne çıkmaktadır. Bu, yerel iş birliğinin güçlü olmasına rağmen kurumlar arası veya dünya çapında iş birliğinin hala gelişmekte olduğunu göstermektedir. Bu eğilim, önceki bibliyometrik sonuçlarla uyumlu olduğundan daha genel, daha çeşitlendirilmiş araştırma ağlarını destekleme ihtiyacını göstermektedir (Wang vd., 2016; Holzinger vd., 2020).

Çizelge 3.1. En çok bağlantı kurulan 5 yazar

Metrik	Değer
Ağıdaki Yazarların Toplam Sayısı	2.714
En Büyük Bağlantılı Bileşendeki Yazar Sayısı	400
Toplam Ağın En Büyük Bileşendeki Oranı	Yaklaşık %15
Ortalama Kümeleme Katsayısı	~0,9
Anahtar Gözlem	Güçlü yerel iş birliği, sınırlı küresel yazar entegrasyonu
Katılım	Kurumlar arası ve uluslararası iş birliklerinin geliştirilmesi

Yazar ağındaki yüksek ortalama kümelenme katsayısı (0,9'a yakın), yerel iş birliklerinin güçlü olmasına rağmen küresel bağlantının sınırlı kaldığını göstermekte, disiplinler arası ve gruplar arası ortaklıklar için fırsatlara işaret etmektedir.



Şekil 3.7. Yayın başına düşen ortalama yazar sayısının yıllara göre dağılımı

Zaman içinde yayın başına ortalama yazar sayısındaki artış eğilimi (3,4 ila 4,6) tipik olarak iş birliğine dayalı araştırma çabalarındaki artışı göstermektedir (Şekil 3.7.). Bu değişim, genellikle kurumları ve hatta ülkeleri kapsayan disiplinler arası ekipler gerektiren bilimsel sorunların artan karmaşıklığını yansıtmaktadır. Ayrıca, doğal olarak çok sayıda katılımcıyı içeren büyük ölçekli araştırmalar veya küresel veri girişimleri gibi "büyük bilim" projelerinin yükselişiyle de uyumlu olduğu değerlendirilebilir. Ek olarak etkili çalışmalar ve kilit katkıda bulunan yazarlar aşağıda belirtilmiştir.

3.2.1.5. Etkili çalışmalar ve kilit katkıda bulunanlar

Endüstri 4.0 araştırmalarının gelişimini şekillendiren bazı yazarlara ve çalışma alanlarına aşağda yer verilmiştir:

Shi vd., (2016) uç bilişim üzerine yaptığı çalışma, IoT ve akıllı üretimde gerçek zamanlı işlemenin temelini atmıştır.

Lei vd., (2017), kestirimci bakım için makine öğreniminin önemli bir keşfini sağlamıştır.

Abdar vd., (2019) ve *Holzinger vd., (2020)*, sırasıyla belirsizlik ölçümü ve YZ açıklanabilirliği üzerine tartışmalar geliştirerek YZ sistemlerinde kritik güven ihtiyacını ele almıştır.

Dai vd., (2020) ve *Allam vd., (2021)*, endüstriyel bağlamlarda blok zinciri uygulamalarını ve dijital ikizleri keşfederek alanı daha da irdelemişlerdir.

Lee vd., (2021), Endüstri 4.0 uygulamaları için temel bir mimari oluşturmak amacıyla IoT'yi gerçek zamanlı analitikle entegre ederek akıllı fabrikalarda siber-fiziksel sistemler (CPS) için ölçeklenebilir bir çerçeve sunmuşlardır.

Tao vd., (2019), endüstriyel IoT'de bir makine öğrenme tekniğı olan federe öğrenmenin kullanımına öncülük ederek veri gizliliğini ve ölçeklenebilirliği korurken dağıtılmış cihazlarda merkezi olmayan yapay zeka modeli eğitime olanak sağlamışlardır.

García vd., (2022), minimum gecikmeyle gerçek zamanlı kusur tespiti sağlamak için uç cihazlara hafif derin öğrenme modelleri dağıtarak kalite kontrol için gelişmiş uç yapay zekâ kullanmıştır.

Amir Masoud Rahmani: 350'den fazla yayınıyla IoT, yapay zeka ve bulut-uç bilişim alanındaki çalışmaları Endüstri 4.0 inovasyonlarının merkezinde yer almış ve dünyanın en iyi %2 bilim insanı arasında tanınmasını sağlamıştır.

Nima Jafari Navimipour: Bulut bilişim, kuantum bilişim ve dağıtık sistemler için yapay zeka alanlarındaki katkılarıyla tanınan Navimipour'un çalışmaları birçok disiplini bir araya getirmiştir.

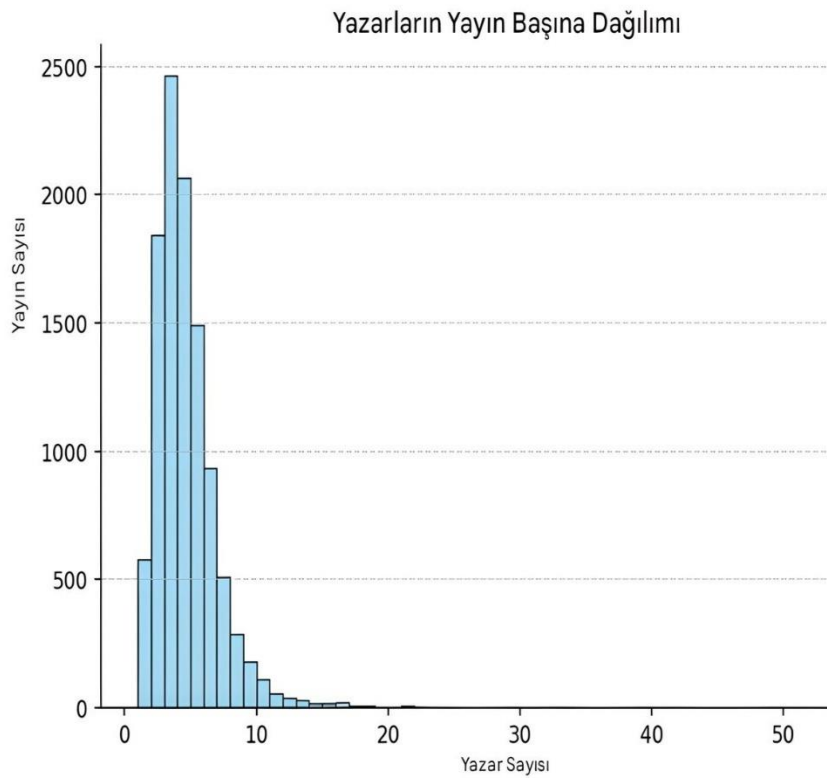
Neeraj Kumar: Yapay zekâ güdümlü güvenlik, siber-fiziksel sistemler ve yeni nesil ağlar (5G/6G) alanlarında önde gelen bir isim olan Kumar'ın üretken çalışmaları birçok gelişmiş Endüstri 4.0 uygulamasının temelini oluşturmaktadır.

Abdullah Gani: Mobil bulut bilişim ve kablosuz ağlar üzerine yaptığı araştırmalar, akıllı üretimde gerçek zamanlı, yapay zeka odaklı bağlanabilirlik konusunda kritik içgörülere katkıda bulunmuştur.

Sudeep Tanwar: Güçlü bir yayın kaydı ve en iyi bilim insanları arasında süregelen tanınırlığıyla, blockchain ve IoT alanındaki çalışmalarını güvenli ve şeffaf dijital altyapıları teşvik etmektedir.

Jie Zhang: Yapay zeka ve makine öğrenimi sistemlerinde adalet ve güvenilirliğe odaklanan araştırması, teknolojik ilerlemelerin yalnızca yenilikçi değil aynı zamanda etik açıdan da sağlam olmasını sağlamaktadır.

Muhammad Khurram Khan ve Rajkumar Buyya gibi diğer isimler de araştırmanın disiplinler arası ve kurumlar arası doğasını vurgulayarak işbirliği ağı içinde kilit bağlantılar olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 3.8. Yayın başına düşen yazar sayısının dağılımı

Şekil 3.8’de ifade edildiği üzere yayın sayısının artmasına rağmen yayın başına düşen yazar sayısının azaldığı görülmektedir.

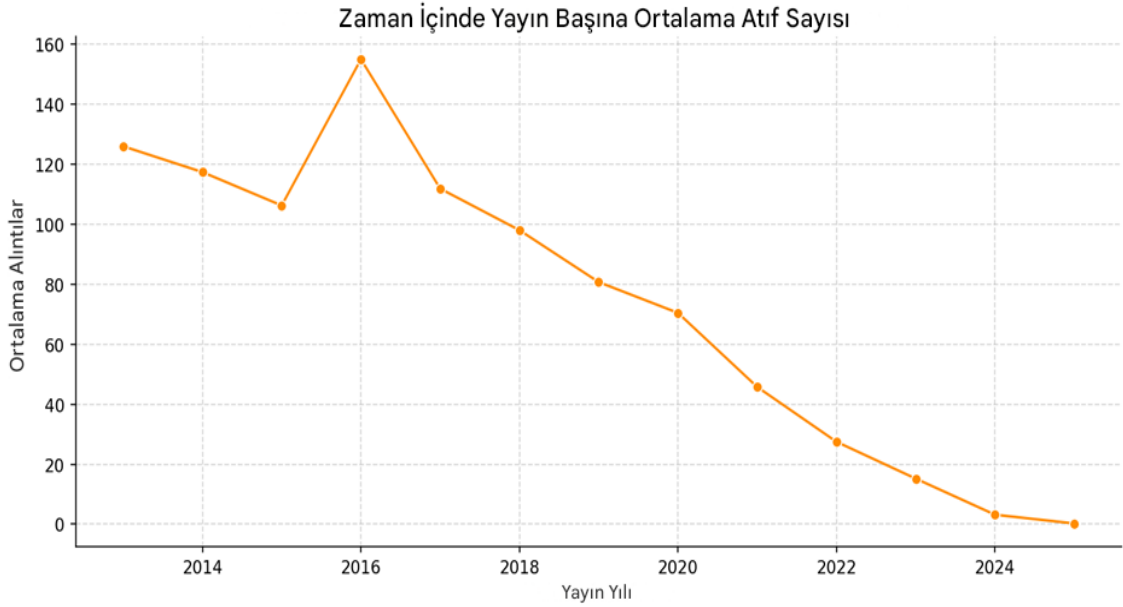
3.2.2. Atıf analizi

3.2.2.1. Atıf ağlarının ve ilişkilerinin şekillenmesi

Endüstri 4.0 ve teknoloji tabanlı üretim süreçleri üzerine yapılan çalışmalardaki atıf ağı birkaç önemli özellik sergilemektedir:

3.2.2.1.1. Erken atıf zirveleri

En yüksek atıf zirveleri 2016 yılı civarında görülmektedir (Şekil 3.9.). Bu durum, Shi vd. (2016) uç bilişim üzerine çalışması ve Lei ve vd. (2017) kestirimci bakım üzerine çalışması gibi bu alanda çığır açan temel çalışmalarla uyumludur. Bu ilk katkılar, atıf grafiğinde belirgin bir şekilde vurgulanmaktadır; burada belirgin bir tepe noktası, ilk yeniliklerin önemli ölçüde dikkat çektiğini ve sonraki araştırmalar için zemin hazırladığını göstermektedir.



Şekil 3.9. Yayın başına düşen ortalama atıf sayısının yıllara göre dağılımı

3.2.2.1.2. Zaman içinde eğilimler

İlk artıştan sonra, makale başına ortalama atıf sayısında kademeli bir düşüş yaşanır. Genellikle "atıf seyrelmesi" olarak tanımlanan bu olgu, araştırma hacmi hızla artarken yeni makalelerin atıf biriktirmek için daha az zamana sahip olması nedeniyle ortaya çıkar. Atıf ağının evrimi- dökümden ağ grafiklerinde yakalanmıştır- erken dönem ufuk açıcı makalelerin yüksek atıflar almaya devam ederken, disiplinler arası araştırmalar çoğaldıkça genel manzaranın daha parçalı hale geldiğini göstermektedir.

3.2.2.1.3. Ağ yapısı

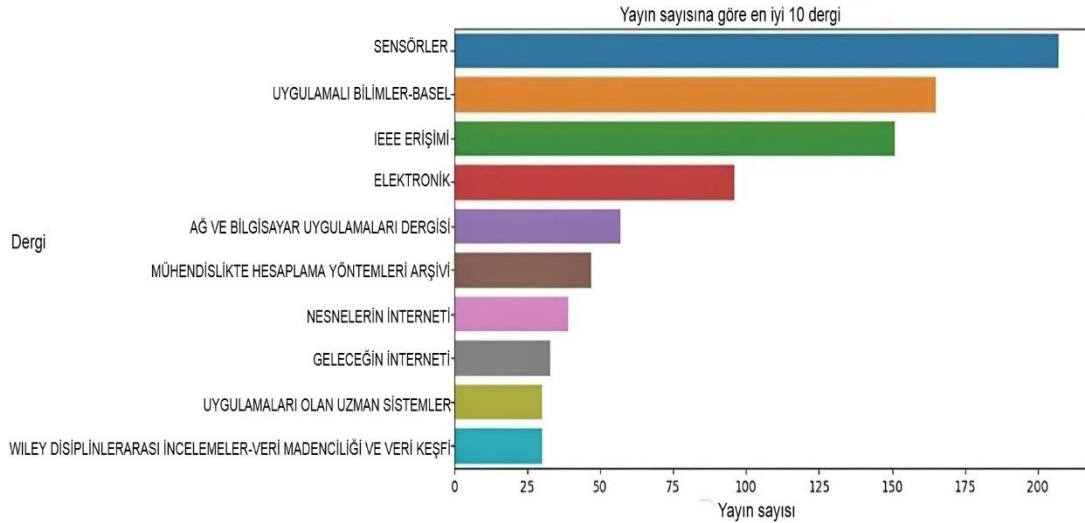
Ortak yazarlık ve atıf ağları, ufuk açıcı çalışmaların farklı araştırma grupları arasında köprü görevi gördüğü, birbirine sıkı sıkıya bağlı birkaç kümeden oluşan bir yapı ortaya koymaktadır (Şekil 3.6). Bu görselleştirmeler, kilit makalelerin ve araştırmacıların yalnızca kendi alanlarını etkilemekle kalmayıp aynı zamanda Endüstri 4.0'daki daha geniş araştırma alanları arasındaki bağlantıları nasıl kolaylaştırdığını vurgulamaktadır.

3.2.2.1.4. Önde gelen dergiler

Yayın mekanlarının analizi, hangi platformların en çok atıf alan çalışmaları ürettiğini ortaya koymaktadır. Bu dergiler Şekil 3.10 da gösterilmiştir:

1. IEEE Access: Mühendislik, bilgisayar bilimleri ve gelişmekte olan teknolojileri geniş bir şekilde kapsamasıyla bilinen, hızlı yayın döngülerine sahip, önde gelen bir açık erişimli multidisipliner dergidir. Yüksek yayın hacmi, özellikle IoT, AI ve ağ oluşturma alanlarında uygulamalı ve disiplinler arası çalışmaların hızlı bir şekilde yayılmasını isteyen araştırmacılar arasındaki popülerliğini yansıtmaktadır.
2. Sensörler (MDPI): Sensör teknolojileri, IoT ve akıllı sistemlere odaklanır, donanım-yazılım entegrasyonu ve gerçek dünya dağıtımları üzerine çalışmaları çeker. Yüksek yayın sayısı, çevresel izlemeden biyomedikal sensörlere kadar her şeyi kapsayan uzmanlaşmış ancak geniş kapsamından kaynaklanmaktadır.
3. Uygulamalı Bilimler-Basel (MDPI): Endüstri 4.0, otomasyon, ve enerji sistemleri konularında sık sık yayınlar yaparak mühendislik ve hesaplama bilimlerinin pratik uygulamalarına öncelik verir. Açık erişim modeli ve tematik çeşitliliği onu disiplinler arası araştırmalar için bir merkez haline getirmektedir.
4. Elektronik (MDPI): Gömülü sistemler, devreler ve iletişim teknolojilerine odaklanarak teorik ilerlemeler ve endüstriyel uygulamalar arasında köprü kurar. IoT ve akıllı üretim trendlerine uygun olarak uç bilişim ve düşük güçlü cihazlar üzerine yapılan çalışmalarla dikkat çekmektedir.
5. Ağ ve Bilgisayar Uygulamaları Dergisi (Elsevier): Ağ mimarileri, dağıtık sistemler ve siber güvenliği vurgulayan yüksek etkili bir dergi. Titiz hakem değerlendirmesi ve ölçeklenebilir çözümlere odaklanması nedeniyle tercih edilir, bulut bilişim ve IoT altyapı araştırmalarında sıklıkla atıfta bulunulur.

6. Mühendislikte Bilişimsel Metotlar Arşivi (Springer): Mühendislik problemleri için yapay zeka odaklı metodolojilere güçlü bir vurgu yaparak hesaplamalı modelleme ve simülasyon konusunda uzmanlaşmıştır. Yayınları genellikle teori ağırlıklıdır, gelişmiş sayısal yöntemler ve dijital ikiz teknolojilerine hitap etmektedir.



Şekil 3.10. Yayın sayılarına göre en iyi 10 dergi

Atıf analizi kapsamında önde gelen dergilerin sıralandığı Şekil 3.10 yukarıdaki gibi oluşmuştur.

3.2.2.1.5. Önde gelen konferanslar

GLOBECOM ve ICC gibi prestijli IEEE konferansları, çığır açan araştırmaların sunulduğu önemli forumlar olarak vurgulanmaktadır. Bu mekanlarda sunulan konferans bildirimlerinin yüksek atıf etkisi ağ grafiklerinde iyi bir şekilde belgelenmiştir.

3.2.2.1.6. Yayın modelleri

Bu araştırmada, bu alanda açık erişim yayın modellerinin baskın olduğu vurgulanmaktadır. *Sensors*, *Applied Sciences* ve *IEEE Access* gibi dergiler, hızlı yayılımı ve geniş bir tematik kapsamı teşvik eden açık erişim politikalarıyla dikkat çekmektedir. Bu platformlar, Endüstri 4.0 araştırmalarının hızlı gelişimi göz önüne alındığında çok önemli bir faktör olan, araştırmacıların bulgularını disiplinler arası alanlarda hızlı bir şekilde paylaşmalarını sağladıkları için tercih edilmektedir. Açık erişim ile aboneliğe dayalı unsurları harmanlayan hibrit modeller de yaygındır, ancak tamamen açık erişim yayınlarına kıyasla daha az etkili olma eğilimindedir.

