MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BASIM SANAYİSİNDE ENDÜSTRİ 4.0 TEKNOLOJİLERİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİR ÜRETİME ETKİLERİ

HALİL YEKİN GÜZEL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mekatronik Anabilim Dalı
Mekatronik Programı

DANIŞMAN
Doç. Dr. Mustafa Batuhan KURT

İSTANBUL, 2024

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BASIM SANAYİSİNDE ENDÜSTRİ 4.0 TEKNOLOJİLERİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİR ÜRETİME ETKİLERİ

HALİL YEKİN GÜZEL
(526222981)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mekatronik Anabilim Dalı
Mekatronik Programı

DANIŞMAN
Doç. Dr. Mustafa Batuhan KURT

İSTANBUL, 2024

ÖNSÖZ

Günümüzde teknolojik gelişmeler, endüstriyel süreçleri kökten değiştirmekte ve yeni bir sanayi devrimine yol açmaktadır. Bu devrim, "Endüstri 4.0" olarak adlandırılan dönemi başlatmıştır. Bu bağlamda, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde gerçekleştirdiğim tez çalışması, basım sanayisinde Endüstri 4.0 teknolojilerinin sürdürülebilir üretime olan etkilerini incelemektedir.

Bu tez çalışması, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde geçirdiğim süre zarfında edindiğim bilgi ve deneyimlerin bir yansımasıdır. Bu süreçte değerli bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan ve destekleyen danışmanım saygıdeğer Doç. Dr. Mustafa Batuhan KURT hocama ve öğretim elemanı meslektaşlarım Öğr. Gör. Erdem ŞANLI ve Öğr. Gör. Merve ARAÇ hocalarıma tezin araştırma ve hazırlık sürecinde verdikleri desteklerden ötürü içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, tez çalışmamın gerçekleşmesinde katkıda bulunan herkese ve bu süreçte beni motive eden ailem, eşim ve kızıma şükranlarımı sunarım.

Umarım bu tez çalışması, basım sanayisinde Endüstri 4.0'ın sürdürülebilir üretime olan etkilerini anlamak isteyen araştırmacılar, endüstri profesyonelleri ve akademisyenler için bir kaynak olacaktır.

Mart, 2024 **Halil Yekin GÜZEL**

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ i
İÇİNDEKİLER ii
ÖZET v
ABSTRACT vi
KISALTMALAR vii
ŞEKİL LİSTESİ viii
TABLO LİSTESİ ix
1. GİRİŞ 1
2. GENEL TANIMLAR VE KAVRAMSAL ÇERÇEVE 5
2.1. Endüstri 4.0 Kavramı 6
2.1.1. Endüstri 4.0 teknolojileri 8
2.1.1.1. Siber-fiziksel sistemler (SFS) 9
2.1.1.2. Nesnelerin interneti (IoT) 13
2.1.1.3. Hizmetlerin interneti (IoS) 14
2.1.1.4. Akıllı fabrika (smart factory) 15
2.1.2. Endüstri 4.0'ın temel prensipleri 16
2.1.2.1. Gerçek zamanlı veri analitiği 17
2.1.2.2. Esnek ve akıllı üretim 19
2.1.2.3. İnsan - makine iş birliği 20
2.1.2.4. Yapay zekâ ve makine öğrenimi 21
2.1.2.5. Otonom karar verme 22
2.1.2.6. Sanal simülasyon 23
2.1.3. Endüstri 4.0'ın getirdiği avantajlar 24
2.1.3.1. Verimlilik artışı 24
2.1.3.2. İyileştirilmiş ürün kalitesi 25
2.1.3.3. Esnek üretim 26
2.1.4. Endüstri 4.0 uygulama zorlukları 27
2.1.4.1. Yönetimsel Endüstri 4.0 uygulama zorlukları 28
2.1.4.2. Teknolojik Endüstri 4.0 uygulama zorlukları 28
2.2. Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri ve Sürdürülebilir Üretim Kavramı 29
2.2.1. Atık yönetimi 30

2.2.2. Çevresel etkilerin azaltılması 33
2.2.3. Kurumsal sosyal sorumluluk 36
2.2.4. İnovasyon ve teknoloji 38
2.3. Endüstri 4.0 Uygulamalarının Sürdürülebilirlik Hedeflerine Katkıları 40
2.3.1. Endüstri 4.0 ve toplumsal etkileri 42
2.3.2. Endüstri 4.0 ve ekonomik etkileri 42
2.3.3. Endüstri 4.0 ve çevresel etkileri 45
2.4. Basım Sanayisindeki Mevcut Durum 46
2.4.1. Baskı teknolojileri 47
2.4.1.1. Ofset baskı 48
2.4.1.2. Flekso baskı 49
2.4.1.3. Gravür baskı 51
2.4.1.4. Serigrafi baskı 52
2.4.1.5. Dijital baskı 54
2.4.2. Baskı teknolojilerindeki gelişmeler 55
2.4.2.1. Akıllı matbaa dijital inovasyonları 55
2.4.2.2. Baskı üretim süreçlerinin uzaktan izlenmesi 60
2.4.2.3. Özelleştirme ve kişiselleştirme eğilimi 61
2.4.2.4. Zorluklar ve fırsatlar 61
2.5. Basım Sanayisinde Endüstri 4.0 Teknolojileri 62
2.5.1. Otomasyon ve verimlilik 62
2.5.2. Esneklik ve özelleştirme 63
2.5.3. Kalite kontrolü 64
2.5.4. Bakım yönetimi 65
2.6. Basım Sanayisinde Sürdürülebilir Üretim 66
2.6.1. Basım sanayisinde sürdürülebilir üretimin etkileri 67
2.6.1.1. Çevresel faydaları 68
2.6.1.2. Ekonomik faydalar 70
2.6.1.3. Toplumsal ve sosyal faydalar 72
2.6.2. Basım sanayisinde sürdürülebilir üretim çözüm yöntemleri 74
2.6.2.1. Geri dönüşüm ve geri kazanım 74
2.6.2.2. Enerji tasarrufu ve enerji verimliliği 77
2.6.2.3. Kaynak ve atık yönetimi 78
2.6.2.4. Baskı sektöründe sürdürülebilir müşteri etkileşimi 79

3. MATERYAL VE YÖNTEM 81
3.1. Literatür Taraması 81
3.2. Doküman Analizi 82
3.2.1. Seçilen dokümanlar 83
3.2.2. İçerik analizi 83
3.3. Veri Toplama 84
3.3.1. Endüstri 4.0 teknolojilerinin belirlenmesi 84
3.3.2. Basım sanayisine özgü verilerin toplanması 84
3.4. Metodolojik Çerçeve 85
3.5. Analiz Süreci 86
4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR 87
4.1. Tartışma 87
4.2. Sonuçlar 93
KAYNAKLAR 97

ÖZET

BASIM SANAYİSİNDE ENDÜSTRİ 4.0 TEKNOLOJİLERİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİR ÜRETİME ETKİLERİ

Bu çalışma, basım sanayisinde Endüstri 4.0 teknolojilerinin sürdürülebilirlik hedeflerine olan olumlu ve olumsuz etkilerini inceleyerek, bu süreçlerde karşılaşılan zorluklara yönelik alınabilecek önlemleri belirlemeyi amaçlamaktadır. Ayrıca, elde edilen verilerle Endüstri 4.0 teknolojilerinin sürdürülebilir üretim açısından etkilerini değerlendirmeyi hedeflemektedir. Bu araştırma kapsamında çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik hedeflerine yönelik etkileri doküman analizi metoduyla incelenerek Endüstri 4.0 teknolojilerinin basım sanayisinde sürdürülebilirliğin önemli üç boyutuna yaptığı katkılar değerlendirilmiştir. Basım sanayisinde Endüstri 4.0 teknolojileri ile güçlü sürdürülebilir hedeflere giden yol haritasını geliştirmek için, bilgilerin doğruluğuna ilişkin hataları en aza indirmeyi amaçlayan atıf yöntemi olarak sistematik literatür taraması metodu ile yapılan araştırma ve incelemelerden ulaşılan verilerin güvenilir olması, zaman ve emek tasarrufu ve ilgili araştırma konusu hakkında daha fazla bilgi edinilmesi sağlanmıştır.