3.2.2.1.7. Açık erişim yayınların yaygınlaştırma ve atıf oranları üzerindeki etkileri

Çalışmamız açık erişim yayınlarının yalnızca okuyucu kitlesini genişletmekle kalmayıp aynı zamanda atıf oranlarını da artırdığının altını çiziyor. Erişimi kısıtlayan ödeme duvarları olmadığından, açık erişim dergilerinde yayınlanan çalışmalar, kaynakların kısıtlı olduğu ortamlardaki araştırmacılar da dahil olmak üzere küresel bir kitleye ulaşarak daha yüksek atıf sayılarına ve daha güçlü akademik etkiye yol açmaktadır. Atıf ağı diyagramları, yüksek erişimli yayınların nasıl çok sayıda atıf çeken merkezler olarak hizmet verdiğini göstermekte ve ücretsiz erişimin akademik etkiyi hızlandırdığı ve disiplinler arası iş birliğini kolaylaştırdığı eğilimini güçlendirmektedir.

Analiz, yayın modelleriyle ilişkili ekonomik dinamiklere de değinmektedir:

Yazarlar için: Çoğu açık erişim dergileri tipik olarak Makale İşlem Ücretleri (Author Publishing Cost) gerektirir ve bu ücretler özellikle yeterli finansmanı olmayan araştırmacılar için önemli olabilir. Yazarlara yüklenen bu maliyet, özellikle gelişmekte olan araştırma ortamlarında bir engel olarak görülebilir. Ancak, artan görünürlük ve daha yüksek atıf potansiyeli, araştırmanın genel etkisini artırarak genellikle bu maliyetleri haklı çıkarabileceğini düşündürmektedir.

Okuyucular için: Açık erişim, abonelik ücretlerini ortadan kaldırarak araştırmacıların, uygulayıcıların ve politika yapıcıların en son bulgulara finansal engeller olmadan erişmesine olanak tanır. Bilginin bu şekilde demokratikleşmesi, küresel iş birliklerini teşvik etmek ve finansman sıkıntısı çeken bölgelerdeki araştırmacıların en son gelişmelere katkıda bulunmalarını ve bunlardan faydalanmalarını sağlamak açısından özellikle önemlidir.

Maliyetli aboneliklerden kaçınarak kurumlar ve kütüphaneler için ekonomik rahatlama, araştırma bulgularının daha geniş bir şekilde yayılmasını ve kullanılmasını daha da desteklemektedir.

3.2.2.1.8. Atıf analizinden çıkarımlar ve içgörüler

Genel atıf analizi birkaç stratejik öngörü ortaya koymaktadır:

Başlangıç Noktası ve Gelişim: İlk etkili çalışmalar, daha sonraki araştırmalar ve disiplinler arası keşifler için köşe taşı görevi görerek kalıcı bir etkiye sahiptir.

Uzmanlaşmış Kümelerin Ortaya Çıkışı: Alan genişledikçe, atıf ağı daha parçalı hale gelir ve yeni çalışmalar niş alanlara odaklanır- ağ diyagramlarında görülen çeşitli kümelerde yansıtılır.

Çapraz İş birliği için Fırsatlar: Verilen görsellerde görselleştirildiği gibi atıf ilişkileri, daha fazla disiplinler arası ve kurumlar arası iş birliğini teşvik etmenin potansiyel faydalarını vurgulamaktadır. Bu, izole kümeler arasında köprü kurulmasına yardımcı olabilir ve gelecekteki araştırmaların genel etkisini artırabilir.

3.2.3. Bölgesel ve kurumsal analiz

Bibliyometrik analizin üçüncü aşaması olan bölgesel ve kurumsal analiz kapsamında önde gelen ülkeler ve kurumlar aşağıda sıralanmıştır.

3.2.3.1. Önde gelen ülkeler ve kurumlar

3.2.3.1.1. Asya

Kurumlar:

- Çin Bilimler Akademisi (CAS)
- Ulusal Teknoloji Enstitüsü (NIT Sistemi, Hindistan)
- Mısır Bilgi Bankası (EKB, Mısır)

Önemi:

- CAS (Çin): Çin'in araştırma ve küresel iş birliklerine yaptığı agresif yatırımın altını çizerek listeye en yüksek kenarlarla (~300) hakimdir. CAS, özellikle STEM alanlarında uluslararası ortaklıklar için bir merkez görevi görmektedir.
- NIT Sistemi (Hindistan): Hindistan'ın teknik eğitime ve endüstriyel işbirliklerine verdiği önemi yansıtmaktadır.
- EKB (Mısır): Afrika'nın dijital eğitim ve açık erişimli bilgi için çabasını temsil eder, ancak dahil edilmesi özel bir role işaret eder (örneğin, araştırma çıktılarını toplamak).

3.2.3.1.2. Avrupa

Kurumlar:

- Londra Üniversitesi (Birleşik Krallık)
- Ulusal Araştırma Merkezi (CNRS, Fransa)

Önemi:

- Londra Üniversitesi: Küresel akademi için tarihi bir merkez olan Londra Üniversitesi'nin üstünlükleri muhtemelen federal yapısından (UCL, LSE gibi çoklu kolejler) ve uluslararası öğrenci/araştırmacı hareketliliğinden kaynaklanmaktadır.
- CNRS: Sınır ötesi AB projeleri ve açık bilim girişimleriyle tanınan Avrupa'nın en büyük temel araştırma ajansı.

3.2.3.1.3. Kuzey Amerika

Kurumlar:

- Kaliforniya Üniversitesi Sistemi (ABD)
- Teksas Üniversitesi Sistemi (ABD)
- Florida Eyalet Üniversite Sistemi (ABD)
- Georgia Üniversite Sistemi (ABD)
- Harvard Üniversitesi (ABD)

Önemi:

- Kaliforniya Üniversitesi Sistemi ve Harvard: Araştırma çıktıları ve Nobel ödülleri açısından güçlü olan bu kurumlar, endüstri (örneğin Silikon Vadisi) ve küresel akademi ile ortaklıklarını yansıtmaktadır.
- Teksas/Florida/Georgia Sistemleri: ABD'nin araştırma gücünün Ivy League'in ötesine geçtiğini ve eyalet üniversitelerinin bölgesel inovasyonu yönlendirdiğini vurgulamaktadır (örneğin Florida'da uzay teknolojisi, Teksas'ta enerji).

3.2.3.1.4. Afrika

Kurum:

- Mısır Bilgi Bankası (Egyptian Knowledge Bank)

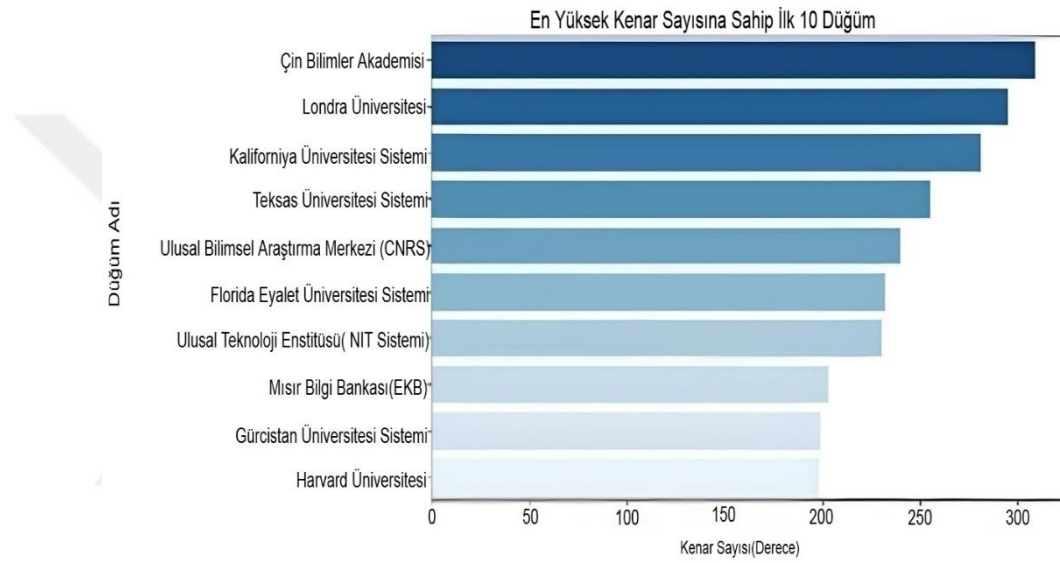
Önemi:

- Afrika'da nadir bulunan EKB'nin varlığı, ulusal bir araştırma toplayıcısı (dergilere/bilimsel araçlara erişim sağlayan) olarak rolüne işaret etmektedir. Bununla birlikte, diğerlerinin araştırma çıktılarından yoksun olabilir, bunun yerine bağlayıcı bir platform olarak işlev görebilir.

3.2.3.2. Temel Gözlemler

Temel gözlemlere ilişkin bilgilerin yer aldığı Şekil 3.11 aşağıdaki gibi görselleştirilmiş ve yorumlanmıştır.

- ABD Çin'e karşı: ABD nicelikte (5 giriş) üstünlük sağlarken, Çin'in Chinese Academy of Science kurumu bilimdeki jeopolitik rekabeti yansıtacak şekilde bağlanabilirlikte önde görülmektedir.
- Avrupa'nın Nişi: Daha az giriş ama özellikle Horizon Europe gibi AB programları aracılığıyla derin iş birliği halinde olmanın tercih edildiği gözlenmektedir.



Şekil 3.11. En fazla kenar (akademik eser) sayısına sahip düğümler (kurumlar)

- Küresel Güney: Hindistan ve Mısır'ın varlığı, sınırlı da olsa, ölçekten Hindistan merkezli (National Institute of Technology) veya Mısır merkezli dijital araçlardan (EKB) yararlanan gelişmekte olan sistemleri yansıtmaktadır.
- Ağ Gücü: Sistem yapısına sahip kurumlar (örneğin UC, Texas, Georgia) bağımsız üniversitelerden daha iyi performans göstermekte, bu da ölçeklenebilirliğin iş birliğini artırdığını göstermektedir.

3.2.4. Bölgesel yayın ve atıf eğilimleri

3.2.4.1. Yayın hacmi

Veriler, iş birliği yapan kurumlar ağının zaman içinde önemli ölçüde büyüdüğünü, toplam düğüm sayısının 4107'ye ulaştığını ve en büyük bağlantılı bileşenin 3953 düğümü (ağın yaklaşık %95'i) kapsadığını göstermektedir (Şekil 3.12.). Bu genişleme, Çin, ABD

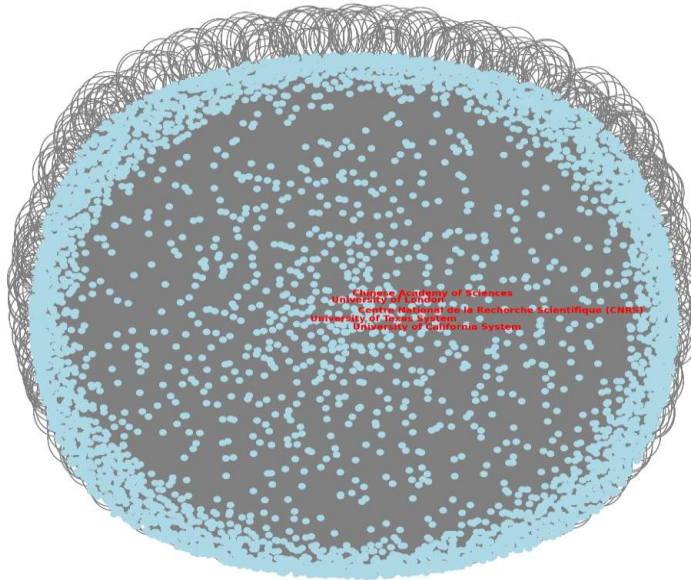
ve Avrupa ülkeleri gibi ülkelerdeki kurumların Endüstri 4.0 araştırmalarına artan katılımına işaret etmektedir.

3.2.4.2.İşbirlikçi modeller

Ağ, yoğun, yerel kümeler ve dev bir bağlantılı bileşenin bir karışımını göstermektedir; bu da birçok kurumun bölgesel veya uzmanlaşmış kümeler içinde faaliyet gösterirken, birkaç büyük merkezin (örneğin, Çin Bilimler Akademisi, CNRS) küresel bilgi alışverişini yönlendirdiğini göstermektedir. Bu yapı, güçlü araştırma altyapılarına sahip gelişmiş ekonomilerin hem yayın hacmine hem de atıf oranlarına orantısız bir şekilde katkıda bulunduğu bölgesel farklılıkların altını çizmektedir. 104 küçük bileşenin varlığı, dev bileşenle etkileşime girmeyen birkaç izole veya niş grup olduğunu göstermektedir.

Çizelge 3.2. Üniversiteler ağındaki en büyük bağlantılı bileşen

Metrik	Değer
Toplam Üniversite Sayısı (Düğüm)	2.315
En Büyük Bağlantılı Bileşendeki Üniversite Sayısı	2.127
Toplam Ağı En Büyük Bileşen Tarafından Kapsanan Oranı	%92
Önde Gelen Katkıda Bulunan Bölgeler	Çin, ABD, Avrupa Ülkeleri Endüstri 4.0 araştırmalarında yüksek düzeyde küresel iş birliği ve entegrasyon gözlemlenmiştir.



Şekil 3.12. Üniversiteler ağındaki en büyük bağlantılı bileşen (2127 Üniversite)

Çizelge 3.2., Endüstri 4.0 araştırmaları içindeki üniversite ortaklıklarının yapısal olarak nasıl büyüdüğünü ve birleştğini göstermektedir. Ağ zamanla daha yoğun ve daha

bağlantılı yapısı, alanın büyüyen küreselleşmesini göstermektedir. Şu anda toplamda 2.315 üniversite düğümü bulunmaktadır (Şekil 3.12.) ve bunların 2.127'si en büyük bağlantılı bileşeni oluşturmaktadır; yani tüm iş birliği ağının yaklaşık %92'sini oluşturmaktadır.

Bu durum yalnızca güçlü bir iş birliği derecesini göstermekle kalmayıp aynı zamanda Endüstri 4.0 araştırması yapan çoğu kurumun ortak bir bilgi ekosistemine ait olduğu anlamına da gelmektedir. Çin, Amerika Birleşik Devletleri ve birçok Avrupa ülkesinden kurumlar bu ağdaki en büyük katkı sağlayıcıları oluşturmaktadır ve bu nedenle dünya araştırma gündemini ilerletmedeki hayati önemlerini vurgulamaktadır. Bu tür güçlü bağlantılar, daha iyi alan tabanlı ortak inovasyona, ortak yazarlık olanaklarına ve bilgi alışverişine işaret etmektedir.

Genel olarak düşük yoğunluk ve orta düzey ortalama derece, büyük bir küme olmasına rağmen, ağın toplam olası bağlantı sayısına kıyasla hala çok seyrek olduğunu göstermektedir.

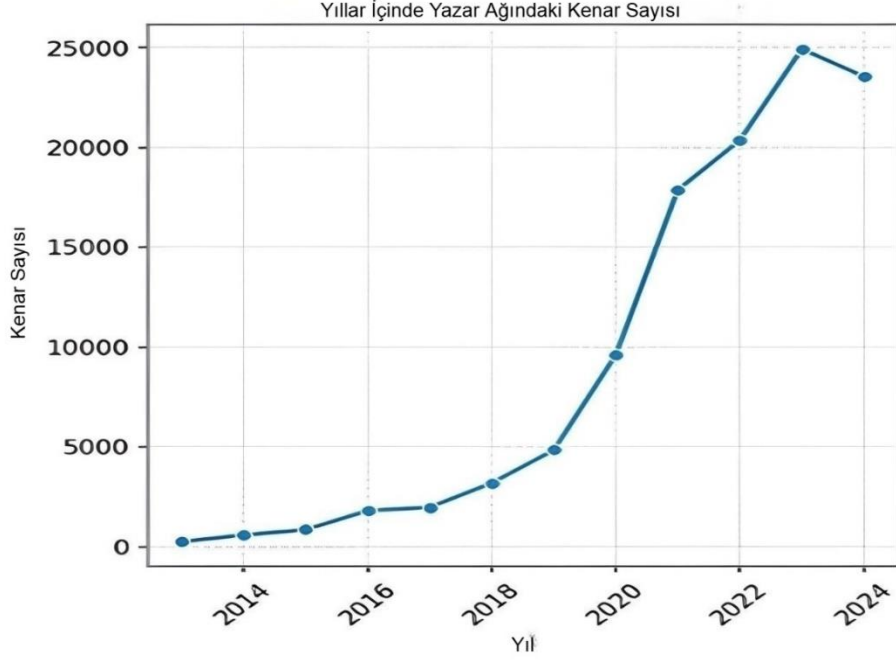
3.2.5. İş birliği ve disiplinler arası çalışmalar

3.2.5.1. Yazar iş birliği düzeyi

Bu araştırma Endüstri 4.0 süreçlerinde son derece işbirlikçi bir araştırma ortamını işaret etmektedir. Temel istatistikler şunlardır:

3.2.5.1.1. Ortak yazarlık ağ yapısı

Ağ, 5874'e yakın bağlantılı bileşenle oldukça parçalıdır, ancak 9204 yazardan oluşan en büyük bağlantılı bileşene sahiptir. Bu, birçok yazarın küçük, uzmanlaşmış gruplar içinde çalışırken (3746'dan fazla grubun 5'ten az üyesi vardır), önemli bir araştırmacı çekirdeğinin kapsamlı bir şekilde iş birliği yaptığını göstermektedir. Ağ, 2013 yılında 172 düğümden 2024 yılında 9339 düğüme yükselmiş, ortak yazarlık sayısı ise 259'dan 23570'e çıktığı Şekil 3.13'te gösterilmiştir. Bu genişleme, araştırmacılar arasında zaman içinde artan bir bağlantıyı yansıtmaktadır. Yüksek ortalama kümelenme katsayısı (0,8968) yerel iş birliklerinin yoğunluğunu daha da vurgulamaktadır. Bu kümelerdeki yazarlar yakın çalışma eğilimindedir ve genellikle birden fazla makalenin ortak yazarıdır ve neredeyse tüm makaleler birden daha fazla yazarlıdır.



Şekil 3.13. Yazar ağındaki yıllık kenar (yazar) sayısı dağılımı

Şekil 3.13 de makale sayılarının yıllara göre yazar ağındaki kenar (yazar) sayısı ifade edilmektedir. Her kenar bir düğümle (eser) yazarları birbirine bağlamaktadır. Bir düğüm için derece, ona bağlı kenarların sayısını temsil etmektedir. İlk yıllarda ortaya çıkan akademik eserler belirli yazarlar etrafında kümelenirken yıllar ilerledikçe yazar sayısında artışlar gözlenmiş ve 2018 yılından itibaren de büyük bir sıçrama göstermiştir.



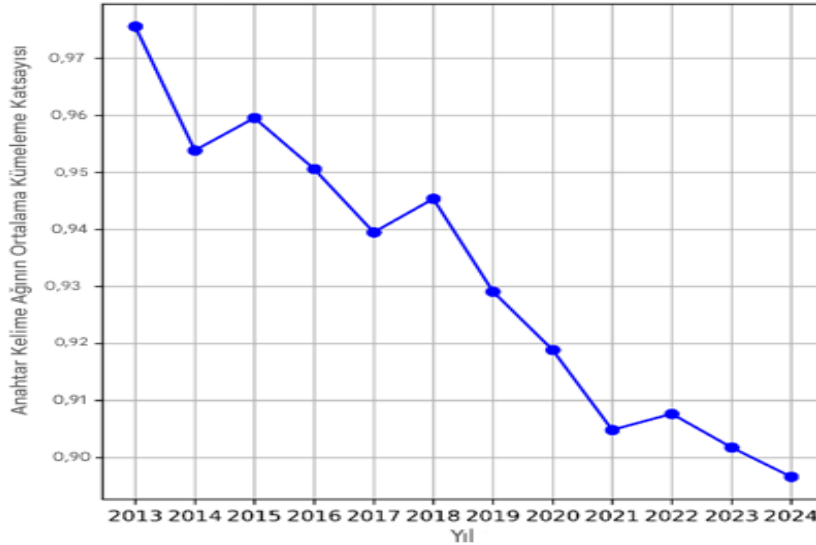
Şekil 3.14. Yazar ağındaki yıllık düğüm (yazar) sayısı

Şekil 3.13 de görülen 2023 ve 2024 yılları arasındaki yazar ağındaki düşüşün (kenar sayısı) yazar sayısını ifade ettiğini aynı zamanda Şekil 3.14 de görüldüğü üzere yazar ağındaki artışın (düğüm sayısı, etkileşim miktarı artışı) yazar sayısı azalırken yayın sayısının artışından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bununla birlikte araştırmamıza konu olan makalelerin 31 Aralık 2024 tarihi itibari ile Web of Science'dan erişilmiş makaleler olmasından da kaynaklanması olasıdır.

3.2.5.1.2. Disiplinler arası bağlantı

Ortalama derecedeki artış ve anahtar kelime ağındaki ortalama kümeleme katsayısındaki (bkz. şekil 3.15) yavaş ama istikrarlı düşüş (2013'te 0,97'den 2024'te 0,89'a), bireysel makalelerin artık daha geniş bir konu yelpazesini entegre ettiğini ve daha fazla disiplinler arası iş birliğini yansıttığını göstermektedir. Ağ görselleştirmeleri, alt disiplinler arasında sağlam ve tekrarlanan iş birliklerine işaret ederek birden fazla kümeyi birbirine bağlayan birkaç "merkez" yazarını (örneğin, Sudeep Tanwar, Nima Jafari Navimipour, Abdullah Gani) vurgulamaktadır.

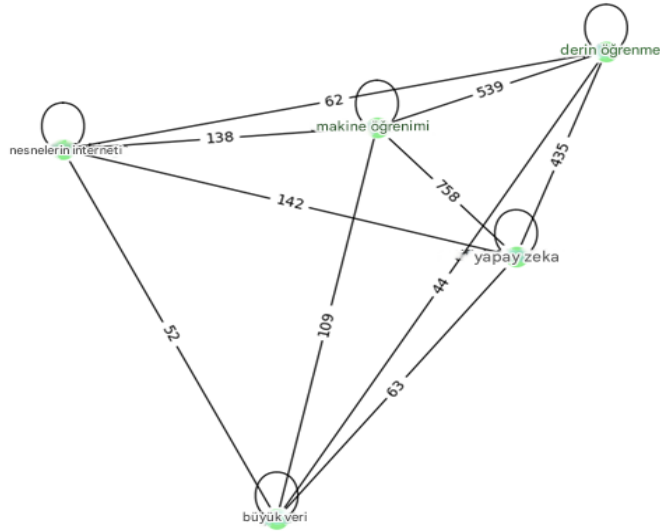
Anahtar Kelime Ağına Ortalama Kümeleme Katsayısının Yıla Göre Zaman Serisi



Şekil 3.15 Anahtar kelime ağındaki ortalama kümeleme katsayısının yıllara göre dağılımı

Yapay zeka (AI), derin öğrenme, makine öğrenimi ve Nesnelerin İnterneti (IoT) gibi anahtar kelimelerin birlikte kullanılması, modern araştırmalardaki güçlü disiplinler arası bağlantıları ortaya koymaktadır. Makine öğrenimi ve derin öğrenmenin sıklıkla birlikte görülmesi, derin öğrenmenin makine öğreniminin baskın bir alt kümesi olduğunu ve genellikle YZ odaklı çözümlerde uygulandığını göstermektedir.

Eşzamanlılık Sayılarına Sahip En İyi 5 Anahtar Kelime Alt Grafiği



Şekil 3.16 İlk 5 Anahtar kelimeler arasındaki bağlantı

Çizelge 3.3.Eşzamanlılık Sayılarına Sahip En İyi 5 Anahtar Kelime Alt Grafiği

Kaynak	Hedef	Ağırlık
Nesnelerin İnterneti	Makine Öğrenimi	138
Nesnelerin İnterneti	Büyük Veri	52
Nesnelerin İnterneti	Derin Öğrenme	62
Makine Öğrenimi	Derin Öğrenme	539
Makine Öğrenimi	Büyük Veri	109
Makine Öğrenimi	Yapay Zeka	758
Büyük Veri	Derin Öğrenme	63
Büyük Veri	Yapay Zeka	44
Yapay Zeka	Derin Öğrenme	435
Yapay Zeka	Nesnelerin İnterneti	142

Çizelge 3.3'te anahtar kelimelerin birbirleri ile bağlantıları rakamsal olarak ifade edilmiştir. Görüldüğü üzere Makine Öğrenimi ve Yapaya zekâ arasındaki bağlantı 758 ile en yüksektir. Bununla birlikte Büyük Veri ve Yapay Zekâ arasındaki bağlantı ise 44 ile en düşük olarak gösterilmiştir.

YZ'nin IoT ile eşleştirilmesi, akıllı sistemlerin akıllı şehirler ve otonom cihazlar gibi IoT uygulamalarına artan entegrasyonunu vurgulamaktadır. Bu arada, YZ'nin hem makine öğrenimi hem de derin öğrenme ile örtüşmesi, bu metodolojileri kapsayan bir şemsiye terim olarak daha geniş rolünün altını çizmektedir. Bu anahtar kelimeler

arasındaki yüksek birlikte kullanım, makine öğreniminin temel bir bağlantı olarak hizmet ettiği büyük ölçekli, bağlantılı sistemlere (IoT) uygulanan gelişmiş hesaplama tekniklerine (derin öğrenme) odaklanan bir araştırmaya işaret etmektedir. Bu örüntü, karmaşık, gerçek dünya sorunlarının çözümünde yapay zekâ teknolojilerinin yakınsamasını yansıtmaktadır.

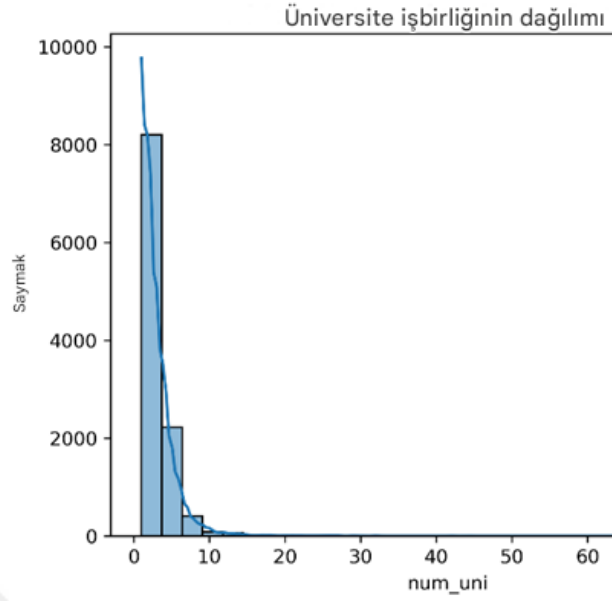
3.2.5.1.3. Uluslararası iş birliklerinin etkisi

Uluslararası iş birlikleri, bu alandaki araştırmaların hem kalitesini hem de etki faktörünü artırmada çok önemlidir. Analiz sonuçları şu konularda kanıtlar sunmaktadır:

Geliştirilmiş Kalite ve Yenilikçilik: Uluslararası ortaklıklar, farklı uzmanlık ve metodolojilerin bir araya getirilmesini kolaylaştırmaktadır. Örneğin, ABD, Çin ve Avrupa ülkelerindeki araştırmacılar arasında- genellikle Çin Bilimler Akademisi ve CNRS gibi merkezi kurumların aracılık ettiği- iş birlikleri, sadece yenilikçi değil aynı zamanda yüksek oranda atıf alan yayınlara yol açmıştır. Dev kurumsal ağda gözlemlenen ve 4107 düğümden 3953'ünün (yaklaşık %95) birleşik bir bileşen oluşturduğu birbirine bağlılık, sınır ötesi iş birliklerinin zengin ve entegre bir araştırma ekosistemini teşvik etmedeki rolünü daha da vurgulamaktadır.

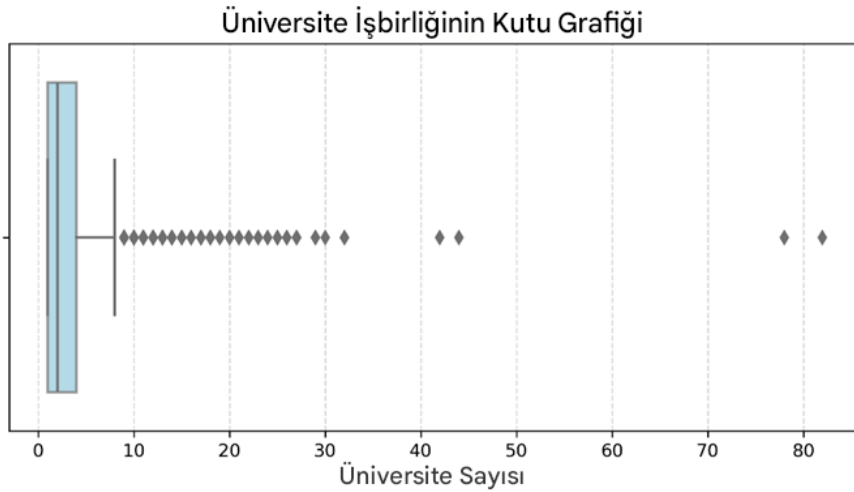
Artan Atıf Etkisi: Bu uluslararası iş birliklerinden doğan çalışmalar, daha geniş bir yayılımdan ve disiplinler arası doğrulamadan yararlandıkları için daha yüksek atıf oranlarına sahip olma eğilimindedir. Belgenin atıf ağı grafikleri, ortak araştırma çabalarından kaynaklanan ufuk açıcı çalışmaların en çok atıf alan çalışmalar arasında yer aldığını açıkça göstermekte, bu da daha yüksek etki ve ilgi düzeyini yansıtmaktadır. Ortak yazarlık ağında birkaç uluslararası "merkez" yazarın bulunması yalnızca aktif iş birliğine işaret etmekle kalmayıp aynı zamanda gelişmiş araştırma kalitesiyle de ilişkili olduğu görülmektedir. Bu kilit yazarlar tarafından ortaklaşa yazılan makaleler, küresel araştırma topluluğundaki geniş erişimleri nedeniyle genellikle daha yüksek bir etki faktörüne sahip oldukları tespit edilmiştir.

2020'den itibaren yaşanan toparlanma, acil uluslararası iş birliği gerektiren COVID-19 salgını ile hızlanan küresel araştırma ekip çalışmasının giderek normalleştiğini vurgulamaktadır. Açık bilimin, sanal iş birliği araçlarının ve kurumsal ağların (UC Sistemi veya Mısır'ın EKB'si gibi) yükselişi bu eğilimi daha da güçlendirdi. Bu dalgalanmalar birlikte, araştırma iş birliğinin finansman politikalarından teknolojik gelişmelere kadar dış güçlere karşı ne kadar hassas olduğunun altını çizerken, aynı zamanda dayanıklılığını da gösteriyor.



Şekil 3.15. Üniversite iş birliklerinin dağılımı

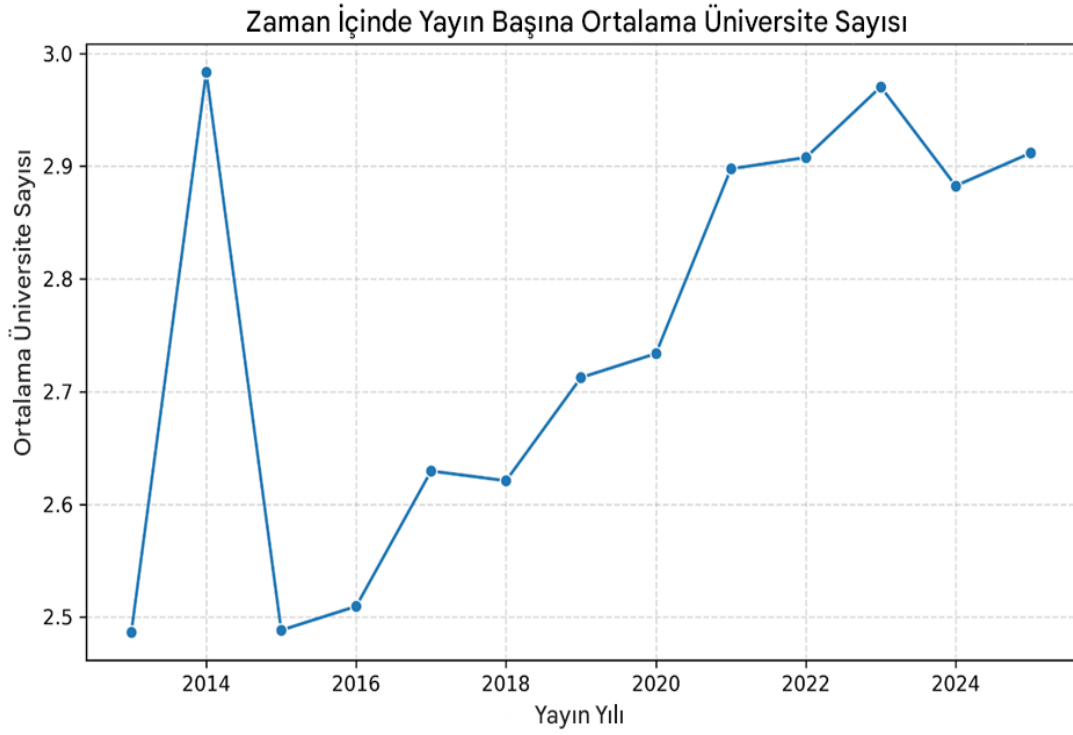
Ayrıca şekil 3.17 de görüldüğü üzere, üniversiteler arası iş birliği hala düşüktür; %30'dan fazlası tek bir üniversiteden yazarlar tarafından, %90'dan fazlası ise 5 veya daha az üniversiteden yazarlar üretilmiştir. Bununla birlikte, bazı yüksek düzeyde iş birliğine dayalı araştırmaların (10 veya daha fazla üniversiteden yazarlar) gerçekleşiyor olması biraz umut vermektedir.



Şekil 3.16. Yayın başına üniversite iş birliği kutu grafiği

Şekil 3.18 ve 3.19 da görüldüğü üzere zaman içinde (2014-2024) yayın başına düşen ortalama üniversite sayısı çarpıcı bir örüntü ortaya koymaktadır. 2014 yılında keskin bir artış, ardından bir düşüş ve son yıllarda kademeli bir toparlanma yaşandığı

görülmektedir. 2014 yılındaki artış muhtemelen büyük politika değişikliklerini (örneğin Çin'in araştırma hamlesi ve AB'nin Horizon 2020 lansmanı) ve genomik ve fizik gibi alanlarda büyük ölçekli iş birliklerinin yükselişini yansıtmaktadır. Ancak daha sonraki düşüş, muhtemelen yazarlık standartlarının sıkılaşması, jeopolitik gerilimler (örneğin Brexit, ABD-Çin sürtüşmesi) veya kısa vadeli finansman döngülerinin sona ermesi nedeniyle bir düzeltmeye işaret etmektedir.



Şekil 3.17. Yayın başına düşen yıllık ortalama üniversite sayısı

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1.Bulgular

Endüstri 4.0 süreçlerinin kapsamlı bibliyometrik analizi, hızlı büyüme, gelişen teknolojik temalar ve dinamik iş birliği modelleriyle karakterize edilen çok yönlü bir araştırma ortamı sunmaktadır. Araştırma çıktılarındaki hızlı büyüme, anahtar kelime trendleri, iş birlikleri, atıflar vs. başlıklar halinde detaylı olarak ele alınacaktır.

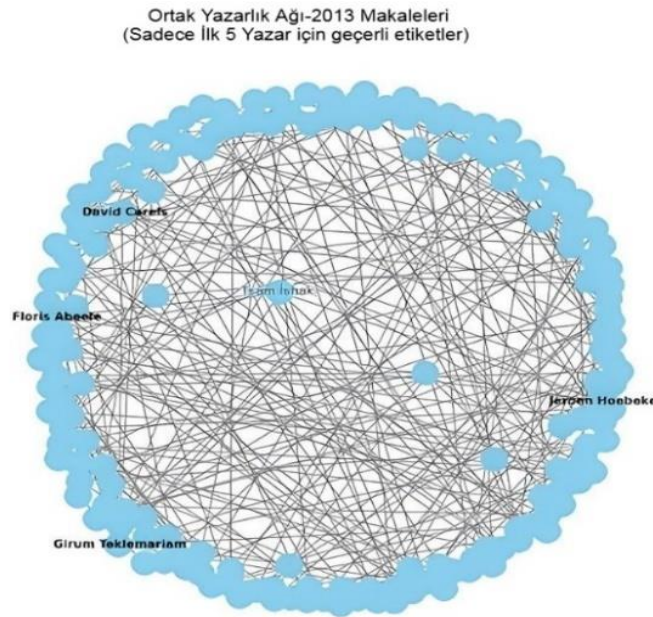
4.1.1. Araştırma çıktılarındaki hızlı büyüme

4.1.1.1. Yayın dalgalanması

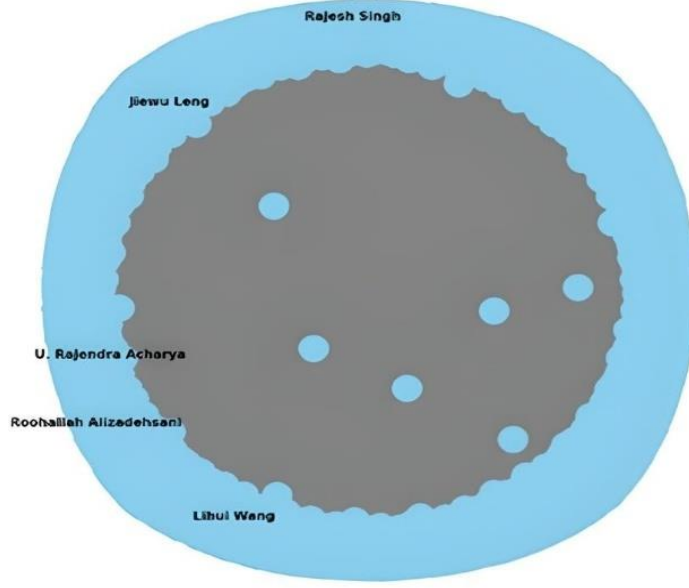
Bu alandaki yayınlar 2013 yılındaki mütevazı başlangıçtan itibaren istikrarlı bir büyüme göstermiş, 2018-2021 yılları arasında önemli ölçüde hızlanmış ve 2023-2024 yıllarında en yüksek yayın sayısına ulaşmıştır. Bu eğilim, dijital dönüşüm ve akıllı üretime yönelik artan akademik ve endüstriyel vurgunun altını çizmektedir.