Bulgular, Endüstri 4.0 teknolojilerini kullanarak farklı düzeylerde sürdürülebilirlik iyileştirme fırsatlarını belirlemede literatürün hala sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır. Sektörlerin geneli için yeterli düzeyde veri ortaya konulamazken basım endüstrisi içinde Endüstri 4.0 teknolojileri ile sürdürebilirliğin sağlanması, kolaylaştırılması ve geliştirilebilmesinin mümkün olup olmadığı sorusunun mevcut literatür ile kapsamlı bir şekilde ele almak yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle araştırmada Endüstri 4.0 teknolojilerini ve bunların sürdürülebilir üretim üzerindeki potansiyel etkilerini inceleyerek, basım sanayisi üretim süreçlerinde konvansiyonel sistemler ile Endüstri 4.0 teknolojilerinin karşılaştırılma analizleri sunulmuştur.

Bu tez, basım müesseselerinde sürdürülebilirlik hedeflerini inceleyerek, toplumsal, çevresel ve ekonomik değerleri Endüstri 4.0 verileriyle değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Tez, ilgili literatüre katkı sağlamayı hedefleyerek, Endüstri 4.0'ın bu üç temel boyutta sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini analiz etmektedir.

Mart, 2024 **Halil Yekin GÜZEL**

ABSTRACT

EFFECTS OF INDUSTRY 4.0 TECHNOLOGIES ON SUSTAINABLE PRODUCTION IN PRINTING INDUSTRY

This study aims to examine the positive and negative effects of Industry 4.0 technologies on sustainability goals in the printing industry and to determine the measures that can be taken for the difficulties encountered in these processes. It also aims to evaluate the effects of Industry 4.0 technologies in terms of sustainable production with the data obtained. Within the scope of this research, the contributions of Industry 4.0 technologies to the three important dimensions of sustainability in the printing industry were evaluated by examining their effects on environmental, economic and social sustainability goals through document analysis method. In order to develop a road map to strong sustainable goals with Industry 4.0 technologies in the printing industry, the data obtained from the research and examinations carried out with the systematic literature review method as a citation method aiming to minimize errors regarding the accuracy of the information are reliable, saving time and labor and obtaining more information about the relevant research topic.

The findings reveal that the literature is still limited in identifying sustainability improvement opportunities at different levels using Industry 4.0 technologies. It is insufficient to comprehensively address the question of whether it is possible to ensure, facilitate and improve sustainability with Industry 4.0 technologies within the printing industry while there is not enough data for the sectors in general with the existing literature. For this reason, in this research, by examining Industry 4.0 technologies and their potential effects on sustainable production, comparative analyses of conventional systems and Industry 4.0 technologies in printing industry production processes are presented.

This thesis aims to evaluate social, environmental and economic values with Industry 4.0 data by examining sustainability goals in printing establishments. The thesis aims to contribute to the related literature and analyses the effects of Industry 4.0 on sustainability in these three main dimensions.

March, 2024 **Halil Yekin GÜZEL**

KISALTMALAR

AI : Yapay Zekâ (Artificial Intelligence)

API : Uygulama Programlama Ara yüzleri (Application Programming Interfaces)

AR : Artırılmış Gerçeklik (Augmented Reality)

BDA : Büyük Veri Analitiği (Big Data Analytics)

BM : Birleşmiş Milletler

CBDDO : Cumhurbaşkanlığı Dijital Dönüşüm Ofisi

CE : Avrupa'ya uygunluk (Conformité Européenne)

CO_2 : Karbondioksit

CVORR : Karmaşık Değer Optimizasyonu (Complex Value Optimization)

ERP : Kurumsal Kaynak Planlama (Enterprise Resource Planning)

GSYİH : Gayri Safi Yurt İçi Hasıla

I4.0 : Endüstri 4.0

IoS : Hizmetlerin İnterneti (Internet of Services)

IoT : Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)

KOBİ : Küçük ve Orta Ölçekli İşletmeler

KSS : Kurumsal Sosyal Sorumluluk

MES : Üretim Yönetim Sistemi (Manufacturing Execution System)

MSW : Kentsel Katı Atıklar (Municipal Solid Waste)

SFS : Siber-Fiziksel Sistemler

SKH : Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri

TPS : Touchpoint Sustainability

VOC : Uçucu Organik Bileşik (Volatile Organic Compound)

VR : Sanal Gerçeklik (Virtual Reality)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Endüstrinin tarihsel gelişimi 6

Şekil 2.2. Siber-fiziksel sistem mimarisi 9

Şekil 2.3. Nesnelerin İnterneti (IoT) 13

Şekil 2.4. Akıllı fabrika (smart factory) bileşenleri 16

Şekil 2.5. Sürdürülebilir kalkınma için küresel amaçlar 29

Şekil 2.6. CVORR çerçevesi 32

Şekil 2.7. Karbon yakalama teknolojileri 36

Şekil 2.8. Yıllık ve tahmini dünya nüfusu ve enerji talebi 37

Şekil 2.9. Döngüsel ekonomi stratejileri 43

Şekil 2.10. Temel baskı yöntemleri 47

Şekil 2.11. Ofset baskı tekniği sistemi 48

Şekil 2.12. Flekso baskı tekniği sistemi 50

Şekil 2.13. Gravür baskı tekniği sistemi 52

Şekil 2.14. Serigrafi baskı tekniği sistemi 53

Şekil 2.15. Sürdürülebilir üretim süreçleri 74

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. Endüstri 4.0 uygulama zorlukları 8

Tablo 2.2. Endüstri 4.0 temel teknolojileri ve açıklamaları..... 17

Tablo 2.3. Üretim paradigmalarının evrimi 30

Tablo 2.4. Endüstri 4.0 perspektifinde sürdürülebilirlik konuları 42

Tablo 2.5. Endüstri 4.0'ı ele alan makalelerde ekonomik hususlar 44

Tablo 2.6. Basım sanayisinde sürdürülebilir üretim önlemleri..... 67

Tablo 2.7. Basım sanayisinde sürdürülebilir üretimin etkileri..... 68

Tablo 2.8. Basım sanayisinde oluşan baskı atıkları 78

Tablo 4.1. Yeni teknolojilerin motivasyon ve etki alanları 88

1. GİRİŞ

İnsan nüfusunun sürekli artmasıyla kentleşme ve sanayileşme sürecinde kaynakların kontrolsüz kullanımı ve tüketim alışkanlıkları sera etkisiyle birlikte ozon tabakası aşınımı gibi çevre sorunlarına neden olmaktadır. Sürdürülebilirliğin temelini teşkil eden çevre, ekonomi ve sosyal faktörler ile ilgili gerçekleştirilecek her eylem planlamasında dünyanın ve tüm canlıların geleceği de düşünülmelidir. Dolayısıyla sürdürülebilirlik kavramı hayatımızın her aşamasında unutulmaması ve dikkat edilmesi gereken hususlardandır (Thomas, 1992).