4.1.1.2. Ağ boyutunun genişletilmesi

Ortak yazarlık ağı, 2013'te 172 olan düğüm sayısının 2024'te 9339'a ve 259 olan kenar sayısının 23570'e çıkmasıyla önemli ölçüde genişlemiştir. Ortalama işbirliği derecesi yaklaşık 5'ten 9'a yükselmiştir, bu da çağdaş çalışmaların daha geniş bir konu yelpazesini entegre etme ve daha fazla disiplinler arası ortaklık içerme eğiliminde olduğunu göstermektedir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2. de ifade edildiği üzere 2024'teki ağı 2013'tekine kıyasla yoğun ve dolu olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.1. 2013 yılı ortak yazarlık ağı

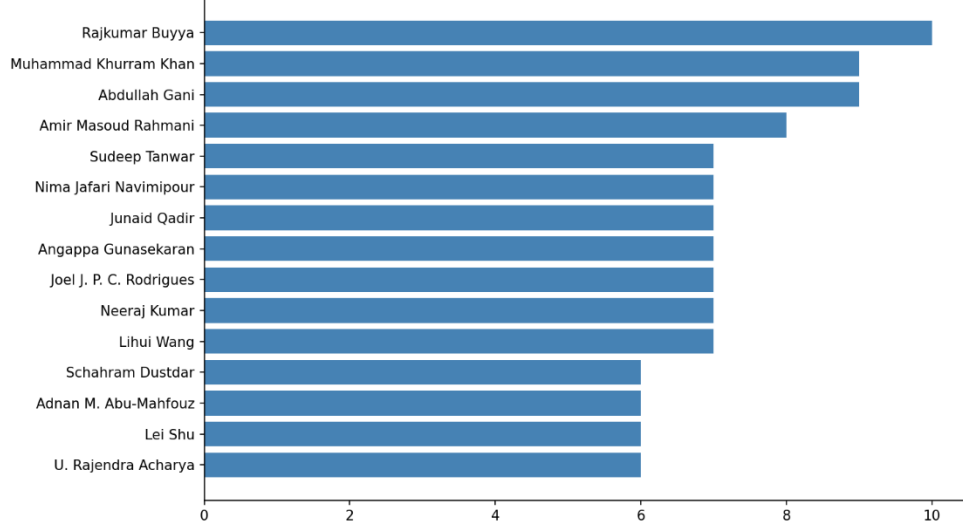


Şekil 4.2. 2024 yılı ortak yazarlık ağı

4.1.1.3. Teknolojik eğilimler ve çığır açan katkılar, önemli yenilikler

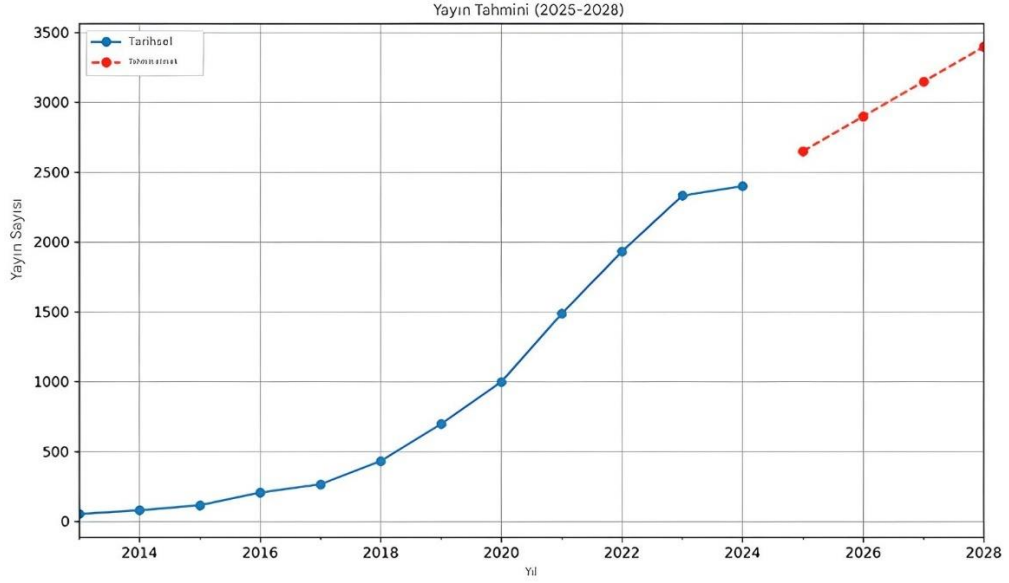
Uç bilişim üzerine *Shi vd. (2016)* ve kestirimci bakım üzerine *Lei vd. (2017)* gibi temel çalışmalar, gerçek zamanlı veri işleme ve YZ güdümlü üretim alanındaki sonraki araştırmaları yönlendirerek oldukça etkili olduğu görülmüştür. Açıklanabilir YZ (*Holzinger vd., 2020*) ve belirsizlik ölçümü (*Abdar vd., 2019*) üzerine yapılan ek çalışmalar, YZ uygulamalarında güven ve şeffaflığın sağlanmasında devam eden zorlukları vurgulamaktadır.

"Zaman İçinde En İstikrarlı 15 Yazar" listesi, Endüstri 4.0 ve teknolojiyle ilgili alanlarda yayın yapma konusunda kayda değer bir özveri sergileyen araştırmacıları öne çıkarmaktadır. Aralarında Rajkumar Buyya, Muhammad Khurram Khan ve Abdullah Gani'nin (Şekil 4.3) de bulunduğu bu yazarlar, 10 yıla varan bir süre boyunca akademik literatürde güçlü bir varlık göstermişlerdir. Bu yazarların tutarlı katkıları, Endüstri 4.0'ın merkezinde yer alan IoT, yapay zeka ve akıllı üretim gibi gelişen teknolojik trendlerle olan derin ilişkilerini yansıtmaktadır.



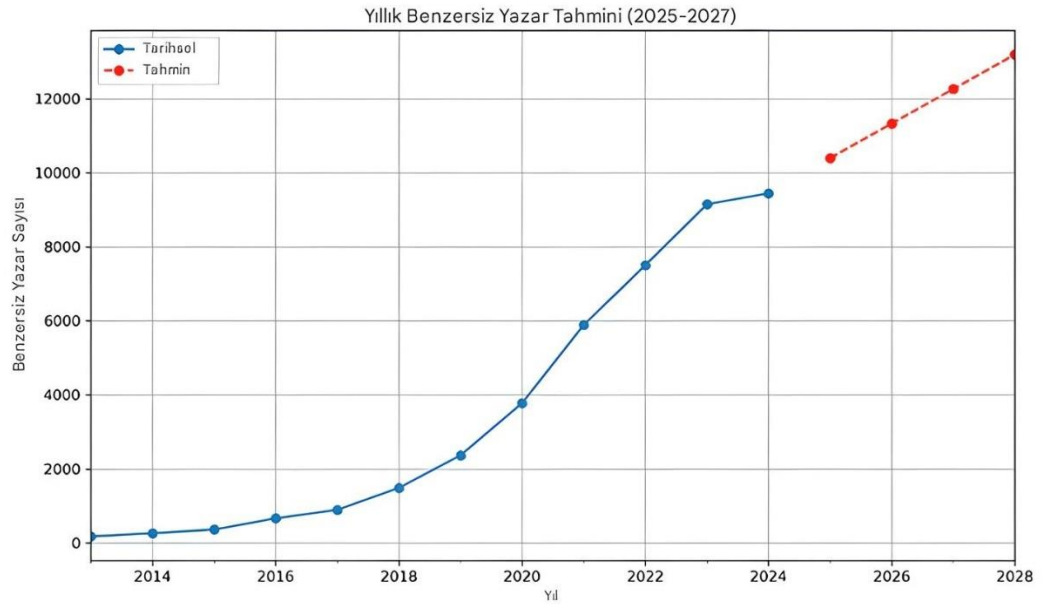
Şekil 4.3. Zaman içinde en tutarlı ilk 15 yazar

Bu yazarlar düzenli olarak yayın yaparak sadece kendi alanlarını geliştirmekle kalmamış, aynı zamanda endüstrilerin devam eden dönüşümünü destekleyen istikrarlı bir içgörü ve yenilik akışı sağlamışlardır. Yayın hayatlarındaki uzun ömürlülük, uzmanlıklarının ve teknolojinin geleceğini şekillendirme konusundaki kararlılıklarının altını çizmektedir. Üretkenliklerinin sürekliliği aynı zamanda güçlü kurumsal desteğe ve en yeni araştırma ortamlarına erişime işaret ederek her yıl yüksek etkili çalışmalara katkıda bulunmalarını sağlıyor. Ayrıca, akademik literatürde tekrar tekrar yer almaları, bulgularının akıllı teknolojiler, otomasyon ve dijital dönüşüm alanlarında gelecekteki çalışmalar için temel referanslar haline gelmesiyle etkilerini güçlendirmektedir. Bu adanmışlık düzeyi sadece itibarlarını artırmakla kalmıyor, aynı zamanda Endüstri 4.0 çözümlerinin dünya çapında daha geniş çapta benimsenmesini ve ilerlemesini de sağladığı düşünülmektedir.



Şekil 4.4. Yayın sayısı tahmini

Yayın sayısı tahmini grafiği (Şekil 4.4), zaman içinde araştırma yayınlarının sayısında istikrarlı bir artış olduğunu göstermektedir ve geçmiş veriler 2024 yılına kadar istikrarlı bir büyüme olduğunu göstermektedir. Tahminlere göre bu artış eğilimi devam edecek ve sadece 2028 yılında IoT, yapay zeka ve akıllı üretim gibi Endüstri 4.0 konularına yönelik artan ilgi ve yatırımı yansıtan 3500'e yakın yayın yapılması beklenmektedir. Yayınlardaki artış, hem yerleşik araştırmacılar hem de yeni ortaya çıkan zorlukları ve yenilikleri keşfeden yeni katılımcılar tarafından yönlendirilen büyüyen bir bilgi birikimine işaret etmektedir.



Şekil 4.5. Ağa katılması beklenen tahmini yazar sayısı

Benzer şekilde, Yıl Başına Tekil Yazar Tahmini grafiği (Şekil 4.5), alana katkıda bulunan tekil yazar sayısının arttığını ortaya koymaktadır. Bu eğilim, muhtemelen Endüstri 4.0'ın bilgisayar, mühendislik ve iş alanlarından uzmanları çeken disiplinler arası doğası nedeniyle dünya çapındaki araştırmacıların genişleyen katılımını vurgulamaktadır. Büyüyen yazar tabanı, iş birliğinin ve yeni bakış açılarının gelişmeleri beslediği sağlıklı, dinamik bir araştırma ekosistemine işaret etmektedir.

4.1.2. Anahtar kelime trendleri

Son on yılda anahtar kelime ağ derecesinin iki katına çıkmasına rağmen yoğunluğun hızla düştüğünü gözlemledik. Bu ikili eğilim, araştırma alanlarının nasıl geliştiğine dair incelikli bir bakış açısı sunmaktadır: artan karmaşıklık ve disiplinlerarasılığa, makro ağ düzeyinde genel bağlantılılıkta göreceli bir düşüş eşlik etmektedir; bu dinamik, bilimsel iletişim ve inovasyonun evrimini anlamak için önemli çıkarımlara sahiptir.

Bu tür olgular daha önceki bibliyometrik ve ortak kelime analizlerinde de gözlemlenmiştir. Örneğin, *Callon vd., (1991)* bir araştırma alanı büyüdükçe ve çeşitlendikçe, yeni anahtar kelimelerin bir parçalanma etkisi yarattığını açıklamıştır. Yerel olarak (kümeler içinde) güçlü bir bağlantı olsa da, genel ağ daha heterojen ve daha az yoğun bağlantılı hale gelmektedir. Benzer şekilde, *Van Eck & Waltman (2007)*, farklı temaların entegrasyonunun yerel bağlantıyı artırmasına rağmen (ortalama derece ile yakalandığı gibi), birçok özel terimin eklenmesinin doğal olarak genel ağ yoğunluğunu azalttığını, çünkü mümkün olan maksimum ara bağlantı sayısının gözlemlenen gerçek bağlantı sayısından çok daha hızlı büyüdüğünü belirtmiştir.

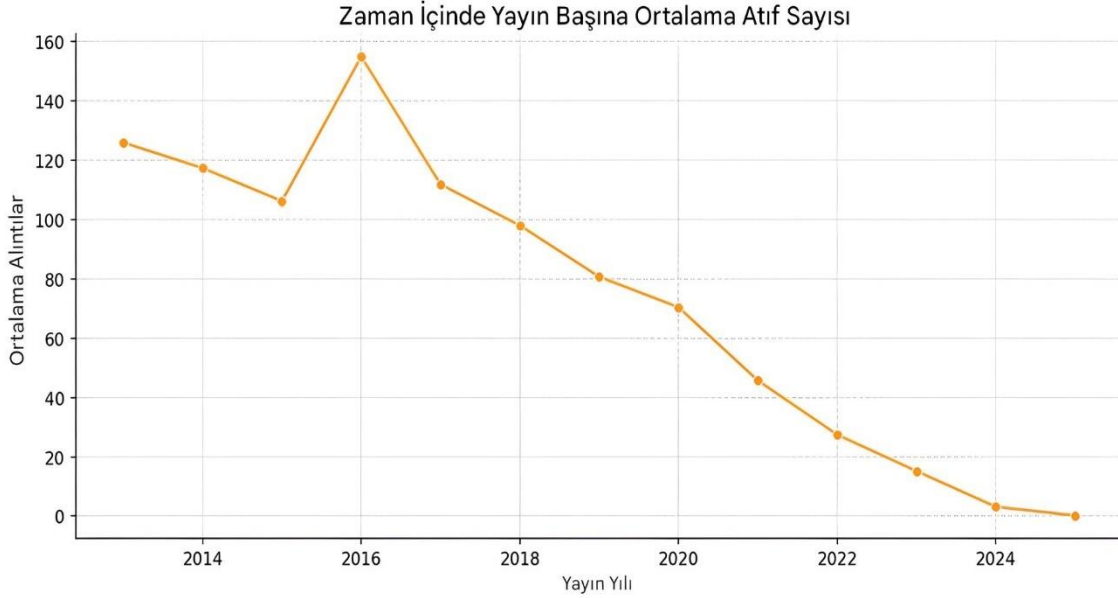
4.1.3. İşbirliği ağları ve atıf dinamikleri ortak yazarlık yapısı

Araştırma topluluğu 5874 bağlantılı bileşene bölünmüştür, ancak 9204 yazardan oluşan baskın en büyük bileşen, çekirdek bir araştırmacı grubunun kapsamlı iş birliği bağlarını sürdürdüğünü ortaya koymaktadır. Yüksek ortalama kümelenme katsayısı (0,8968), birçok küçük grup (5'ten az üyesi olan 3746 grup) niş alanlarda faaliyet gösterse de güçlü yerel iş birliklerine işaret etmektedir.

4.1.4. Atıf kalıpları

2016'da gözlemlenen atıf zirveleri, muhtemelen Endüstri 4.0 araştırmalarında temel çerçeveleri, metodolojileri veya teorik temelleri oluşturan temel çalışmaları temsil etmektedir. Bu ufuk açıcı yayınlar, sonraki çalışmalara rehberlik etmedeki kalıcı önemlerini yansıtan kalıcı atıf oranlarının da gösterdiği gibi, önemli bir etki yaratmaya

devam etmektedir. Buna karşılık, daha yeni yayınlar ortalama olarak daha az atıf alma eğilimindedir; bu olgu tarafından hızla gelişen bu alandaki araştırma çıktısının katlanarak büyümesinin neden olduğu "seyreltme etkisine" bağlanmaktadır.



Şekil 4.6 Zaman içinde yayın başına ortalama atıf sayısı

Yayınların hacmi arttıkça, bireysel çalışmalar görünürlük için rekabet etmekte, bu da daha kısa atıf pencerelerine ve literatürde daha parçalı bir ilgiye yol açmaktadır.

Ağ diyagramları ayrıca, yüksek atıf alan çalışmaların kritik entelektüel merkezler olarak işlev gördüğünü, araştırma kümelerini sabitlediğini ve bilginin disiplinler arasında yayılmasını kolaylaştırdığını ortaya koymaktadır. Bu önemli makaleler genellikle bilgisayar bilimleri, mühendislik ve tedarik zinciri yönetimi gibi birbirinden kopuk araştırma topluluklarını birbirine bağlayarak köprü görevi görmektedir ve böylece disiplinler arası iş birliğini teşvik etmektedir. Örneğin, IoT mimarileri üzerine dönüm noktası niteliğindeki bir makale, teorik yapay zekâ araştırmalarını uygulamalı endüstriyel otomasyon çalışmalarına bağlayarak fikirlerin çapraz tozlaşmasını sağlayabilir. Bu birbirine bağlılık sadece inovasyonu hızlandırmakla kalmaz, aynı zamanda farklı bulguların uyumlu ilerlemeler halinde birleştirilmesine de yardımcı olur.

İleriye bakıldığında, araştırmacılar için zorluk, giderek kalabalıklaşan bir ortamda benzer etkiye ulaşan çalışmalar üretmek olacaktır. Sentez çalışmalarına (örneğin, sistematik incelemeler, meta-analizler) veya sektördeki boşlukları doğrudan ele alan çeviri araştırmalarına stratejik olarak odaklanmak, yeni yayınların daha yüksek atıf yörüngelerine ulaşmasına yardımcı olabilir. Bu arada, alanın köprü kuran makalelere olan

güveni, Endüstri 4.0'ın olgunlaşmasını tanımlayan bütünleştirici ilerlemeyi sürdürmek için kasıtlı disiplinler arası çabalara duyulan ihtiyacın altını çizmektedir.