Son dönemlerde sıklıkla kullanılmaya başlanan Endüstri 4.0 (I4.0) kavramı ve teknolojilerinin, endüstriyel üretimde sürdürülebilirliğin sağlanmasında önemli bir rol oynaması beklenmektedir. Ancak Endüstri 4.0 ile birlikte birçok ekonomik ve sosyal değişim de gerçekleşmektedir. Endüstri 4.0 çağında üretim yapan kurum ve kuruluşların ana amacı, iletişimsel, bilgisel ve akılcılık yöntemleriyle sürdürülebilir üretimde esneklik ile verimliliğin artırılması ve uzun süreli rekabet edebilmelerini geliştirerek güçlendirmek olmalıdır (Gabriel ve Pessl, 2016). I4.0 teknolojileri ile dijitalleşme, yapay zekâ (AI), endüstriyel nesnelerin interneti (IoT) ve benzeri teknolojilerden yararlanarak, faaliyetlerini sürdürülebilir bir şekilde gerçekleştirme amacı için farklı teknolojilerden oluşan bir araç olarak kullanılabilir. Bu teknolojiler, üretim süreçlerinde büyük verimlilik artışları sağlarken, küresel sürdürülebilirlik hedeflerini de desteklemektedir. Bu bakış açısı ile verimlilik artışı neticesinde mevcut sorunlardan ekonomiye yönelik çözümlerin kolaylaştırılması, yalın, şeffaf ve izlenebilirliği yüksek üretim sistem ürünlerinin müşteriye talep ve ihtiyaçlarına göre özelleştirilmesiyle Endüstri 4.0, bütün değer zincirinde olumlu sürdürülebilirlik etkisi yaratmada önemli potansiyele sahiptir (Wagner, 2016).

Bu çalışma, I4.0 teknolojilerinin üretim süreçlerinde kullanılmasıyla elde edilebilecek faydaları ortaya çıkarmayı amaçlayarak, sürdürülebilir kalkınma hedefleri çerçevesinde gerçekleştirilen araştırmayı kapsamaktadır. Özellikle, bu teknolojilerin basım sanayisindeki uygulamalarını inceleyerek, sürdürülebilir üretime katkılarını anlamayı hedeflemektedir. I4.0 teknolojilerinin basım sanayisi üzerindeki etkilerini inceleyen bir çerçevede gerçekleşmektedir. Basım sanayisi, kitaplar, dergiler, gazeteler, ambalaj

malzemeleri ve diğer basılı ürünlerin geniş bir yelpazesini içermekte olan, Endüstri 4.0 teknolojilerinin getirdiği yeniliklerden etkilenen önemli sektörlerden biridir. Araştırmanın odak noktası, Endüstri 4.0 teknolojilerinin basım sanayisindeki uygulamalarının incelenmesi ve bu teknolojilerin sürdürülebilir üretim açısından sağladığı avantajların belirlenmesidir. Ayrıca, bu yeni gelişmelerin potansiyel olumsuz etkilerine karşı alınabilecek önlemleri değerlendirerek, Endüstri 4.0'ın benimsenmesinin sektöre olan etkilerini geniş kapsamlı bir perspektifle ele almaktadır. Elde edilen veriler ışığında, basım sanayisinde uygulanan I4.0 teknolojilerinin sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi planlanmaktadır.

Literatür ile çalışma hayatında Endüstri 4.0 ve sürdürülebilirlik arasındaki bağlantının tartışılması günümüzde yeterli düzeyde değildir (Toker, 2018). Hem I4.0 teknolojileri hem de sürdürülebilir üretim strateji ve teknikleri çok yeni kavramlar olması ve basım sektörü temsilcilerinin bu konular hakkında başlangıç seviye bilgilere sahip olmalarından bu çalışmanın pratik çıkarımı, I4.0 teknolojilerinin üretkenliği nasıl arttırabileceği ve aynı zamanda doğru orantılı olarak sürdürülebilirlik hedeflerini geliştirmeye odaklanmış veriler sunmaktan ibaret olacaktır. Bu çalışmada, Endüstri 4.0 uygulamalarının kullanımıyla dijitalleşme ve veri analizi yöntemlerinin basım sanayisinde sürdürülebilir üretim için nasıl uygulanabileceği ve verimliliği artırma yöntemleri incelenmiştir. Bu araştırma, başlangıçta basım sanayisine odaklanmış olmasına rağmen, elde ettiği bulguların çeşitli sektörlerdeki diğer kurum ve kuruluşlara uyarlanabilir olduğunu göstermektedir. Bu adaptasyon hem ilgili kuruluşların karlılıklarını artırmalarına hem de sürdürülebilirlik hedeflerine yönelik çabalarını güçlendirmelerine katkı sağlayabilir. Sadece baskı endüstrisine özgü etkilerle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda farklı disiplinler arası bilimsel ve teknolojik alanlarda kullanılabilme potansiyeline sahip olan bu çalışma, güncel dijital teknolojilerle uyumlu sürdürülebilir çalışma şartlarının oluşturulmasını da hedefler. Bu bağlamda, çeşitli I4.0 sistemlerinin ilgili organizasyonlara entegre edilmesi, özellikle sürdürülebilirlik odaklı organizasyonlar için önemli bir nitelik taşıyacaktır.

Konvansiyonel üretim stratejilerinin yerini yeni dijital teknolojilere bırakması, özellikle Endüstri 4.0 ve sürdürülebilirlik arasındaki bağlantıyı anlamakla başlamaktadır. Bu bağlamda, basım sanayisinde uygulanan iş modellerinin incelenmesi, operasyonel, taktiksel ve stratejik düzeylerde işletmeye katkısının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Araştırmanın kapsamında, I4.0 teknolojilerinin çevresel, sosyal ve ekonomik

sürdürülebilirlik boyutlarına olan etkileri detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Sistematik literatür taraması ve doküman inceleme yöntemiyle gerçekleştirilen analiz, bu teknolojilerin basım sanayisinde sürdürülebilirlik hedeflerine nasıl katkı sağladığını ortaya koymaktadır. Literatürde sürdürülebilirlik konusunun geniş bir şekilde ele alındığı birçok çalışma bulunmakla birlikte, bu çalışmada sürdürülebilirlik kavramının sektörel açıdan nasıl değerlendirildiği ve özellikle sürdürülebilir üretim konusuna odaklanılmıştır.