4.1.5. Kurumsal ve bölgesel liderlik

Kilit Kurumlar: Çin Bilimler Akademisi, kapsamlı işbirliği bağlantıları ve yüksek merkezilik ölçütleri ile birincil merkez olarak ortaya çıkmaktadır. Florida Eyalet Üniversitesi Sistemi, Teksas Üniversitesi Sistemi ve Kaliforniya Üniversitesi Sistemi gibi önde gelen Amerikan kurumlarının yanı sıra CNRS gibi büyük Avrupa araştırma kurumları da yayın hacmine ve atıf etkisine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır.

Bölgesel Hakimiyet: Çin, ABD ve önde gelen Avrupa ülkeleri gibi ülkeler Endüstri 4.0 araştırmalarının ön saflarında yer almakta ve yayınların hem niceliğini hem de niteliğini yönlendirmektedir. Bu bölgesel eğilimler, yüksek etkili iş birliklerinin çoğunu birleştiren kurumsal ağın dev bileşenine açıkça yansımaktadır.

4.1.6. Yayın modelleri ve ekonomik değerlendirmeler

Açık Erişim Tercihi: *Sensors*, *Applied Sciences* ve *IEEE Access* gibi dergiler, hızlı yayımları ve daha geniş okuyucu kitleleri nedeniyle oldukça etkili olmakla birlikte, açık erişim modelleri literatüre hakimdir. Bu modeller yalnızca daha yüksek atıf oranlarını teşvik etmekte kalmıyor, aynı zamanda Makale İşlem Ücretlerinin (APC'ler) yazarlar üzerindeki mali yüküne rağmen araştırmaya erişimi demokratikleştirdiği düşünülmektedir.

Ekonomik Etki: Açık erişime geçiş, araştırmacılara APC (Author Publishing Cost)'ler dayatsa da, abonelik engellerini ortadan kaldırarak küresel bilgi yayılımını artırmakta, böylece okuyuculara fayda sağlamakta ve kurumsal maliyetleri azaltmaktadır.

4.1.7. Gelecekteki araştırma yönelimleri ve boşluklar

Ortaya Çıkan Araştırma Soruları: Gelecekteki çalışmaların güvenilir ve açıklanabilir yapay zeka, blok zinciri aracılığıyla merkezi olmayan zeka, dijital ikizlerin VR/AR ile entegrasyonu ve büyüyen veri akışlarını yönetmek için yeni nesil ağ altyapılarını daha derinlemesine incelemesi bekleniyor. Düğüm ve kenarlardaki dramatik artış gibi ağdan elde edilen nicel kanıtlar, ölçeklenebilirlik ve gerçek zamanlı işleme zorluklarını ele alan araştırma ihtiyacını desteklemektedir.

Belirlenen Boşluklar: Endüstri 4.0 ile ilgili mevcut literatür, gelecekteki araştırmalar için önemli fırsatlar sunan ve yeterince keşfedilmemiş birkaç alanı ortaya koymaktadır. Kritik boşluklardan biri, yalın üretim ilkelerinin dijital dönüşüm

stratejileriyle entegrasyonudur. Endüstri 4.0 otomasyon ve veriye dayalı karar alma süreçlerini vurgularken, yalın üretim atık azaltma ve verimliliğe odaklanmaktadır. Değer akışı haritalama gibi yalın araçları geliştirmek için gerçek zamanlı IoT verilerini kullanmak gibi bu paradigmanın nasıl sinerji oluşturabileceğini araştıran araştırmalar, yeni operasyonel alanların kilidini açabilir.

Özellikle endüstriler blok zinciri, uç bilişim ve IoT ağlarını benimsedikçe, merkezi olmayan sistemlerde siber güvenlik bir başka az çalışılmış alandır. Merkezi mimarilerden merkezi olmayan mimarilere geçiş, akıllı sözleşmelerde mutabakat manipülasyonu veya uç cihazlara saldırılar gibi yeni güvenlik açıkları ortaya çıkarmaktadır. Gelecekteki çalışmalar, endüstriyel uygulamaların düşük gecikme talepleri ile sağlamlığı dengeleyerek bu sistemlere uyarlanmış ölçeklenebilir güvenlik çerçevelerini ele almaları beklenebilir.

Teknik zorlukların ötesinde, Endüstri 4.0'ın benimsenmesinin daha geniş ekonomik ve toplumsal etkileri yeterince incelenmemiştir. Verimlilik artışları iyi belgelenmiş olsa da işgücünün yerinden edilmesine, yeniden beceri kazandırma eşitsizliklerine veya akıllı fabrikaların çevresel ödünleşimlerine (örneğin, bulut tabanlı sistemlerde enerji kullanımı) daha az dikkat edilmiştir. Politika ve kurumsal stratejilere rehberlik etmek için tekno-ekonomik analiz, çalışma ekonomisi ve sürdürülebilirlik ölçütlerini birleştiren disiplinler arası araştırmalara ihtiyaç olduğu düşünülmektedir.

Parçalanmış iş birliği kümelerinin ilerlemeyi engellediği düşünülmektedir. Örneğin, yapay zekâ araştırmacıları ve tedarik zinciri uzmanları genellikle silo dergilerinde yayın yapmakta ve lojistik optimizasyonu için dijital ikizler gibi çözümleri birlikte geliştirme fırsatlarını kaçırmaktadır. Disiplinler arası entegrasyonun artırılması, bu bölünmeler arasında köprü kurmak için bölümler arası finansman girişimleri ve hibrit konferanslar gibi yapısal teşviklerin gerekliliği düşünülebilir. Bu eksikliklerin giderilmesi için gelecekteki şu tarz araştırmalara öncelik verilebilir:

1. Yakınsama çalışmaları: Endüstri 4.0 veya teknoloji tabanlı üretim süreçlerindeki çevik metodolojilerin dijital araçlarla birleştirilmesi (örneğin, yapay zekâ güdümlü Kaizen) öngörülebilir.
2. Tasarım yoluyla güvenlik çerçeveleri: Merkezi olmayan sistemler için sıfır güven mimarileri oluşturulabilir.

3. Bütünsel etki değerlendirmeleri: Vaka çalışmaları ve modelleme yoluyla toplumsal maliyetlerin/faydaların ölçülmesi çalışmaları yapılabilir.
4. İş birliği platformları: Farklı disiplinleri birleştirmek için paylaşılan veri kümeleri oluşturulabilir veya açık inovasyon zorlukları ortadan kaldırılabilir.

Endüstri 4.0 araştırmalarının bir sonraki dalgası, henüz keşfedilmemiş bu boyutları ele alarak, artımlı teknik ilerlemelerden dönüştürücü, sistem düzeyinde inovasyona geçebilir.

4.2. Tartışma

4.2.1. Temel bulguların yorumlanması

Bibliyometrik analiz, Endüstri 4.0 araştırmaları alanında büyük bir artış olduğunu ortaya koymaktadır. 2013'te 51 yıllık yayın sayısı 2024'te 2.714'e çıktığı tespit edilmiştir. Bu eğilim, üretimde dijital dönüşümün hızlı bir şekilde benimsenmesini yansıttığını göstermektedir.

Yapay zeka, IoT ve akıllı üretim alanlarındaki ilerlemeler otomasyon, tahmine dayalı analitik ve siber-fiziksel sistemlere (CPS) yönelik küresel endüstriyel değişimlerle uyumlu olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte, makale başına ortalama atıflardaki düşüş bir "atıf seyreltme" etkisine işaret etmektedir,

Yeni araştırmaların yoğunluğu, bireysel makalelerin görünürlüğünü azaltmaktadır. Bu olgu, giderek yoğunlaşan bir alanda yüksek etkiye ulaşmanın zorluğunun altını çizmektedir.

Anahtar kelime eş-oluşum analizi de tematik değişimleri vurgulamaktadır:

- 2013-2018: Uç bilişim (Shi vd., 2016) ve kestirimci bakım (Lei vd. 2017) gibi temel konuların hakimiyeti görülmektedir.
- 2019-2021: Yapay zekanın açıklanabilirliğinin (Holzinger vd., 2020) ve blok zincirinin yükselişi, otomatik sistemlerde güven ve güvenlik konusundaki endişeleri yansıtmaktadır.
- 2022-2024: Dijital ikizlerin ve 6G ağlarının ortaya çıkması, gerçek zamanlı simülasyona ve ultra düşük gecikmeli iletişime doğru bir geçişin işaretleri gözlemlenmektedir.

Anahtar kelime ağlarının azalan yoğunluğu artan uzmanlaşmaya işaret etmektedir. Disiplinler arası entegrasyon artarken (örneğin, AI + IoT), yeni niş konular (örneğin,

kuantum-edge bilişim) izole kümeler oluşturarak araştırma ortamında parçalanmaya işaret etmektedir. Shi vd. (2016) ve Lei vd. (2017) gibi ilk çalışmalar yüksek oranda atıf almaya devam etmektedir, sonraki araştırmalar için köşe taşı görevi görmektedir. Amir Masoud Rahmani (350'den fazla yayın) ve Abdullah Gani gibi üretken yazarlar, ortak yazarlık ağlarında merkez görevi görmektedir, IoT ve bulut bilişim gibi disiplinler arasında köprü kurmaktadır. Sürekli üretkenlikleri alanı şekillendirmede uzun vadeli katılımın önemini vurgulamaktadır.

4.2.2. Mevcut literatürle karşılaştırma

Yayın Büyümesi konusundaki bulgular, 2016 sonrası Endüstri 4.0 araştırmalarında yıllık %40'lık bir artış kaydeden Zheng vd, (2021) çalışmalarını desteklemektedir.

Disiplinler arası eğilimler açısından üretimde YZ/ML'nin yükselişi, Kagermann vd., (2013) CPS odaklı endüstriyel evrim öngörüsü ile uyumludur.

İş birliği örüntüleri yüksek kümelenme katsayısı (0,8968), Wagner ve diğerlerinin (2015) Endüstri 4.0 araştırmalarının birbirine sıkı sıkıya bağlı, yerleşmiş takımlarda ya da ortamlarda geliştiği gözlemini desteklemektedir.

Atıf seyrelmesi açısından ise atıf sayılarını savunan Bornmann vd., (2018) aksine yayın hacmi ile, verilerimiz, muhtemelen hızlı hareket eden alanlardaki daha hızlı eskime nedeniyle ortalama atıfların azaldığını göstermektedir.

Parçalanma ve bütünleşme bakış açısına göre ise Xu vd., (2020) Endüstri 4.0'da yakınsamayı vurgularken, anahtar kelime ağı analizimiz, "nedensellik" gibi yeni terimlerin farklı kümeler oluşturmasıyla birlikte artan uzmanlaşmayı ortaya koyduğu düşünülmektedir.

4.2.3. Bulguların çıkarımları

Tematik evrim ve çerçeve yükselen derece merkeziliği (anahtar kelime başına daha fazla bağlantı) ve düşen yoğunluk (daha az genel uyum) şeklindeki ikili eğilimler araştırma evrimi için bir "dallanma modeli" ortaya koyarken temel konular (örneğin AI) birleşmek yerine ayrışan özel alt konular (örneğin Explainable AI) ortaya çıkarmaktadır.

İş birliği dinamikleri, Çin (CAS) ve ABD'nin (UC Sistemi) kurumsal ağlardaki hakimiyetini vurgularken ulusal araştırma politikalarının küresel bilgi akışını şekillendirmedeki rolünü pekiştirmektedir.

Sektörel açıdan bakıldığında ise dijital ikizlerin ve tahmine dayalı teknolojilerin öne çıkması, üreticilerin gerçek zamanlı izleme sistemlerine yatırım yapmaları için fırsatlara işaret etmektedir.

Disiplinler arası konsorsiyumlara destek sağlaması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Çünkü çalışmanın bulgularına göre izole gruplar (<5 yazarlı 3.746) çabaları tekrarlama riski taşıdığından, parçalanmış kümeler (örneğin, AI+ yalın üretim) arasında köprü kurulması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Veri tabanı Web of Science (WoS)'a güvenmek, İngilizce olmayan ve konferans makalelerini eksik temsil edebilir. Atıf gecikmesi konusu önemlidir çünkü yeni çalışmalar (2023-2024) geciken atıflar nedeniyle değerinin altında kalabilir.

4.2.4. Gelecekteki araştırma yönelimleri

Bu bibliyometrik analizin bulguları, Endüstri 4.0 alanına katkı sağlamak isteyen araştırmacılar için umut vaat eden bazı konuları vurgulamaktadır. Literatürde dijital dönüşüm kapsamlı bir şekilde ele alınsa da Endüstri 4.0 ilkelerinin yapay zekâ, IoT ve gerçek zamanlı veri analitiği ile nasıl geliştirilebileceğine ilişkin sistematik çalışmaların devam etmesi gerektiği düşünülmektedir. Aşağıda bu durum detaylandırılmaya çalışılmıştır;

Ortaya Çıkan Konular ve Araştırma Soruları Güvenilir ve Açıklanabilir Yapay Zeka: YZ ve makine öğrenimi üretimde devrim yaratmış olsa da, YZ şeffaflığı ve güvenilirliğinin sağlanmasında zorluklar devam etmektedir. Gelecekteki çalışmaların, Açıklanabilir Yapay Zeka (EAI) ve belirsizlik ölçme yöntemlerini geliştirmeye, model yorumlanabilirliği ve etik karar verme konularını ele almaya odaklanması beklenmektedir.

Merkezi Olmayan Zekâ ve Blok Zinciri Entegrasyonu: Blok zinciri teknolojileri IoT ağlarının güvenliğini sağlamada halihazırda ilerleme kaydettiğinden, yaklaşan araştırmalar muhtemelen blok zincirinin yapay zeka ve uç bilişim ile yakınsamasını keşfedeceği düşünülmektedir. Bu, akıllı üretimde güvenliği, veri bütünlüğünü ve gerçek zamanlı karar verme sürecini iyileştirmek için merkezi olmayan çerçeveler geliştirmeyi içermektedir.

Dijital İkizler ve Artırılmış/Sanal Gerçeklik: Dijital ikizlerin Endüstri 4.0 uygulamalarıyla entegrasyonu da gelişmekte olan bir diğer alandır. Gelecekteki

çalışmalar gerçek zamanlı simülasyon, kestirimci bakım ve üretim ortamlarında operasyonel karar verme sürecini geliştirmek için VR/AR kullanımına odaklanabilir.

Yeni Nesil Ağ Altyapıları: Araştırmaların, katlanarak büyüyen veri akışlarını yönetmek için bulut, uç ve hatta kuantum bilişim çerçevelerinin entegrasyonunu da ele alması gerekecektir. 2013'te 51 olan ağ düğümü sayısının 2024'te 2.714'e yükselmesi ve ortalama derecenin artmasının bunu kanıtladığı düşünülmektedir.

Boşluklar ve Keşfedilmemiş Alanlar Yalın Düşünce ile Disiplinler arası Entegrasyon: Literatür teknolojik yönleri sağlam bir şekilde ele alsa da yalın üretim ilkelerini dijital dönüşüm stratejileriyle sistematik olarak bütünleştiren araştırmalarda kayda değer bir boşluk bulunmaktadır. Gelecekteki çalışmalar, yalın metodolojilerin yapay zeka odaklı analizlerle nasıl optimize edilebileceğinin araştırılarak bu boşluğun doldurabileceği düşünülmektedir.

Merkezi Olmayan Sistemlerde Siber Güvenlik: İlk çalışmalar güvenlik için blok zincirine odaklanmış olsa da, birden fazla gelişmekte olan teknolojiyi içeren merkezi olmayan ağların güvenliğini sağlama konusunda henüz keşfedilmemiş bir alan bulunmaktadır. Bu tür karmaşık ekosistemlerdeki kırılganlıkları ele almak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğu gözlemlenmiştir.

Ekonomik, Sosyal ve Politik Çıkarımlar: Belge, açık erişim yayıncılık modellerinin maliyet-fayda analizleri gibi daha geniş ekonomik etkilerin yanı sıra Endüstri 4.0'ın benimsenmesinin toplumsal ve politika ile ilgili sonuçlarının daha fazla araştırılması gerektiğine işaret etmektedir. Bu alandaki çalışmalar, bu yeniliklerin iş piyasalarını, düzenleyici çerçeveleri ve çevresel sürdürülebilirliği nasıl etkilediğinin araştırılabileceği düşünülmektedir.

Parçalanmış Araştırma Kümeleri Arasında Köprü Kurmak: Ortak yazarlık ve atıf ağları, binlerce bağlantılı bileşen ve birçok küçük, izole grup ile oldukça parçalı bir manzara ortaya koymaktadır. Gelecekteki araştırmalar, bu izole kümeler arasında köprü kurmak için disiplinler arası iş birliklerini teşvik etmeye odaklanabilir ve potansiyel olarak daha bütünsel ve etkili çözümlere yol açabileceği gözlemlenmiştir.

İlaveten, yapay zekanın benimsenmesi arttıkça, otomatik karar vermede şeffaflık, adalet ve güvenilirliğin sağlanması kritik önem taşımaktadır. Bu konu ile alakalı olarak gelecekteki çalışmalar kestirimci bakım için gerçek zamanlı fabrika operatörleri için eyleme geçilebilir ve içgörüler sağlayan, yorumlanabilir yapay zekâ modelleri

geliştirilebilir. Endüstriyel yapay zekâ kullanımında önyargıyı azaltmak için eğitim verilerindeki dengesizliklerin (Örn. nadir ekipman arızaları) model sağlamlığını nasıl etkilediğinin incelenebilir. Endüstri 4.0'da yapay zekâ için düzenleyici çerçeveler oluşturularak akıllı fabrikalarda etik AI dağıtımını için standartlar önerilebilir.

4.2.5. Disiplinler arası iş birliğinin güçlendirilmesi

Bibliyometrik analiz, araştırma kümeleri arasındaki bölünmüşlüğü ortaya koymaktadır. Gelecekteki çabaların paylaşılan veri setleri ve kıyaslama geliştirmek amacıyla IoT ve AI vaka çalışmaları için açık erişimli veri havuzları oluşturulmasının gerekli olduğu analiz sonuçlarına göre düşünülmektedir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Endüstri 4.0'ın tarihsel gelişimi ve bileşenlerinin üretim süreçlerine entegrasyonu üzerine yapılan akademik çalışmalar ve değerlendirmeler, küresel üretim dünyasında önemli değişimlere neden olan teknolojilerin giderek daha fazla benimsenmesine neden olduğunu işaret etmektedir. Bu araştırma kapsamında Endüstri 4.0 uygulamaları literatürünün bibliyometrik bir analizini yaparak mevcut araştırma eğilimlerini, atıf dinamiklerini ve yayınlanma modellerini ortaya koymuştur. Ana araştırma sorusu olan “Endüstri 4.0 uygulamaları literatüründe mevcut araştırma eğilimleri, atıf dinamikleri ve yayınlanma modelleri nelerdir ve bu alanda gelecekteki araştırma yönelimleri ve ihtiyaçlar nasıl belirlenebilir?” sorusu çerçevesinde ulaşılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

Endüstri 4.0 literatüründe yapılan araştırmalar yeterli midir?