Şu ana kadar literatür, basım endüstrisinin sosyal yönlerini ve sistemik görüşlerini tam olarak kapsamamıştır. Dahası, baskı şirketlerinin sürdürülebilirlik performansını etkileyebilecek Endüstri 4.0'ın olumlu ve olumsuz etkileri detaylıca ele alınmamıştır. Bu nedenle, bu çalışmada, basım endüstrisinde sürdürülebilirlik kavramlarına ve Endüstri 4.0'ın benimsenmesine odaklanan sistematik bir literatür taramasının sonuçlarına dayanarak önemli bulguları incelenmektedir. I4.0 teknolojilerinin basım sanayisindeki etkileri oldukça önemlidir. Dijital baskı teknolojileri, veri analitiği, AI ve IoT gibi yenilikler, üretim süreçlerinde büyük verimlilik artışlarına neden olurken, aynı zamanda sürdürülebilirlik hedeflerini desteklemektedir. Bu teknolojilerin kullanımıyla atık miktarı azaltılabilir, enerji kullanımı optimize edilebilir ve çevresel etkiler minimize edilebilir. Basım endüstrisi, I4.0 teknolojilerini benimseyerek sürdürülebilir bir üretim modeline doğru ilerlemekte ve geleceğin dijitalleşmiş üretim ortamına uyum sağlamaktadır. Bu çalışma, Endüstri 4.0 ve sürdürülebilir üretim konularındaki mevcut anlayışı geliştirerek, özellikle I4.0 teknolojilerinin sürdürülebilirlik uygulamaları ve performansı üzerindeki etkisine odaklanarak hem teoriye hem de uygulamaya katkıda bulunacaktır.

Sürdürülebilir üretim uygulamalarında I4.0 teknolojilerinin etkin bir şekilde kullanılması, sürdürülebilir üretimin uygulanması, kolaylaştırılması ve geliştirilebilmesi konusundaki potansiyeli değerlendirmek için mevcut literatür, yeterli bir kapsam sunamamaktadır. Araştırmaların çoğu, Endüstri 4.0'ı tek bir teknoloji olarak ele almakta; diğer bir kısmı ise genel olarak sürdürülebilir üretimi incelemekte, ancak ürün, süreç ve sistem düzeyindeki etkileri detaylıca incelenmemektedir. Sektörel anlamda genel veri eksikliği göz önüne alındığında, özellikle basım endüstrisi içinde bu eksikliğin daha belirgin olduğunu söylemek mümkündür. I4.0 teknolojilerinin, basım endüstrisinde ürün, süreç veya sistem düzeyinde sürdürülebilirlik üzerindeki etkileri henüz detaylıca incelenmemiştir. Bu çalışma, I4.0 teknolojilerinin bireysel unsurlarını ve bu unsurların sürdürülebilir üretim üzerindeki potansiyel etkilerini detaylı bir şekilde inceleyerek, mevcut üretim

sistemleriyle karşılaştırmalar sunmayı amaçlamaktadır. Endüstri 4.0 hakkında literatürde gerçekleştirilen sistematik tarama, bu teknolojilerin akademik çalışmalarını özetleyerek, gelecekteki araştırmalara temel oluşturacak ana konuları, uygulanan standartları, yazılım ve donanım kullanımlarını, mevcut eksiklikleri ve önerilen potansiyel araştırma alanları (Liao ve ark., 2017) belirlenmiştir.

2. GENEL TANIMLAR VE KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Endüstri 4.0 veya 4. Endüstri Devrimi kavramı, Almanya Hannover Fuarı'nda 2011 yılında tanıtıldığından beri işletmelerin ekonomik büyüme, istihdam kapasitesinin artırılması, gelirlerin adil bir şekilde paylaşılması, yoksulluğun azaltılması ve üretkenliğin artırılması gibi unsurlar üzerinde önemli bir etki yaratmaktadır. Bu kavram, ulusal kalkınma hedeflerine ulaşmada kritik bir rol oynayarak, ekonomik ferahlık sağlanması ve ülkelerin kalkınma hedeflerini gerçekleştirmede önemli bir araç haline gelmiştir. Altyapısındaki dijitalleşme ve otomasyon sayesinde Endüstri 4.0, işletmelerin daha verimli, esnek ve sürdürülebilir bir şekilde faaliyet göstermelerine olanak tanımakta, bu da ulusal düzeyde ekonomik iyileşmeye ve kalkınmaya katkı sağlamaktadır (Bakkari ve Khatory, 2017).

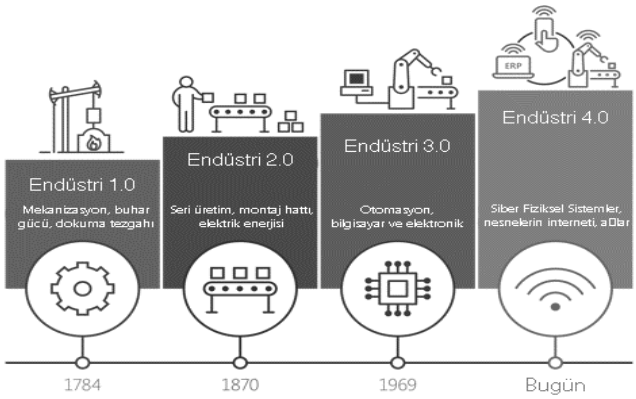
Endüstri 4.0'ın akıllı ve otonom üretimin yeni bir paradigması olduğu iddia edilmektedir (Jeschke ve ark., 2017). Üretim operasyon sistemlerini iletişim, bilgi ve veri toplama teknolojileriyle daha derinlemesine entegre etmektedir (Liu ve ark., 2017). Yaşanan teknolojilik gelişmelerle Endüstrisi 4.0 paradigmalarının sürdürülebilir endüstriyel kazanımlar oluşturmaya yönelik olduğu söylenebilir. Araştırmalar, işletmelerin I4.0 teknolojilerini başarılı olarak benimsenmesi, örgütsel ve yönetsel uygulamalar geliştirmeleri gerektiğini ortaya koymaktadır (Agostini ve Filippini, 2019)

Sürdürülebilir üretim kavramı, ilk defa 1992 yılında gerçekleşen BM Çevre ve Kalkınma Konferansı'nda ortaya çıkmış olup, sürdürülebilir kalkınmanın temelini oluşturan bir prensiptir (Krajnc ve Glavič, 2003). Basım endüstrisinde sürdürülebilirlik, literatürde kısmen ele alınmış olup özellikle çevresel konulara odaklanmıştır. Bu odak, daha ekolojik kâğıt, mürekkep ve diğer kaynakların kullanımı, uçucu organik bileşiklerin (VOC) azaltılması, yenilenebilir enerji kullanımı gibi faktörlere odaklanarak sağlanmaktadır (Kinderyte, 2011). I4.0 teknolojilerinin basım endüstrisindeki uygulanışı, gelişmekte olan ülkelerde faaliyet gösteren küçük ve orta ölçekli işletmeler (KOBİ) için yeni bir olgu olarak kabul edilmektedir. Bu teknolojilerin daha geniş çapta benimsenmesi, özellikle temsil edilmeyen nüfusları içeren derinlemesine anlayış ve gelişmelere ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca, Endüstri 4.0'ın sürdürülebilirlik üzerindeki etkisinin de bu anlayışın bir parçası olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu, sadece çevresel boyutları değil, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirlik unsurlarını da içermelidir (Müller ve ark., 2018).

2.1. Endüstri 4.0 Kavramı

Endüstri 4.0, işletmelerin finansal performansı, satış hacmi, üretim miktarı, kapasite kullanım oranı, üretim hızı, ürün kalitesi ve maliyet etkinliği gibi kritik performans göstergelerinde önemli bir gelişme sağlayarak kurumsal başarıyı iyileştirmiştir. Bu teknoloji bileşenleri, işletmelerin rekabet avantajını güçlendirmesinin yanı sıra, karlılığı optimize etme, satışları artırma, üretim miktarını artırma ve maliyetleri düşürme yetenekleriyle de dikkat çekmektedir. Endüstri 4.0'a geçiş, işletmelerin daha verimli, esnek ve rekabetçi bir yapıya kavuşmasında önemli bir kilometre taşı olarak öne çıkmaktadır (Çalış Duman ve Akdemir, 2021).

Buhar makinelerinin 18. yüzyılda devreye girmesiyle başlayan Endüstri 1.0 devrimi, üretimi artırmayı hedefleyen bir dönemi başlatmıştır. Ardından, 20. yüzyılın başlarında seri üretime geçilmesi ve enerjinin elektrikle sağlanmasıyla şekillenen Endüstri 2.0 gelmiştir. Endüstri 2.0, üretim sistemlerinin analog olmaktan çıkıp dijital sistemlere evrildiği bir dönemi temsil eder. Daha sonra ise Endüstri 3.0 ortaya çıkmıştır ve bu dönemde bilgi teknolojisinin sanayide etkin bir şekilde kullanılmasıyla karakterizedir. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi ilk üç endüstri devrimi, üretime mekanik, elektrik ve bilgi teknolojilerini getirerek endüstriyel pek çok alanda önemli değişikliklere yol açmıştır (Yıldız, 2018).



Şekil 2.1. Endüstrinin tarihsel gelişimi

Teknolojinin hızla evrim geçirmesi, endüstriyel sektörlerde köklü değişikliklere neden olmaktadır. Bu değişikliklerin temel amacı, üretim süreçlerini optimize etmek, verimliliği artırmak ve rekabet avantajı elde etmektir. Bu kapsamda, Endüstri 4.0 kavramı ortaya çıkmış ve endüstriyel dönüşümün yeni bir aşamasını temsil etmektedir. Endüstri 4.0,

özellikle operasyonel ve bilgi teknolojilerini entegre eden, en yeni teknolojik gelişmeleri kullanarak üretimi yeniden değerlendiren bir strateji olarak öne çıkmaktadır (Shi ve ark., 2020).

Endüstri 4.0'ın genel amacı, üretim süreçlerini daha uyarlanabilir, etkin ve akıllı bir hale getirerek rekabet avantajı elde etmektir. Bu hedefin ana özelliği ise üretim süreçlerinin dijitalleştirilmesidir. Geleneksel üretim sistemlerindeki mekanik ve analog sistemler, Endüstri 4.0'ın getirdiği dijital teknolojilerle yer değiştirmektedir. İlk üç sanayi devrimi sırasıyla makineleşme, elektrifikasyon ve bilgi teknolojilerinin etkisiyle ortaya çıkmıştır. I4.0 ise IoT, IoS ve siber-fiziksel sistemler (SFS) gibi yeni teknolojilerin üretim ortamına entegrasyonuyla dördüncü bir sanayi devriminin temellerini atmaktadır (Kagermann ve ark., 2013). Sistemler arasındaki otomasyon, büyük veri analitiği, AI, IoT, sensörler, SFS ve bulut bilişim gibi çeşitli teknolojiler arasındaki etkileşimi vurgulayan bir bakış açısı, şirketlerin operasyon yönetimini temelden değiştirmektedir. Bu teknolojilerin etkin kullanımı, çeşitli faaliyet alanlarında uygulama potansiyeli taşımakta ve şirketlerin operasyonel süreçlerini daha esnek, verimli ve yenilikçi bir şekilde yönetmelerini gerektirmektedir. Bu bağlamda, teknolojik entegrasyonlar, iş dünyasında önemli bir dönüşümü beraberinde getirerek rekabet avantajı sağlamak için kritik bir rol oynamaktadır (Fettermann ve ark., 2018).

TÜBİTAK tarafından gerçekleştirilen bir çalışma, Türkiye'nin endüstri devrimleri içindeki konumunu değerlendirmeyi ve gelecekte atılacak adımları belirlemeyi amaçlamıştır. Bu çalışma, Türkiye'nin sanayide dijital olgunluk seviyesinin, 2016 yılı için Endüstri 2.0 ile Endüstri 3.0 geçiş aralığını ortaya koymaktadır (Yıldız, 2018). Çalış Duman ve Akdemir (2021) tarafından I4.0 teknolojilerinin uygulanmasındaki zorlukları değerlendirme çalışmalarında, Tablo 2.1'de elde edilen verilere odaklanarak iki temel zorluk ortaya çıkmaktadır. İlk olarak, işletmelerin %44,3'ü, Endüstri 4.0 teknolojilerini etkin bir şekilde uygulayabilmek için kalifiye çalışan eksikliğiyle karşı karşıyadır. Bu durum, nitelikli personelin Endüstri 4.0'a uyum sağlama becerisindeki yetersizliğini göstermektedir. İkinci olarak, işletmelerin %20'si ise maliyetlerle ilgili araştırma ve eğitimde zorluk yaşamaktadır. Endüstri 4.0 sistemleri, dijital teknolojilerin benimsenmesini ve uygulanmasını gerektirir, ancak bu süreç beraberinde maliyetleri getirir. İşletmeler, bu maliyetleri yönetme, teknolojik altyapılarını güncelleme ve personeli yeni teknolojilere uygun şekilde eğitme konusunda belirgin zorluklar

yaşamaktadır. Bu sonuçlar, Türkiye'nin Endüstri 4.0 geçiş yol haritasında öncelikli olarak ele alınması gereken alanları belirleme noktasında önemli bir perspektif sunmaktadır. Özellikle nitelikli işgücü ve teknolojik altyapıya yönelik yapılacak yatırımlar, Türkiye'nin bu dijital döneme daha etkin bir şekilde uyum sağlamasına katkı sağlayabilir.

Tablo 2.1. Endüstri 4.0 uygulama zorlukları (Çalış Duman ve Akdemir, 2021)

Nedenler	Frekans	Yüzde (%)	Toplam Yüzde (%)
Finansman eksikliği	6	7,6	7,6
Bilgi eksikliği	9	11,4	19,0
Nitelikli çalışan devamsızlığı	35	44,3	63,3
Siber güvenlik	6	7,6	70,9
Standardizasyon sorunu	6	7,6	78,5
Araştırma ve eğitim maliyetleri	16	20,3	98,7
Diğer	1	1,3	100,0
Toplam	79	100,0	

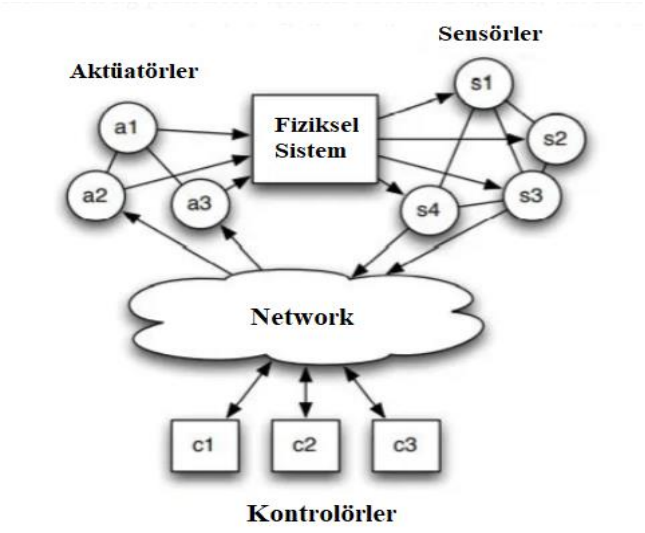
2.1.1. Endüstri 4.0 teknolojileri

Endüstri 4.0'ın temel bileşenleri Siber-Fiziksel Sistemler (Cyber-Physical Systems), Nesnelerin İnterneti (Internet of Things), Hizmetlerin İnterneti (Internet of Services) ve Akıllı Fabrika (Smart Factory) olarak tanımlanmıştır (Hermann ve ark., 2016). Teknolojinin ilerlemesiyle üretim aşamasında IoT, IoS ve SFS platformları kullanılmaya başlanması Endüstri 4.0 devriminin doğmasını sağlamıştır (Wan ve ark., 2015). Bu bileşenlerin detayları izleyen başlıklarda yer almaktadır. Endüstri 4.0'ı açıklamak için literatür çalışmalar ile akademik yayınlarda yoğun bir şekilde kullanılan kavramlar aşağıda belirtilmiştir (Fırat ve Fırat, 2017).