Yapılan analizler, Endüstri 4.0 üzerine yapılan akademik yayınların son on yılda önemli ölçüde arttığını ortaya koymuştur. Ancak, bu artışın belirli konuları (örneğin yapay zekâ, büyük veri, siber-fiziksel sistemler) ön plana çıkardığı; buna karşılık bazı alt alanların görece daha az çalışıldığı görülmüştür. Bu durum, alanda niceliksel bir yeterliliğin varlığına rağmen niteliksel çeşitlilik eksikliği olduğunu göstermektedir.

Endüstri 4.0 süreçleri akademik çalışmalarda nasıl ele alınmıştır?

Endüstri 4.0'a ilişkin çalışmaların çoğunluğunun teknoloji temelli uygulamalara odaklandığı gözlemlenmiş; üretim süreçlerinde otomasyon, dijitalleşme ve yapay zekâ entegrasyonu gibi başlıkların ön planda olduğu belirlenmiştir.

Akademik yayınlarda nasıl bir ivme yakalanmıştır ve yayın dalgalanması var mıdır?

Literatür, özellikle 2015 sonrası ciddi bir hız kazanmıştır ve yayın sayısı yıllık bazda hızla artmıştır. 2019 ve 2021 yıllarında bu artış çok dikkat çekici bir noktaya ulaşmıştır. Ancak pandemi dönemi gibi (2020) bazı dönemlerde yayın temposunda kısmi dalgalanmalar gözlenmiştir. Bu durum, küresel gelişmelerin akademik üretkenliği doğrudan etkileyebileceğine işaret etmektedir.

Akademik çalışmalar hangi yayınlanma modelleri ile ele alınmıştır?

İncelenen yayınların önemli bir kısmı makale, konferans bildirisi ve kitap bölümü formatındadır. Hakemli dergilerdeki yayınlar ağırlıklı olsa da konferans bildirilerinin yüksek sayısı, alanın hâlâ gelişmekte olduğunu ve hızlı bilgi paylaşımına ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Açık erişimli yayınların oranı da giderek artmaktadır.

Araştırmacıların yönelimleri hangi eğilimlere ve atıflara sebebiyet vermiştir?

Akademik araştırmacılar en çok Endüstri 4.0'ın teknolojik yönüne odaklanmış; bu odaklanma atıf sayılarında da gözlemlenmiştir. Yoğun atıf alan çalışmalar, genellikle büyük veri, IoT ve yapay zekâ temelli üretim çözümleri üzerine odaklanan yüksek etkili yayınlar olduğu ortaya çıkmıştır. Bu durum, literatürde teknolojik uygulamaların daha fazla yankı bulduğuna işaret etmektedir.

Ortak yazarlı makale durumu nedir?

Ortak yazarlı çalışmaların oranı çarpıcı biçimde yüksektir. Bu durum, Endüstri 4.0 gibi çok disiplinli bir alanın doğası gereği iş birlikçi ve ağ tabanlı araştırma yapılarının geliştiğine işaret etmektedir. Uluslararası iş birliklerinin yanı sıra, aynı kurumdan gelen çok yazarlı çalışmalar büyük bir yer tuttuğu görülmüştür.

Öne çıkan kurumlar ve yazarlar var mıdır?

Bibliyometrik analiz neticesinde bazı üniversitelerin ya da kurumların (örneğin Çin, Almanya ve Hindistan merkezli) ve yazarların literatürde öne çıktığı belirlenmiştir. Bu kurumlar çok sayıda yayın üretmenin yanı sıra yüksek atıf oranlarına da sahiptir. Bu bulgu, Endüstri 4.0 araştırmalarında bazı merkezlerin küresel bilgi üretiminde lider konuma geldiğini göstermektedir.

Araştırmanın Endüstri 4.0'ın geleceğiyle ilgili öngörüsü bu dönüşümün daha da hızlanacağı ve akademik çalışmalarında artmaya devam edeceği şeklindedir.

Sonuç itibarıyla Endüstri 4.0'ın süreçleri yalnızca akademik üretim verimliliğini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda küresel iş birliğini de arttırdığı net bir biçimde gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra da akademik kurumların küresel bağlamda rekabet edebilme kapasitelerinin zaman içerisinde yükseldiği ortaya çıkmıştır.

ÖNERİLER

Gelecekteki çalışmalar, yalnızca teknolojik boyuta odaklanmakla kalmayıp, örgütsel dönüşüm, iş gücü dinamikleri ve sürdürülebilirlik gibi sosyal boyutları da kapsamalıdır. Bu sayede Endüstri 4.0'ın çok yönlü etkileri daha bütüncül biçimde anlaşılabilir.

Endüstri 4.0 literatüründe anahtar kelime yoğunluğunda tespit edilen tematik dengesizlik dikkate alınarak, az temsil edilen alanlara (örneğin eğitim, etik, hukuki düzenlemeler) yönelik araştırmalar teşvik edilmelidir.

Bibliyometrik veriler ışığında öne çıkan iş birlikleri dikkate alınarak, uluslararası araştırma ağlarının genişletilmesi desteklenmelidir. Özellikle gelişmekte olan ülkelerden gelen akademisyenlerin daha görünür olması için küresel yayın platformlarına erişim kolaylaştırılmalıdır.

Yayınlanma modellerinde açık erişim oranı artış gösterse de bu eğilim teşvik edilmelidir. Böylece, bilginin demokratikleşmesi ve daha geniş kitlelere ulaşması sağlanabilir.

Yayın ivmesinin sürdürülebilirliği için sadece kısa vadeli değil, uzun vadeli araştırma desteklerinin devamlılığı güvence altına alınmalıdır.

Yüksek atıf alan yayınların içeriksel özellikleri göz önünde bulundurularak, genç araştırmacıların bu nitelikleri benimsemeleri için bibliyometrik okuryazarlık eğitimleri yaygınlaştırılmalıdır.

KAYNAKÇA

- Abdar, M., Pourpanah, F., Hussain, S., Rezazadegan, D., Liu, L., Ghavamzadeh, M., & Nahavandi, S. (2021). A review of uncertainty quantification in deep learning: Techniques, applications and challenges. *Information fusion*, 76, 243-297. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.06225>
- Acet, Hakan & Koç, Şerife. (2020). Dördüncü Sanayi Devrimi'nin (Endüstri 4.0) Dünyaya ve Türkiye'ye ekonomik yansımaları. *Journal of Social and Humanities Sciences Research*, 7(58), 2243-2256. <http://dx.doi.org/10.26450/jshsr.1982>
- Akbaba, A. İ., ve Akbulut, E. (2021). 3 Boyutlu Yazıcılar ve Kullanım Alanları. *ETÜ Sentez iktisadi ve idari bilimler dergisi*, (3), 19-46.
- Akben, İ., ve Avşar, İ. İ. (2018). Endüstri 4.0 ve karanlık üretim: genel bir bakış. *Türk Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi*, 3(1), 26-37.
- Aksoy, B., Bayrakçı, H. C., Bayrakçı, E. ve Uğuz, S. (2017). Büyük verinin kurumlarda kullanımı. *Süleyman Demirel Üniversitesi İİBF Dergisi*.
- Aksoy, S. (2017). Değişen teknolojiler ve endüstri 4.0: endüstri 4.0'ı anlamaya dair bir giriş, *SAV Katkı*, 4, 2017: 34-44. <https://doi.org/10.54688/ayd.1104901>
- Aktan, E. (2018). Büyük veri: Uygulama alanları, analitiği ve güvenlik boyutu. *Bilgi Yönetimi*, 1(1), 1-22. <https://doi.org/10.33721/by.403010>
- Alçın, S. (2016). Üretim için yeni bir izlek: sanayi 4.0. *Journal of Life Economics*, 3(8):19-30. DOI:[10.15637/jlecon.129](https://doi.org/10.15637/jlecon.129)
- Allam, Z., & Jones, D. S. (2021). Future (post-COVID) digital, smart and sustainable cities in the wake of 6G: Digital twins, immersive realities and new urban economies. *Land use policy*, 101, 105201. DOI: [10.1016/j.landusepol.2020.105201](https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105201)
- Apillioğulları, L. (2019). *Dijital Dönüşüm: Akıllı Fabrikalar*, Aura Kitapları, İstanbul
- Arı, E. S. (2021). Süper akıllı toplum: Toplum 5.0. *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 23(1), 455-479.
- Arslan, A. (2020). *Dördüncü sanayi devriminin (endüstri 4.0) emek piyasaları üzerindeki etkileri*. [Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi] Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi. (Tez No: 633169).
- Asar, İ., & Esen, Ş. (2021). Endüstri 4.0 ve işletme yönetiminin geleceğine olası etkileri: Kavramsal bir yaklaşım. 458-468. <https://doi.org/10.29228/jav.51809>
- Ashton, K. (2009). That 'internet of things' thing. *RFID Journal* <https://www.rfidjournal.com/articles/pdf?4986> Erişim Tarihi: 14.01.2025
- Aslan, Ş. & Güzel, Ş. (2019). Endüstri 4.0 gelişim süreci ve sağlıkta dijital dönüşüm. *2nd International Congress On New Horizons In Education And Social Sciences (ICES-2019) Proceedings, Haziran 2019*, 650-659. <https://doi.org/10.21733/ibadjournal.584464>
- Aslay, F. (2017). Siber saldırı yöntemleri ve Türkiye'nin siber güvenlik mevcut durum analizi. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 1(1), 24-28.
- Atik, H. & Ünlü, F. (2019). Endüstri 4.0'a dönüşüm süreci: Avrupa Birliği ülkelerinin performansı üzerine ampirik bir analiz. *Marmara Üniversitesi Avrupa*

- Araştırmaları Enstitüsü Avrupa Araştırmaları Dergisi*, 27(1), 145-168.
<https://doi.org/10.29228/mjes.28>
- Ayboğa, H. & Görmüş, L. (2022). Endüstri 4.0-Türkiye'nin durumu ve yapılması gerekenler. *Marmara Sosyal Araştırmalar Dergisi*, (17), 82-98.
- Aydın, E. & Demiral, G. (2019). İşgücü farklılığını dikkate alarak endüstri 4.0'ın zorlukları ve yararları: kavramsal bir çerçeve. *İşletme Araştırmaları Dergisi*, 11(3), 1976-1990. <https://doi.org/10.20491/isarder.2019.718>
- Aydın, N. (2016). *Almanya'nın Endüstri 4.0 vizyonu*. Endüstri 4.0 Platformu. Erişim adresi: <http://www.endustri40.com/almanyanin-endustri-4-0-vizyonu/> Erişim Tarihi: 10.06.2025
- Aydın, N. (2022). Tarım sektöründe bilgi teknolojileri. *Balkan & Near Eastern Journal of Social Sciences (BNEJSS)*, 8.
- Aydınbaş, G. & Erdinç, Z. (2023). Endüstri 4.0 yolunda Türkiye ekonomisi üzerine bir değerlendirme. *Sakarya İktisat Dergisi*, 12(2), 187-211.
- Aziez, M., Benharzallah, S. ve Bennoui, H. (2019). "A full comparison study of service discovery approaches for internet of things". *International Journal of Pervasive Computing and Communications*, 15 (1), 30-50 <https://doi.org/10.1108/IJPC-04-2019-0038>
- Baaziz, A. & Quoniam, L. (2018)., How to use big data technologies to optimize operations in upstream petroleum industry, *International Journal of Innovation, Sao Paulo*. DOI:[10.5585/iji.v1i1.4](https://doi.org/10.5585/iji.v1i1.4)
- Bacaksız, F. E., Yılmaz, M., Ezizi, K., & Alan, H. (2020). Sağlık hizmetlerinde robotları yönetmek. *Sağlık ve Hemşirelik Yönetimi Dergisi*, 3(7), 458-465. DOI: [10.5222/SHYD.2020.59455](https://doi.org/10.5222/SHYD.2020.59455)
- Bağcı, E. (2018). Endüstri 4.0: Yeni üretim tarzını anlamak. *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 9(24), 122-146.
- Banger, G. (2018). *Endüstri 4.0 Uygulama ve Dönüşüm Rehberi*. Ankara: Dorlion
- Bartodziej, C. J. (2017). The concept industry 4.0 an empirical analysis of technologies and applications in production logistics.
- Barutçu, H. C. (2019). *Endüstri 4.0 uygulamalarının üretim süreçlerine etkisi: BOSCH Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi örneği*. [Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi] Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi. (Tez No: 544932).
- 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.
- Bastian, M., Heymann, S., & Jacomy, M. (2009, March). Gephi: an open source software for exploring and manipulating networks. In *Proceedings of the international AAAI conference on web and social media*, 3(1), 361-362.
- Batt, S., Grealis, T., Harmon, O., & Tomolonis, P. (2020). Learning Tableau: A data visualization tool. *the Journal of economic education*, 51(3-4), 317-328.
- Bauer, W. (2014). "Rule base for operative planning and control of flexible labour hours", *IFAC Proceeding Volumes*, 47(3), Ağustos 2014, 10760-10765.
- Bayrak, A. (2018). "Dünya'da ve Türkiye'de Sanayi'de dijital dönüşüm (sanayi 4.0) incelemesi ve Türkiye'nin entegrasyonu için değerlendirmeler".

- Bıçakçı, S. (2014). NATO'nun gelişen tehdit algısı: 21. yüzyılda siber güvenlik. *Uluslararası İlişkiler Dergisi*, 10(40), 101-130.
- Biekmann, C. (2020). Industry 4.0 offers limitless potential in Mexico. *Mexico Business News*.
- Bilgin, O. (2018). *Dördüncü Sanayi Devrimi ve Türkiye Ekonomisi: ulusal yenilik sistemi çerçevesinde bir inceleme*. [Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi] Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi. (Tez No: 531577).
- Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı, (2016). "*Orman Köylerinde Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi için Sürdürülebilir Finans Mekanizması Projesi*" Erişim adresi: www.undp.org/tr/turkiye/projects/orman-koylerinde-gunes-enerjisinden-elektrik-uretimi-icin-surdurulebilir-finans-mekanizmasi-projesi, Erişim Tarihi: 04/07/2025
- Blondel, V. D., Guillaume, J.-L., Lambiotte, R., & Lefebvre, E. (2008). Fast unfolding of communities in large networks. *arXiv preprint arXiv:0803.0476*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.0803.0476>
- Bornmann, L., Haunschild, R., & Hug, S. E. (2018). Visualizing the context of citations referencing papers published by Eugene Garfield: A new type of keyword co-occurrence analysis. *Scientometrics*, 114, 427-437.
- Brown, R. (2018). Robots, New Technology, and Industry 4.0 in Changing Workplaces. Impacts on Labor and Employment Laws. *American University Business Law Review*, 7(3), 349–384
- Bulut, E. ve Akçacı, T. (2017). Endüstri 4.0 ve inovasyon göstergeleri kapsamında Türkiye Analizi. *ASSAM Uluslararası Hakemli Dergi (ASSAM - UHAD) ASSAM International Refereed Journal* 7, 2017.
- Büchter, R. B., Weise, A., & Pieper, D. (2020). *Development, testing and use of data extraction forms in systematic reviews: a review of methodological guidance*. *BMC Medical Research Methodology*, 20. <https://doi.org/10.1186/s12874-020-01143-3>
- Çakır, K. (2017). *Akıllı üretim sistemlerinin küçük ve orta ölçekli işletmelerde uygulanması*. [Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi] Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi. (Tez No: 475754).
- Çakır, N. N. (2018). Endüstri 4.0 ve çalışmanın geleceği. *Ejovoc (Electronic Journal of Vocational Colleges)*, 8(2), 97-105.
- Çakıt, E., Adem, A., & Dağdeviren, M. (2020). Endüstri 4.0 ergonomi için tehdit mi fırsat mı? *Verimlilik Dergisi*, (3), 43-57.
- Callon, M., Courtial, J. P., & Laville, F. (1991). Co-word analysis as a tool for describing the network of interactions between basic and technological research: The case of polymer chemistry. *Scientometrics*, 22, 155-205.
- Can, A. (2017). Robotlar işgücüne karşı. <http://www.hurriyet.com.tr/ik-yeni-ekonomi/robotlar-igucune-karsi-40415634> adresinden alındı. Erişim Tarihi: 10.01.2025.
- Cerit, S., & Ören, H. G. Ü. (2022). Türkiye ekonomisinin endüstri 4.0 kapsamında değerlendirilmesi. *Sosyal ve Beşeri Bilimler Araştırmaları Dergisi*, 23(50), 37-59.
- Çetinkaya, G. (2020). *Dördüncü sanayi devriminin kamu harcamaları üzerine etkisi*. [Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi] Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi. (Tez No: 643321).