- Siber fiziksel sistemler - SFS (Cyber-physical systems)
- Nesnelerin interneti - IoT (Internet of things)
- Hizmetlerin interneti - IoS (Internet of services)
- Akıllı fabrika (Smart factory)

2.1.1.1. Siber-fiziksel sistemler (SFS)

SFS, üretim hattının planlama yazılımlarıyla sürekli olarak entegre olduğu varsayılır ve bu entegrasyon sayesinde gömülü sistemleri veya cihazları oluşturur. Bu durum, üretim süreçlerinin daha etkili ve kesintisiz bir şekilde yönetilmesine olanak tanır. SFS'nin sağladığı entegrasyon, üretim hattındaki çeşitli bileşenlerin birbiriyle uyumlu bir şekilde çalışmasını sağlar, böylece üretim verimliliği artar ve hatalar minimize edilir (Bordel ve ark., 2017). SFS, Şekil 2.2'de gösterildiği gibi dijital ve fiziksel bileşenlerinin entegrasyonunu temsil eden ve Endüstri 4.0'ın merkezinde yer alan karmaşık bir yapıdır. Bu sistemler, sensörler, aktüatörler ve diğer cihazlar aracılığıyla gerçek zamanlı veri alışverişinde bulunur ve birbirleriyle iletişim kurarlar. SFS, bu entegrasyonun temelini oluşturur (Liu ve Xu, 2017) ve üretim sistemlerinin yeni bir evrimini başlatır. Siber fiziksel sistem iletişim, kontrol ve fiziksel sistemleri internet aracılığıyla entegre eden bir teknoloji olmasından alternatif SFS modelleri aynı alanda uygulanabilir veya ilgili diğer alanlarda geliştirilebilir (Kamaludin ve Mulyanti, 2020).



Şekil 2.2. Siber-fiziksel sistem mimarisi
(Barreto ve ark., 2017; akt. Şekkeli ve Bakan, 2018)

Bu sistemler, üretim süreçlerinin dijital ve fiziksel bileşenlerinin bir araya getirilerek entegre edildiği bir ortamda faaliyet gösterir. Bu bütünleşme, fabrika ekipmanı, sensörler, aktüatörler ve diğer cihazlar aracılığıyla gerçek zamanlı veri alışverişi ve iletişim sağlayarak gerçekleştirilir (Oliff ve Liu, 2017). Sensörler, işlemci ve iletişim protokolünden oluşan siber-fiziksel sistemler, ekonomik izleme uygulamaları için uygulanabilir basit çözüm sunar ve dünyanın dört bir yanındaki uzak alanlardan tahminlerin kaydedilmesine, toplanan verilerin görselleştirilmesine ve analiz edilmesine olanak sağlar (Padher ve Rohokale, 2018).

SFS'ler, üretim süreçlerini daha verimli, esnek ve özerk hale getirme potansiyeline sahiptir. Bu sistemler, endüstriyel internetin, büyük verinin, yapay zekânın ve bulut bilişiminin birleşimini kullanarak üretim faaliyetlerini iyileştirir ve optimize eder. Üretim sistemlerindeki hata oranını azaltan SFS'ler, verimliliği artırır, enerji tüketimini optimize eder ve müşteri taleplerine daha hızlı yanıt verme kabiliyetini sağlar. SFS'ler, çeşitli bileşenlerin entegrasyonu sayesinde ortaya çıkar, bu da daha güçlü ve entegre bir üretim ortamını mümkün kılar (Stojmenovic ve Zhang, 2015). Bu bileşenler, üretim süreçlerinin dijital ve fiziksel yönlerini temsil eder. Bir siber-fiziksel sistem, birbirleriyle ve fiziksel dünya ile etkileşime giren sensörler, aktüatörler ve bilgi işlem cihazlarından oluşur. Bu sistemler, model tabanlı tasarım, veri analitiği yöntemleri, kontrol teorisi ve gerçek zamanlı sistemleri içerir. Yani, siber-fiziksel sistemler, fiziksel süreçleri dijitalleştirir ve bu dijital modellerle etkileşim içinde bulunarak üretim süreçlerini daha etkili ve esnek hale getirir (Alur, 2015).

Siber-fiziksel sistemlerin temel bileşenleri

- **Sensörler ve aktüatörler:** Siber-fiziksel sistemlerde önemli rol oynayan temel bileşenlerdir. Sensörler, çeşitli parametreleri ölçmek ve fiziksel dünyadan veri toplamak için kullanılan cihazlardır. SFS'lerde kullanılan sensörler, örneğin sıcaklık, basınç, hız, titreşim gibi değerleri ölçerek sisteme gerçek zamanlı veri sağlar. Aktüatörler ise dijital sistemlerin fiziksel eylemler gerçekleştirmesini sağlayan cihazlardır. Örneğin, bir motoru çalıştırmak veya bir valfi kontrol etmek için aktüatörler kullanılabilir. Entegre sensör ve aktüatör cihazları, akıllı malzeme sistemleri olarak adlandırılan yapıları oluşturabilir. Bu yapılar, araştırma ve geliştirmede geniş perspektiflere sahip yeni çözümler sunabilir. Entegre sensör-

aktüatör cihazları, mikroaktüatörlerin kontrolünde uygulama alanı bulabilir veya daha büyük sürekli yapıların modül kontrolü için kullanılabilir (Wagner ve ark., 2019; Lee ve Moon, 1989).

- **Veri toplama ve iletişim:** SFS, sensörler ve diğer cihazlar aracılığıyla gerçek zamanlı veri toplama ve iletişim sağlayarak etkileşimli bir yapı oluşturur. Sensörler, çevresel değişkenleri ölçer ve bu verileri bir ağ üzerinden diğer bileşenlere iletir. Bu iletişim, analiz, kontrol veya karar verme süreçlerinde kullanılabilir. SFS'ler, mevcut kablosuz altyapıyı kullanarak uzak konumlardaki iç mekanlarda çevresel koşulları izleyebilir, dünyanın herhangi bir yerinden ölçümleri kaydedebilir ve toplanan verileri internete bağlı herhangi bir cihazdan analiz etme imkânı sağlar (Mois ve ark., 2016).
- **Veri analitiği ve yapay zekâ:** Siber-fiziksel sistemler tarafından toplanan veriler, analitik ve yapay zekâ yöntemleriyle işlenir. Büyük veri analitiği, bu verileri değerli bilgilere dönüştürme sürecini yönetir. Yapay zekâ teknikleri ise karmaşık problemleri çözmek, kararlar vermek veya sistemleri otomatik olarak yönetmek amacıyla kullanılabilir. Tüm bu gözlemler, büyük veri analitiği ve yapay zekâ entegrasyonunun veri iletimini ve işlemeyi iyileştirmek için etkili bir itici güç olduğunu gösterir. Büyük veri teknolojisi, veri entegrasyonu, veri madenciliği ve veri tahmini gibi yöntemlerle çeşitli veri türlerini etkili bir şekilde ele alabilirken, yapay zekâ teknolojisi büyük verilerin yakalanmasını ve yapılandırılmasını daha da kolaylaştırabilir (Javaid ve ark., 2022).
- **Bulut ve sınır bilişim altyapıları:** SFS, veri depolama ve işleme kapasitesini artırmak için bulut bilişim altyapısını kullanır. Bulut bilişim, büyük veri setlerini işlemek ve analiz etmek için gereken kaynakları sağlar. Ayrıca, sınır bilişim, veri toplama ve analiz süreçlerini daha hızlı ve etkin hale getirmek için yerel düzeyde hesaplama ve karar verme yetenekleri sağlar. Sınır bilişim, sanallaştırılmış ortamlarda öngörülebilir bir performans kaybına rağmen, daha fazla analiz için merkezi bir buluta göndermeden önce sensörlerden ve mobil cihazlardan gelen verileri önceden işlemenin yararlı bir yoludur (Femminella ve ark., 2016). Bulut bilişimle karşılaştırıldığında sınır bilişim daha yüksek veri aktarım hızı, sınırlı bant genişliklerine daha az bağımlılık, daha fazla gizlilik ve güvenlik ile verilerin yerel olarak kullanılmasından daha düşük maliyet sunmaktadır (Klonoff, 2017)

Siber-fiziksel sistemlerin faydaları:

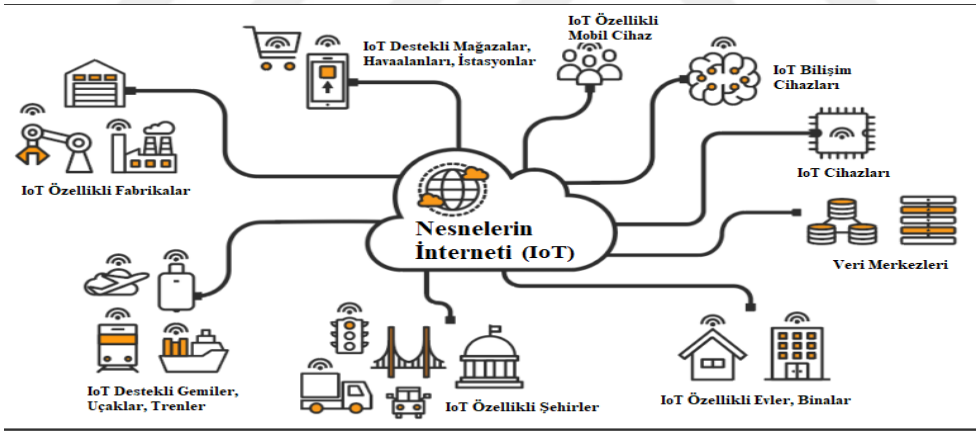
SFS, endüstride bir dönüşüm sağlayarak sunduğu bazı faydaları verimlilik, esneklik, özerklik ve rekabetçilik olarak sıralayabiliriz. Akıllı SFS, geleneksel sistemlerde bulunmayan özelliklere sahip olarak çalışma hayatını daha iyi ve daha kullanışlı hale getirmeye yardımcı olabilir (Tokody, 2018). SFS, üretim süreçlerini büyük ölçüde verimli hale getirir. Gerçek zamanlı veri alışverişi ve analitiği sayesinde, süreçlerin anlık olarak izlenmesi ve değerlendirilmesi mümkündür. Bu da süreçlerin optimize edilmesine, üretim kapasitesinin artırılmasına ve enerji tüketiminin optimize edilmesine olanak tanır. Deneysel verilere göre, siber-fiziksel sistemlerin çalışma sırasında enerji tüketimini %40'tan fazla azaltabildiğini görmekteyiz. Bazı durumlarda ise bu azalmanın yaklaşık %90'a ulaştığını gözlemlemekteyiz, bu da siber-fiziksel sistemlerin enerji verimliliği açısından önemli bir potansiyel taşıdığını göstermektedir (Munoz ve ark., 2019).

SFS, otomatik karar verme yetenekleri sayesinde hata oranını düşürerek üretim süreçlerindeki atıkları azaltır. Bu sistemler, dijital sistemlerin ve sensörlerin entegrasyonu ile üretim süreçlerini daha esnek ve uyarlanabilir hale getirir. Üretim hatları, SFS sayesinde daha hızlı bir şekilde farklı ürünlerin üretimi için kolayca yapılandırılabilir. SFS, özerk sistemlerin geliştirilmesine olanak tanır ve AI teknikleri ile otomatik karar verme algoritmaları kullanarak insan müdahalesini azaltır. Bu, daha yüksek bir otomasyon seviyesine ve daha düşük hata olasılığına yol açar. Analiz, kullanılabilirlik dereceleri ve çeşitli metriklerin uygulanışı, siber-fiziksel sistemlerin tüm parçalarını kapsamlı bir şekilde değerlendirmesinin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir (Jacobs ve ark., 2018).

SFS, işletmelerin rekabet gücünü artırır. Daha verimli üretim süreçleri, daha hızlı yanıt verme yetenekleri ve daha yüksek ürün kalitesi sayesinde, işletmeler daha rekabetçi hale gelir. Ayrıca, müşteri taleplerine daha hızlı yanıt verme kabiliyeti, müşteri memnuniyetini artırır ve yeni pazar fırsatları yaratır. Siber ve fiziksel sistem bileşenleri emniyet, verimlilik, güvenlik, performans, güvenilirlik, hata toleransı ve genişletilebilirlik gibi tüm açılardan daha iyi çözümler ortaya çıkarmaktadır (Zhu ve Sangiovanni, 2018).

2.1.1.2. Nesnelerin interneti (IoT)

Nesnelerin İnterneti, günümüz endüstriyel süreçlerinde önemli bir unsuru olan ve Endüstri 4.0'ın temelini oluşturan bir teknoloji olmasının yanında fiziksel cihazların, sensörlerin, yazılımların ve ağ bağlantılarının birbirleriyle iletişim kurarak veri toplamasını, paylaşmasını ve analiz etmesini sağlayan bir sistemdir (Gago ve ark., 2017). Endüstri 4.0, üretim süreçlerinde dijitalleşme ve otomasyonun hızla yaygınlaştığı bir dönemi ifade eder. Bu dönemde, IoT teknolojisi önemli bir role sahiptir. IoT, makinelerin ve ekipmanların internete bağlanmasını sağlayarak birbirleriyle iletişim kurmalarını mümkün kılar. Bu sayede üretim süreçleri daha verimli hale gelir, makine ve ekipmanların performansı izlenebilir ve karar alma süreçleri iyileştirilebilir. Endüstri 4.0 temel bileşenlerinden IoT, üretim sektöründe daha akıllı, bağlantılı ve yönetilebilir bir altyapının oluşturulmasına katkı sağlar (Conti ve ark., 2017). IoT, Şekil 2.3'de gösterildiği üzere nesnelerin uzaktan algılanmasına ve kontrol edilmesine olanak tanıyarak endüstri için gelişmiş doğruluk, verimlilik ve ekonomik fayda sağlar (Saha ve ark., 2016).