- Ceylan, E. Z. (2019). “Dijital İkizler ve İnşaat Sektöründeki Yeri”, *Yapı Bilgi Modelleme*, 1(2), 53-61.
- Coşkunoglu, O. (2016). Güney Kore’nin Endüstri 4.0 Kaygısı. *BT Haber*. Erişim adresi: <https://medium.com/osman-coskunoglu/g%C3%BCney-korenin-end%C3%BCstri-4-0-kayg%C4%B1s%C4%B1-90c01d845e3e> Erişim tarihi:28/07/2025
- Dai, Y., Xu, D., Zhang, K., Maharjan, S., & Zhang, Y. (2020). Deep reinforcement learning and permissioned blockchain for content caching in vehicular edge computing and networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(4), 4312-4324.
- Degryse, Christophe (2016) Digitalisation of the economy and its impact on labour markets. ETUI Research Paper-Working Paper. 1-8
- Deng, T., Zhang J., K. & 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
- Diebold, F. X. (2013). ‘Big Data’ dynamic factor models for macroeconomic measurement and forecasting. M. Dewatripont, L. P. Hansen ve S. J. Turnovsky (Ed.), *Advances in Economics and Econometrics, Theory and Applications*, Eighth World Congress of the Econometric Society, III 115-122. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press
- Dijital Hastane: “HIMSS (Healthcare Information and Management Systems Society - Sağlık Bilgi ve Yönetim Sistemleri Topluluğu)”, (Çevrimiçi) <https://dijitalhastane.saglik.gov.tr/TR,4871/himss-healthcare-information-and-management-systems-society---saglik-bilgi-ve-yonetim-sistemleri-toplulugu.html>, Erişim Tarihi: 15.01.2025.
- Dönençark, M. & Tecim, V. (2020). “Kurumsal karar destek sistemlerinde yapay zekâ kullanımı: tasarım ve uygulama”, *Yönetim Bilişim Sistemleri Dergisi*, 6(2), 77-103.
- Duman, A. & Karğın, S. (2021). Akıllı üretimin işletme performansına etkisi: Vaka analizi yaklaşımı. *Muhasebe ve Finans İncelemeleri Dergisi*, 4(2), 91-109.
- Duman, M. Ç. (2020). *Endüstri 4.0 teknoloji bileşenlerinin örgütsel performansa etkilerini belirlemeye yönelik bir araştırma*. [Yayımlanmış Doktora Tezi, Malatya İnönü Üniversitesi] Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi. (Tez No: 608026).
- Duman, M. Ç. (2022). İşletmeler için yeni bir verimlilik teknolojisi: Dijital ikiz. *Verimlilik Dergisi*, 189-206.
- Duran, C., (2021). *Yapay zekâ temelli pazarlama: geleneksel pazarlamanın sonu mu? Yapay Zekâ: Güncel Yaklaşımlar ve Uygulamalar*. 1.Baskı Mart 2021, Beta Kitap.
- Ege Bölgesi Sanayi Odası (EBSO) (2017). *Sanayi 4.0 Uyum Sağlayamayan Kaybedecek!*. Gözden Geçirilmiş İkinci Baskı.
- Ege, B. (2013). Rastlantının bittiği yer big data. *Bilim ve Teknik*, 550, 22-26
- EKOIQ, (2014). “Akıllı” yeni dünya dördüncü sanayi devrimi endüstri 4.0: bilişimin endüstriyle buluştuğu yer Türkiye “akıllı” üretime hazır mı?, *EKOIQ Dergisi Özel Eki, Aralık*, 1-17.
- Elibol, N. (2017). Endüstri 4.0 devrimi ve Gümrük ve Ticaret Bakanlığı. *Gümrük ve Ticaret Dergisi*, 9, 41-49.

- Endüstri 4.0 Platformu, (2019). Almanya'nın endüstri 4.0 vizyonu [online]. <https://www.endustri40.com/almanyain-endustri-4-0-vizyonu/>. Erişim Tarihi: 11.01.2025.
- Erdoğan, A. A., & Feyzullahoğlu, E. (2020). Otomotiv sektöründe kullanılan yeni trend hatasızlaştırma ve alternatif kontrol yöntemleri. *In International Marmara Sciences Congress (AUTUMN 2020)*, 278.
- Erener, Ş., ve Boz, S. (2021). Modern üretim tekniklerinde eklemeli imalat sistemlerinin yeri ve kullanım alanları. *Turkish Journal of Fashion Design and Management*, 3(1), 47-56.
- Erol, E. (2016). İsviçre ekonomisi üzerine bir değerlendirme. *Ayrıntı Dergisi*, Cilt 4, Sayı 44.
- Ersöz, S. & Ersöz, O. Ö. (2015). *İşletmelerde Bilgi Sistemleri Uygulamalı Örneklerle*. (1. Baskı). Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.
- Ertuğrul, İ., & Deniz, G. (2018). 4.0 Dünyası: pazarlama 4.0 ve endüstri 4.0. *Bitlis Eren Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 7(1), 143-170.
- Erturan, İ. & Ergin, E. (2018). Dijital denetim ve dijital ikiz yöntemi. *Muhasebe Bilim Dünyası Dergisi*, 20(4), 810- 830.
- Eser, E. (2014). Dünya yeniden sanayiye dönerken Türkiye dünya sanayinin neresinde? *İktisat ve Toplum*, Sayı:45, 27-44.
- European Parliamentary Research Service. (2015). Industry 4.0 digitalisation for productivity and growth; European Parliamentary, Brussels.
- European Parliament's Committee on Industry, Research and Energy (ITRE). (2016). Industry 4.0; European Parliamentary, Brussels.
- Faller, C. & Feldmuller, D. (2015). "Industry 4.0 Learning Factory for Regional SMEs", *Procedia CIRP*, 32, 88-91.
- Fırat, S. Ü. & Fırat, O. Z. (2017). Sanayi 4.0 devrimi üzerine karşılaştırmalı bir inceleme: kavramlar, küresel gelişmeler ve Türkiye. *Toprak İşveren Dergisi*, Sayı. 114, ss. 10-23.
- García-Jacas, C. R., Pinacho-Castellanos, S. A., García-González, L. A., & Brizuela, C. A. (2022). Do deep learning models make a difference in the identification of antimicrobial peptides?. *Briefings in Bioinformatics*, 23(3), bbac094.
- Constance, E. (2017). The Internet of Things: preparing for the revolution: Why we need to talk about IoT. *Journal of Cyber Policy*, 2(2), 152-154.
- Gazi Üniversitesi: "Türkiye'de bir ilk: Türk beyin projesi Cumhurbaşkanlığı Dijital Dönüşüm Ofisi ve Gazi Üniversitesi iş birliği ile hayata geçirildi". (Çevrimiçi) <http://mf.gazi.edu.tr/posts/view/title/turkiye%E2%80%99de-bir-ilk:-turk-beyin-projesi-cumhurbaskanligi-dijital-donusum-ofisi-ve-gazi-universitesi-is-birligi-ile-hayata-gecirildi-255338>, Erişim Tarihi: 15.01.2025.
- Gedik, Y. (2021). Endüstri 4.0 teknolojilerinin ve endüstri 4.0'ın üretim ve tedarik zinciri kapsamındaki etkileri: Teorik bir çerçeve. *JOEEP: Journal of Emerging Economies and Policy*, 6(1), 248-264.
- Genç, S. (2018). Sanayi 4.0 yolunda Türkiye, *Sosyoekonomi*, vol.26(36).
- Ghaffari, K., Lagzian, M., Kazemi, M., & Malekzadeh, G. (2019). A socio-technical analysis of internet of things development: an interplay of technologies, tasks, structures and actors. *foresight*, 21(6), 640-653.

- Girgin, C. D., ve Yılmaz, S. (2022). Endüstri 4.0 kavramsal çerçeve. *Turkish Management Review*, 1(1), 27-45.
- Glaessgen, E. & 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 ikiz teknolojisinin kullanımına ilişkin bir değerlendirme", *Açıköğretim Uygulamaları ve Araştırmaları Dergisi*, 6(4), 155-173.
- Gökçen, H. (2011). *Yönetim bilgi / bilişim sistemleri: analiz ve tasarım*. (2. Baskı). Ankara: Afşar Matbaacılık.
- Gökdeniz, S. T., & Kamburoğlu, K. (2022). Artificial intelligence in dentomaxillofacial radiology. *World Journal of Radiology*, 14(3), 55.
- Gökrem, L. & Bozuklu, M. (2016). "Nesnelerin interneti: yapılan çalışmalar ve ülkemizdeki mevcut durum". *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 13,47-68.
- Görçün, Ö. F. (2016). *Dördüncü endüstri devrimi endüstri 4.0*. Beta Yayıncılık, İstanbul.
- Görener, A. & Toker, K. (2020), *Yapay zekâda evrimsel algoritmalar: lojistik sektöründe bir genetik algoritma uygulaması*, Oyun Değiştiren Güç: Yapay Zekâ 1.Baskı Haziran 2020, Beta Kitap.
- Göv, S. A., & Erdoğan, D. (2020). Dördüncü endüstri devriminin (endüstri 4.0) neresindeyiz?. *İstanbul Gelişim Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 7(2), 299-318.
- Gregory, J. (2015). The internet of things: revolutionizing the retail industry. https://www.accenture.com/acnmedia/centricity/conversion-assets/dotcom/documents/global/pdf/dualpub_14/accenture-the-internet-of-things.pdf Erişim Tarihi: 14.01.2025
- Grieves, M. (2014). "Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication", Working Paper.
- Grieves, M. (2016). "Origin of the digital twin concept", Florida Institute of Technology, Working Paper.
- Grieves, M. (2019). "Virtually intelligent product systems: digital and physical twins", Complex Systems Engineering: Theory and Practice.
- Grieves, M. & Vickers, J. (2017). "Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems", Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems, Springer, Cham.
- GTAI Germany Trade & Invest, 2018, <https://www.gtai.de/en/invest/business-location-germany/foreign-direct-investment#785242>, Erişim Tarihi: 15.01.2025
- Gülşen, İ. (2019). Nesnelerin interneti: vaatleri ve faydaları. *Avrasya Sosyal ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 6(8), 106-118.
- Gülşen, İ. & Özdemir, Ş. (2018). "Perakendecilikte teknolojik yenilikler ve uygulamalar". *Pazarlama Teorisi ve Uygulamaları Dergisi*, 4 (1), 103-138.
- Güner, A. (2018). 4. Endüstri devrimi ülke incelemesi: Amerika Birleşik Devletleri, <https://www.yonetimdeinsan.com/endustri40/4-endustri-devrimi-ulke-inceleme-amerika-birlesik-devletleri/>, Erişim Tarihi: 10.01.2025.
- Gürlesel, C. F. (2018). Çin'in sanayide dönüşüm programı ve makine sanayisi, *MAKFED*.

- Gürün, F. (2019, July). Endüstri 4.0 ve beşerî sermayenin geleceği. In *Journal of Social Policy Conferences* (No. 76, 67-88). Istanbul University.
- Hassoun, A., Ait-Kaddour, A., Abu-Mahfouz, A., Rathod, N., Bader, F., Barba, F., Biancolillo, A., Cropotova, J., Galanakis, C., Jambrak, A., Lorenzo, A., Mâge, I., Ozogul, F., Regenstein, J. (2022). *The fourth industrial revolution in the food industry—part 1: industry 4.0 technologies*. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2-12.
- Hermann, M., Pentek, T. & Otto B. (2016). Design principles for industrie 4.0 scenarios. *system sciences (HICSS), 49th Hawaii International Conference*.
- Himmetoğlu, S. &Delice, Y. (2022). Sağlık Sektöründe Endüstri 4.0.
- HIMMS Eurasia: “HIMMS 6 ve 7 Hastaneleri”, (Çevrimiçi)
<https://himsseurasia.com/himss-6-ve-7-hastaneleri>, Erişim Tarihi: 15.01.2025.
- Holzinger, A. Goebel, R. Fong, R. Moon, T. Müller, K.-R & Samek, W. “xxAI - Beyond Explainable Artificial Intelligence,” *Conjunction with ICML 2020, Revised and Extended Papers*, pp. 3–10, 2020.
- IFR.org, (2017). Executive Summary World Robotics 2017 Industrial Robots [online].
https://ifr.org/downloads/press/Executive_Summary_WR_2017_Industrial_Robots.pdf. Erişim Tarihi: 11.01.2025.
- İyigün, N. Ö. (2021). *Yapay zekâ ve gelecek: insan ve teknoloji arasındaki ilişki, yapay zekâ: güncel yaklaşımlar ve uygulamalar*, 1.Baskı Mart 2021, Beta Kitap.
- Japanese Ministry for Economics, Trade and Industry (METI). (2015). The ‘next innovation’ in manufacturing (monozdukuri) is coming: Japanese factories connected together; Ministry for Economics, Trade and Industry, Japan.
- Jian, Q., Ying, L. Ve Grosvenor, R. (2016). “A categorical framework of manufacturing for industry 4.0 and beyond”, *Procedia CIRP*, 52, 173-178, 2016.
- Kabarlarlı, E. (2016). *Endüstri 4.0 ve Dijital Ekonomi – Dünya ve Türkiye ekonomisi için fırsatlar, etkiler ve tehditler*. Nobel Bilimsel Eserler, 1. Basım, Ankara
- Kagermann, H., Helbig, J., Hellinger, A., ve Wahlster, W. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry; final report of the Industrie 4.0 Working Group. Forschungsunion.
- Kalaycı, İ. (Ed.). (2020). *Türkiye Ekonomisi*. İstanbul: Divan Kitap
- Kalkan, K. (2018). *Endüstri 4.0: sektörel bazda incelenmesi ve patent sistemi üzerindeki etkisi*. [Uzmanlık Tezi, Türk Patent Kurumu Patent Dairesi Başkanlığı]
- Kalkınma Bakanlığı. (2018). On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023) Sanayide dijitalleşme çalışma grubu raporu. Kalkınma Bakanlığı, Ankara.
- Kamber, E. (2019). *Türkiye’de endüstri 4.0 farkındalığı*. [Yüksek Lisans Tezi, Alaaddin Keykubat Üniversitesi] Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi. (Tez No: 539050).
- Kamber, E., & Bolatan, G. İ. S. (2019). Endüstri 4.0 Türkiye farkındalığı. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 11(30), 836-847.
- Karacaer, B. (2023). Akıllı otomasyon sistemlerinin getirdiği riskler ve iç denetime etkileri. *İşletme Akademisi Dergisi*, 4(2), 155-173.

- Kayar, A., Ayvaz, B., & Öztürk, F. (2018, November). Akıllı fabrikalar, akıllı üretim: endüstri 4.0'a genel bakış. In *International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology (EurasianSciEnTech)* (pp. 22-23).
- Kent, E. (2016). Endüstri 4.0' dan Toplum 5.0'a. *Endüstri 4.0 Platformu*
- Kestane, A. (2021). İç denetimde akıllı otomasyon teknolojilerinin kullanımı: robotik süreç otomasyonu ve bilişsel zeka. *Journal of Accounting and Taxation Studies, 14(2)*, 813-835.
- Kılıç, S. & Alkan R. M. (2018). Dördüncü sanayi devrimi endüstri 4.0: Dünya ve Türkiye değerlendirmeleri. *Girişimcilik İnovasyon ve Pazarlama Araştırmaları Dergisi, 2*, s.29-49.
- Koç, E., Şenel, M. C., & Kaya, K. (2018). Dünyada ve Türkiye'de sanayileşme I-strateji ve temel sanayileşme sorunları. *Mühendis ve Makine, Cilt No. 59*.
- Koç, Ş. (2020). *Dördüncü sanayi devriminin (endüstri 4.0) dünyaya ve Türkiye'ye ekonomik yansımaları*. [Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi] Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi. (Tez No: 642095).
- Kökhan, S., & Özcan, U. (2018). 3D yazıcıların eğitimde kullanımı. *Bilim Eğitim Sanat ve Teknoloji Dergisi, 2(1)*, 80-85.
- Korkmaz, E., & Doğan, Y. (2023). Denetim ve robotik süreç otomasyonu: uygulanma sürecindeki engeller. *Güncel Gelişmeler Ekseninde Muhasebe ve Denetim*, 189.
- Korkmaz, S., & Gedik, Ö. (2020). Endüstri 4.0'ın sağlık sektörüne etkisinde demografik özelliklerin düzenleyici rolü. *Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 38(4)*, 743-776.
- Krugman, P. R. (1999). *The return of depression economics*. WW Norton & Company.
- Kumaş, E., & Erol, S. (2021). Endüstri 4.0'da anahtar teknoloji olarak dijital ikizler. *Politeknik Dergisi, 24(2)*, 691-701.
- Leaders, Y. G. (2016). World economic forum annual meeting 2016 mastering the fourth industrial revolution. In *World Economic Forum: Cologny, Switzerland*.
- Lee, D., Lee, S. H., Masoud, N., Krishnan, M. S., & Li, V. C. (2021). Integrated digital twin and blockchain framework to support accountable information sharing in construction projects. *Automation in construction, 127*, 103688.
- Lei, Y. Li, N. Guo, L. Li, N. Yan, T. & Lin, J. "A review on data-driven prognostics and health management," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 4, pp. 2527–2539, 2017.
- Liu, Y., Cao, Y., Lu, M., Shan, Y., & Xu, J. (2024). Automating efficiency: The impact of industrial robots on labor investment in China. *Economic Modelling, 140*, 106849.
- Manca, S., Caviglione, L. & Raffaghelli, J. E. (2016). Big data for social media learning analytics: potentials and challenges. *Journal of E-Learning and Knowledge Society, 12(2)*, 27-39.
- Masters, K., (2017). The impact of industry 4.0 on the automotive industry [online]. <https://blog.flexis.com/the-impact-of-industry-4.0-on-the-automotive-industry> Erişim Tarihi: 11.01.2025.
- Mehami, J., Nawı, M. & Zhong, R. Y. (2018). Smart automated guided vehicles for manufacturing in the context of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing, 26*, pp. 10077-1086.

- Meissner, H., Ilse R. & Aurich J.C. (2017). "Analysis of control architectures in the context of industry 4.0", *Procedia CIRP*, 62, 165-169.
- Mercimek, A. F., & Geçkil, T. (2021). Endüstri 4.0'ın lojistik sektörüne uygulanması: Lojistik 4.0. *Five Zero*, 1(1), 57-77.
- Mil, B., & Dirican, C. (2018). Endüstri 4.0 teknolojileri ve turizme etkileri. *Disiplinlerarası Akademik Turizm Dergisi*, 3(1), 1-9.
- Morrar, R., Arman, H., & Mousa, S. (2017). The fourth industrial revolution (Industry 4.0): A social innovation perspective. *Technology innovation management review*, 7(11), 12-20.
- Nunes, M. L., Pereira, A.C. & Alves, A.C. (2017). Smart products development approaches for Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 13, pp. 1215–1222.
- Öncül, M., & Ateş, V. (2020). İşletmelerin akıllı üretim modeline geçiş sürecinde karşılaştıkları sorunların belirlenmesi. *Organizasyon ve Yönetim Bilimleri Dergisi*, 12(2), 116-132.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2017). *The next production revolution implications for governments and business*. Paris: OECD Publishing.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2013a). *Exploring data-driven innovation as a new source of growth: mapping the policy issues raised by "bigdata"*. Paris: OECD Publishing.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2013b). *Beyond industrial policy: emerging issues and new trends*, Paris: OECD Publishing.
- Osman, F. (2019). Türkiye Demir Çelik Sektörü Rekabeti ve Endüstri 4.0. *Journal of Transportation and Logistics*, 4(2), 91-106.
- Özdem, H., & Bora, M. P. (2022). Türkiye'de robotik süreç otomasyonu. *Bilgisayar Bilimleri ve Teknolojileri Dergisi*, 3(1), 1-9.
- Özdemir, Ö., & Özdemir, E. G. (2019). Endüstri 4.0 ve yiyecek içecek işletmelerindeki yansımaları. *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Turizm Fakültesi*, 87.
- Özdemir, A., & Özgüner, M. (2018). Endüstri 4.0 ve lojistik sektörüne etkileri: Lojistik 4.0. *İşletme ve İktisat Çalışmaları Dergisi*, 6(4), 39-47.
- Özdoğan, O. (2018). *Endüstri 4.0: dördüncü sanayi devrimi ve endüstriyel dönüşümün anahtarları*. 2. Baskı. İstanbul: Pusula.
- Özen, A. & Gürel, F.N. (2020). "Kamu denetiminde dijital dönüşüm: dijital ikiz yöntemi", *İzmir Sosyal Bilimler Dergisi*, 2(1), 16-23.
- Özer, G. (2020). Eklemeli üretim teknolojileri üzerine bir derleme. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 606-621.
- Özgüner, Z. (2022). Eklemeli imalat sistemlerinin endüstri 4.0 kapsamında uygulamaları. *Multidisipliner Yaklaşımlarla Endüstri 4.0*, 121.
- Özsoy, K., & Duman, B. (2017). Eklemeli imalat (3 boyutlu baskı) teknolojilerinin eğitimde kullanılabilirliği. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 1(1), 36-48.
- Özsoylu, A. F. (2017). Endüstri 4.0. *Çukurova Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 21(1), 41-64.
- Öztuna, B. (2017). *Endüstri 4.0 (dördüncü sanayi devrimi) ile çalışma yaşamının geleceği*. 1. Basım, Ankara: Gece Kitaplığı.

- Öztürk, G.B. (2021). "Digital twin research in the AECO-FM industry", *Journal of Building Engineering*, 40, 102730
- Parmar, R., Leiponen, A. & Thomas, L.D. (2020). Building an organizational digital twin. *Business Horizons*, 63(6), 725-736.
- Pereira, V., Basilio, M. P., & Santos, C. H. T. (2025). PyBibX—a Python library for bibliometric and scientometric analysis powered with artificial intelligence tools. *Data Technologies and Applications*, 59(2), 302-337. <https://doi.org/10.1108/DTA-08-2023-0461>
- Petekçi, A. R. (2021). Endüstri 4.0: fırsat mı tehlike mi?. *Bilgisayar Bilimleri ve Teknolojileri Dergisi*, 2(1), 7-15.
- President's Council of Advisors on Science and Technology (2011). *Report to the president on ensuring American leadership in advanced manufacturing*. President's Council of Advisors on Science and Technology, Executive Office of the President, Washington, DC.
- Saloni Dattani, Lucas Rodés-Guirao, Hannah Ritchie, Esteban Ortiz-Ospina, ve Max Roser (2023). *Life Expectancy*. <https://ourworldindata.org/life-expectancy> Erişim tarihi: 15/01/2025
- Royal Museums Greenwich: What is Greenwich Mean Time? How did local clock time in Greenwich, London change the world?. (Çevrimiçi) <https://www.rmg.co.uk/stories/topics/greenwich-mean-time-gmt> , Erişim Tarihi: 15.01.2025.
- Sabancı Üniversitesi. (2017). *Sanayide dijitalleşme çalıştay taslak rapor*. Sabancı Üniversitesi, İstanbul.
- Sağtaş, S. (2021). Endüstri 4.0'in dijital pazarlamaya etkileri. *Tarsus Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Fakültesi Dergisi*, 1(1), 51-66.
- Şahin, N. N., & Yağcı, P. (2017). Endüstri 4.0 kapsamında prosumer kavramının yiyecek içecek sektörü açısından değerlendirilmesi. *Journal of Recreation and Tourism Research*, 4(Special Issue 1), 12-22.
- Salgues, B. (2018). *Society 5.0: industry of the future, technologies, methods and tools*. USA: Wiley.
- Santos, M.Y., Sa, J. O., Andrade, C., Lima, F. V., Costa, E., Costa, C., Martinho, B. & Galvao, J. (2017). A Big Data system supporting Bosch Braga Industry 4.0 strategy. *International Journal of Information Management*, 37, pp. 750–760.
- Sarıkulak, Ö. (2018). *Endüstri devrimlerinin performans göstergelerine etkilerinin incelenmesi ile endüstri 4.0 analizi*. [Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi] Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi. (Tez No: 519504).
- Sarısoy, İ. (2017). Araştırma-geliştirme faaliyetlerinde Türkiye'nin konumu ve geleceği: genel bir değerlendirme ve öneriler. *Maliye Dergisi*.
- Say, C. (2021a). *50 Soruda Yapay Zeka*. İstanbul: Bilim ve Gelecek Kitaplığı.
- Say, C. (2021b). *Yeni dünya yeni ağ: bilgi biliminin bakışıyla evren, hayat ve insanlığın yükselişi*. 7. Baskı. İstanbul: Destek Yayınları.
- Sayer, S., & Ülker, A. (2014). Ürün yaşam döngüsü yönetimi. *Engineer & The Machinery Magazine*, (657).
- Schwab, K. (2016). *Dördüncü sanayi devrimi*, İstanbul: Optimist Yayın Grubu

- Şekkeli, Z. H., & Bakan, İ. (2018). Akıllı fabrikalar. *Journal of Life Economics*, 5(4), 203-220.
- Şendoğdu, A. Aslan (2020). Endüstri 4.0 devriminde robotik kaynaklar yönetimi bağlamında insan kaynakları yönetiminde yeni açılımların kaçınılmazlığı, *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 34(1): 168-184.
- Şentürk, H., Çil, Z. C. & Sağıroğlu, Ş. (2013). *Siber güvenliğin taarruzi boyutu ve uluslararası hukuk kurallarının uygulanabilirliği*. 6. Uluslararası Bilgi Güvenliği ve Kriptoloji Konferansı Bildiri Kitabı, 20-21 Eylül 2013, Ankara.
- Sezer, F. (2018, April). Endüstri 4.0'ın gıda kıtlığı sorununa olası etkileri. In *Proceedings of 4 th SCF International Conference on "Economics and Social Impacts of Globalization" and "Future Turkey-European Union Relations"* (p. 181).
- Shengli, W. (2021). Is human digital twin possible?. *Computer Methods and Programs in Biomedicine Update*, 1, 100014.
- Shi, W. J. Cao, Q. Zhang, Y. Li, & L. Xu (2016), "Edge computing: Vision and challenges," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, no. 5, 637–646.
- Singh, S., Weeber, M. & Birke, K. P. (2021). "Advancing digital twin implementation: a toolbox for modelling and simulation", *Procedia CIRP*, 99, 567-572.
- Soba, M., ve Akar, E. (2021). Endüstri 4.0 uygulamalarının üretim süreçlerine etkisi. *Dumlupınar Üniversitesi İİBF Dergisi*, (8), 116-129.
- Sony, M., & Naik, S. (2020). Key ingredients for evaluating Industry 4.0 readiness for organizations: a literature review. *Benchmarking: An International Journal*, 27(7), 2213-2232.
- Sözen, M. & Mescioğlu, T. (2019). Endüstri 4.0'ın itici güçlerinin Türkiye ve Çin üzerindeki etkileri. *International Journal of Social Inquiry*, 12(1), 287-315.
- Suman, N. (2017). Akıllı üretim çağı: Endüstri 4.0. Mart, 18.
- Sung, T. K. (2018). Industry 4.0: a Korea perspective. *Technological forecasting and social change*, 132, 40-45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2017.11.005>
- Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli imalat (3b baskı): teknolojiler ve uygulamalar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 373-392.
- T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı (2018). *İmalat sanayinin dijital dönüşümü raporu ve yol haritası*
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2020). *Faaliyet Raporu*, <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-yayinlar-faaliyet-raporlari>
- Tao, F., Qi, Q., Wang, L., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twins and cyber–physical systems toward smart manufacturing and industry 4.0: Correlation and comparison. *Engineering*, 5(4), 653-661.
- Taş, H. Y. (2018). Dördüncü sanayi devriminin (endüstri 4.0) çalışma hayatına ve istihdama muhtemel etkileri. *OPUS International Journal of Society Researches*, 9(16), 1817-1836.
- Taş, H. Y., & Köse, A. (2023). Endüstri 4.0'ın istihdama etkileri. *TURAN: Stratejik Araştırmalar Merkezi*, 15(60), 36-44.
- Tekin, M., Etlioğlu, M., & Tekin, E. (2018). Endüstri 4.0 ve lojistik trendler. In *Conference: 4. Uluslararası Sosyal Beşeri ve İdari Bilimler Sempozyumu*.
- TOGG: "Bir Fabrikadan Daha Fazlası", (Çevrimiçi)

- Toker, K. (2018). Endüstri 4.0 ve sürdürülebilirliğe etkileri. *İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi İşletme İktisadi Enstitüsü Yönetim Dergisi*, 29(84), 51-64.
- Toksoy, M. (2019). Moore yasası, teknolojik tekillik ve prekarya. *14. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi. İzmir: Türkiye.*
- Tolio, T., Copani, G. & Terkaj, W. (2019). *Factories of the future the Italian flagship initiative*, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG.
- Tonga, M. Y., & Tonga, M. (2022). Endüstri 4.0’A genel bir bakış: Sanayinin geleceği. *GÜ İslahiye İİBF Uluslararası E-Dergi*, 6(6), 40-60.
- TÜİK : “Hayat Tabloları, 2017-2019”, 2020b, <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Hayat-Tablolari-2017-2019-33711>
- TÜİK : “Ölüm ve Ölüm Nedeni İstatistikleri, 2019”, 2020c, <https://www.tuik.gov.tr/>, Erişim Tarihi: 15.01.2025
- TÜİK : “Türkiye İstatistik Kurumu”, 2020a, (Çevrimiçi) <https://www.tuik.gov.tr/>, Erişim Tarihi: 15.01.2025.
- Türedi, A. T., & Bircan, D. A. (2016). Endüstriyel robotik otomasyon sistemlerinde görülen hataların ve sistem güvenilirliğinin hata türleri ve etkileri yöntemi ile analizi. *Mühendis ve Makina*, 57(672), 56-61.
- Turgut, B. (2024). Endüstri 4.0 için SWOT Analizi. *Politik Ekonomik Kuram*, 8(3), 863-877.
- Turgut, M. (2024). Tarım-gıda tedarik zincirinde endüstri 4.0 teknolojilerinin lojistik faaliyetler sürecinde kullanımı. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 12(11), 1968-1980.
- Türkel, S., & Yeşilkuş, F. (2020). Dijital dönüşüm paradigması: endüstri 4.0. *Avrasya Sosyal ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 7(5), 332-346.
- Türkiye Elektrik İletim A. Ş. (2020). *TEİAŞ Faaliyet Raporu*, <https://www.teias.gov.tr/faaliyet-raporlari>
- TÜSİAD (2016). Türkiye’deki Dijital Değişime CEO Bakışı. <https://tusiad.org/tr/yayinlar/raporlar/item/8867-tu-rkiye-deki-dijital-deg-is-ime-ceo-bakis-i-raporu> Erişim tarihi. 15.01.2025
- Tutar, H., Terzi, D., & Tınmaz, G. (2018). Türkiye’nin “vizyon 2023” stratejisi ile Almanya’nın “2025” stratejik hedeflerinin endüstri 4.0 göstergeleri itibariyle karşılaştırılması. *International Journal of Entrepreneurship and Management Inquiries*, 2(3), 195-212.
- Ülgen, B. & Yavuz, N., (2021). *Yapay zekâ ile liderliğin dönüşümü, yapay zekâ: güncel yaklaşımlar ve uygulamalar*; 1.Baskı Mart 2021, Beta Kitap
- Ulusoy, G. (2018). İmalat sektöründe Endüstri 4.0 dönüşümü çabaları: bazı gözlemler. *İktisat ve Toplum*, 8(92), 121-123.
- Ulusoy, Gündüz; Kılıç, Kemal; Özlü, Emre; Altekin, Fatma Tevhide; Çatay, Bülent; Budak, Erhan; Pasin, Merih; Karaata, Enver Selçuk & Varandı, Siamak (2017) *Sanayide Dijitalleşme Stratejileri Çalıştayı - Taslak rapor* Sabancı Üniversitesi. <https://research.sabanciuniv.edu/id/eprint/34507>
- Ünver, M., Canbay, C., Mirzaoğlu, B. & Gül, A. (2009). *Siber güvenliğinin sağlanması: Türkiye'deki mevcut durum ve alınması gereken tedbirler*. Ankara: Bilgi Teknolojileri ve Koordinasyon Dairesi Başkanlığı.

- Uslu, B. Ç. (2023) IoT uygulamalarında çok etmenli sistemlerin (MAS) birlikte çalışabilirliğinin rolü: Akıllı üretim sistemlerindeki son gelişmeler üzerine bir araştırma. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38(2), 1279-1298.
- Uyar, A. (2018). Made In China 2025 Stratejisi, <https://hbrturkiye.com/blog/made-in-china-2025-stratejisi>, Erişim Tarihi: 10.01.2025.
- Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2007, March). VOS: A new method for visualizing similarities between objects. In *Advances in Data Analysis: Proceedings of the 30th Annual Conference of the Gesellschaft für Klassifikation eV, Freie Universität Berlin, March 8–10, 2006*, 299-306. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). *VOSviewer: a computer program for bibliometric mapping*. *Scientometrics*. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Wang, Shiyong., Wan, Jiafu. & Zhang J., Chunhua (2016). “Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination”, *Computer Networks*, 101, 2016: 158-168.
- Weber Shandwick : AI-Ready or Not: Artificial Intelligence Here We Come!, (Çevrimiçi) <https://www.webershandwick.com/uploads/news/files/AI-ready-or-Not-report-Oct12-FINAL.pdf>, Erişim Tarihi: 11.01.2025.
- White House Office of Science and Technology Policy. (2016). *The national artificial intelligence research and development strategic plan*; White House, Washington DC.
- Worth, D. (2010). Introduction to Modern Information Retrieval, 3rd Edition. *Australian Academic & Research Libraries*, 41(4), 305–306. <https://doi.org/10.1080/00048623.2010.10721488>
- Xu, L. D., Xu, E. L., & Li, L. (2018). Industry 4.0: state of the art and future trends. *International journal of production research*, 56(8), 2941-2962.
- Yankın, F. B. (2019). Dijital dönüşüm sürecinde çalışma yaşamı. *Trakya Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi E-Dergi*, 7(2), 1-38.
- Yazıcı, E. & Düzkaya, H. (2016). Endüstri devriminde dördüncü dalga ve eğitim: Türkiye dördüncü dalga endüstri devrimine hazır mı?. *Eğitim ve İnsani Bilimler Dergisi: Teori ve Uygulama*, 7 (13), ss. 49-88
- Yiğit, E. (2024). *Yapay zeka metotları ile iş süreçlerinde robotik süreç otomasyonu uygulaması*. [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi] Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi. (Tez No:858037)
- Yiğitol, B., & Sarı, T. (2020). Küresel salgınlar ile mücadelede endüstri 4.0 teknolojilerinin rolü. *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (41), 53-73.
- Yıldırım, Y. (2019). Endüstri 4.0'a kapsamlı bir bakış: 2011'den bugüne. *Bilgi Dünyası*, 20(2), 217-249.
- Yıldırım, Y. (2020). Farklı Disiplinlerde Endüstri 4.0. *OPUS International Journal of Society Researches*, 15(21), 756-789.
- Yıldız, A. (2018). Endüstri 4.0 ve akıllı fabrikalar, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22 (2), 546-556.
- Yıldız, M. & Yıldırım B. F. (2018). “Yapay zekâ ve robotik sistemlerin kütüphanecilik mesleğine olan etkileri”, *Türk Kütüphaneciliği*, 32 (1).

- Yılmaz, A. (2019). Almanya ve Endüstri 4.0. *Moment-Expo Dergisi, Sayı.70*
- Yılmaz, S., & Sağiroğlu, Ş (2013). *Siber güvenlik risk analizi, tehdit ve hazırlık seviyeleri*. 6. Uluslararası Bilgi Güvenliği ve Kriptoloji Konferansı Bildiri Kitabı, 20-21 Eylül 2013, Ankara.
- Yousuf, O. & Mir, R.N. (2019). “A survey on the internet of things security: state-of-art, architecture, issues and countermeasures”. *Information & Computer Security, 27* (2), 292- 323.
- Yücebalkan, B. (2020). Endüstri 4.0’den endüstri 5.0’a geçiş sürecine genel bakış. *PEARSON JOURNAL, 5*(9), 241-250.
- Yükçü, S., Aydın, Ö., & Koçakoğlu, Ü. Ö. (2020). Bağımsız Denetimde Dijital İkiz Uygulaması. *Financial Analysis/Mali Çözüm Dergisi, 30*(161).
- Yüksekbilgili, Z., & Çevik, G. Z. (2018). Endüstri 4.0 bağlamında Türkiye’nin yerine ilişkin güncel ve gelecek eksenli bir analiz. *Finans Ekonomi ve Sosyal Araştırmalar Dergisi, 3*(2), 422-436.
- Zhang, J., & Luo, Y. (2017). Degree Centrality, Betweenness Centrality, and Closeness Centrality in Social Network. *Proceedings of the 2nd International Conference on Modelling, Simulation and Applied Mathematics (MSAM2017)*. <https://doi.org/10.2991/msam-17.2017.68>
- Zheng, T., Ardolino, M., Bacchetti, A., & Perona, M. (2021). The applications of Industry 4.0 technologies in manufacturing context: a systematic literature review. *International journal of production research, 59*(6), 1922-1954.
- Zhu, Z., Xi, X., Xu, X. & Cai, Y. (2021). “Digital twin-driven machining process for thin-walled part manufacturing”, *Journal of Manufacturing Systems, 59*, 453-466.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ferhat YILMAZ
Uyruğu : TC

EĞİTİM

Derece	Adı	Bitirme Yılı
Üniversite	: Gazi Üniversitesi	1999
Yüksek Lisans:	Selçuk Üniversitesi	2007
Doktora	: Hasan Kalyoncu Üniversitesi	2025

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2022-2024	Alpaslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi	İngilizce Öğretim Görevlisi
2020-2021	Hasan Kalyoncu Üniversitesi	İngilizce Öğretim Görevlisi
2013-20116	American College of the Middle East	İngilizce Öğretim Görevlisi
2005-2013	Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi	İngilizce Öğretim Görevlisi
2004-2005	Selçuk Üniversitesi	İngilizce Öğretim Görevlisi
2000-2004	Gaziantep Üniversitesi	İngilizce Öğretim Görevlisi
1999-2000	Erciyes Üniversitesi	İngilizce Öğretim Görevlisi

UZMANLIK ALANI

İngiliz Dili Eğitimi
İşletme

YABANCI DİLLER

İngilizce, Almanca, Arapça

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

YAYINLAR

- Investigating The Impact of Applied Orientation Training in Foreign Language Schools on Instructors' Job Performance – Springer Nature (Q4)
- Scholarships as Equity and Quality in Higher Educational Institutions, September 2016 ENIRDELM International Conference

- **An Institutional Perspective into Professional Development of English Teachers: A Case of Schools OF Foreign Languages, Globelt, 2016, Elsevier Journal.**
- **Competency Levels of Preschool Children in the Use of Adjectives and Adverbs Throughout the First Language Acquisition Process; 6th International Congress of Teaching of Turkish, Niğde University, 2013**
- **Poster Presentation in 4th ELT Students' Conference, Çukurova University, 2013**