Şekil 2.3. Nesnelerin İnterneti (IoT)
(Barreto ve ark., 2017; akt., Şekkeli ve Bakan, 2018)

IoT teknolojisi sayesinde, imalat süreçleri ile birçok alanda yapılan işler daha iyi izlenebilir ve kontrol edilebilir. Sensörler ve akıllı cihazlar, fabrika ortamında oluşan verileri toplayabilir ve bu verileri işletmelere gerçek zamanlı olarak iletebilir. Örneğin, bir üretim hattındaki sensörler, ürünlerin kalite kontrolünü sağlamak için verileri toplayabilir ve işletmelere anlık olarak geri bildirim sağlayabilir. Ayrıca analiz yeteneği

olan bilgi işleme sistemi oluşturularak (Ahmed ve ark., 2017) hatalı üretimi azaltmak ve kaliteyi artırmak için önemli bir avantaj sunar. Sensörler ve izleme sistemleri, makinelerin çalışma durumunu sürekli olarak izleyebilir ve bakım ihtiyaçlarını belirleyebilir. Bu sayede, arızalar önceden tespit edilebilir ve önleyici bakım yapılabilir. Bu da üretim sürekliliğini artırır, makine duruş sürelerini azaltır ve bakım maliyetlerini düşürür. IoT aynı zamanda tedarik zinciri yönetiminde de performansını ve davranışını doğrudan etkiler (Ochoa ve ark., 2017). Üretim sürecindeki cihazlar ve ekipmanlar, tedarikçilerle ve müşterilerle doğrudan iletişim kurma yeteneğine sahiptir. Bu, tedarik zincirinin daha etkili bir şekilde yönetilmesini, süreçlerin optimize edilmesini ve iş birliği olanaklarının artırılmasını sağlar. IoT, birbirine bağlı cihazlardan oluşan bir ağdır, ancak büyük ölçekli birbirine bağlanabilirlik, bilgi güvenliği ile ilgili çeşitli potansiyel risklere neden olabilir. Bu durum, IoT ekosistemini güvence altına almak için tasarım ve geliştirme aşamalarında yerleşik protokollerin ve en iyi uygulamaların izlenmesi gerektiği önemli bir zorluğu ortaya çıkarır (Javed ve ark., 2017).

IoT, büyük miktarda verinin toplanmasını gerektirir ve bu verilerin güvenli bir şekilde korunması kritik bir öneme sahiptir. Aynı zamanda, IoT ağları, siber saldırılara karşı savunmasız olabilir, bu da işletmeler için potansiyel bir büyük risk oluşturabilir. Bu nedenle, IoT sistemlerinin güvenliği ve veri koruması için gerekli önlemlerin alınması son derece önemlidir. IoT, birçok nesne arasında iletişim sağlayabilir, makineler arası etkileşimi mümkün kılabilir ve endüstriyel bağlamda doğru bir şekilde kullanıldığında büyük ekonomik ve profesyonel faydalar sunabilir (Chopra ve ark., 2019).

2.1.1.3. Hizmetlerin interneti (IoS)

"Hizmetlerin İnterneti" veya kısaca "IoS" (Internet of Services), nesnelerin interneti kavramının bir uzantısıdır. Bilgi ve hizmetlerin paylaşılabilirliği ile erişilebilirliğine odaklanır. Hizmetlerin interneti kavramı, farklı cihazlar ve uygulamalar arasında hizmetlerin ve verilerin etkileşimini kolaylaştırmayı hedefleyen bir perspektife dayanarak ortaya çıkmıştır (Hofmann ve Rüsch, 2017). Endüstri 4.0'ın iş ve teknoloji perspektifinde nasıl işlediğini daha derinlemesine anlamak için, IoS önemli bir kavramdır (Reis ve Gonçalves, 2018).

IoS, temeli internet hizmetlerin sağlanması olan bir yaklaşımdır (Anderl, 2014). Hizmetlerin internetinin temel bileşenleri çeşitli uygulamalar ve cihazlar tarafından

sunulan hizmetler, hizmetlerin internetinde önemli bir rol oynayan Uygulama Programlama Ara yüzü / Application Programming Interfaces (API) diğer hizmetlerle veya cihazlarla veri paylaşımı, otomasyon ve entegrasyonu, toplanan verilerin daha fazla bilgi sağlamak ve daha iyi kararlar almak için analiz edilebilmesi için veri analitiği olarak sıralayabiliriz. Hizmetler internetinin vizyonu, servis sağlayıcılarının hizmetlerini internet üzerinden sunmalarını sağlamaktır, dijitalleşmenin derecesine bağlı olarak hizmetler dünya çapında sunulabilmekte ve talep edilebilmektedir (Buxmann ve ark., 2009).

IoT, çeşitli endüstrilerde ve alanlarda geniş bir kullanım potansiyeline sahiptir. Özellikle akıllı şehirlerde, trafik yönetimi, enerji verimliliği, sağlık sektöründe hastaların takibi gibi birçok uygulama alanı bulunmaktadır. İşletmeler, pazarın başarısı için önemli olan değer ağları oluşturmak amacıyla başka işletmelerle iş süreçlerini paylaşma ihtiyacı hissedecektir (Fischer, 2014). Bu yaklaşım, daha sağlam bağlantılar, daha fazla veri ve daha üst düzey hizmet sunma potansiyeli taşır. IoS, hizmet sağlayıcıların ve tüketicilerin bir araya gelerek gelişmiş iş modelleri için teknik altyapı oluşturduğu bir sistem sunar (Cardoso ve ark., 2009).

2.1.1.4. Akıllı fabrika (smart factory)

Akıllı fabrikalar, aynı zamanda 'karanlık fabrikalar', 'ışıkları söndüren fabrikalar' veya 'insansız fabrikalar' olarak da adlandırılmaktadır. Bu terimler, üretim sürecinde küçük farklılıklar sağlayarak, her bir makinenin saniyeler içinde yeni görevlere ayrılabildiği bir yapıyı ifade eder. Akıllı fabrikalar, insan müdahalesini minimum seviyeye indiren bir sistem önerisi sunar, üretimdeki süreçlerle neredeyse tamamen bütünleşmiş bir yaklaşımı benimser (Öztemel ve Gursev, 2018). Endüstri 4.0'ün ana unsurlarından biri olan akıllı fabrika, sadece üretim bileşenlerinin (aktüatörler, sensörler, robotlar, baskı makineleri, konveyörler, vb.) birbirleriyle entegre edildiği ve bilgi paylaştığı bir sistem değil, aynı zamanda makine arızalarını önceden tahmin edip engelleyen, üretim sürecini etkin bir şekilde yöneten ve kontrol eden bir yapay zekâ entegrasyonunu içerir (Qin ve ark., 2016). I4.0 kapsamında akıllı bir fabrikanın öncelikli hedefleri; verimliliği artırmak, arıza sürelerini azaltmak, ürün kalitesini artırmak ve talep değişikliklerine daha hızlı yanıt vermektir. I4.0 fabrikaları son derece esnektir ve kitlesel özelleştirmeyi kolaylaştıran, kendi kendini optimize eden üretim süreçlerinin uygulanmasını sağlar (Beier ve ark.,

2020). Üretim sürecinin herhangi bir noktasında ham madde eksikliği ortaya çıktığında, otomatik olarak gerekli sipariş oluşturulur, anında arızalar tespit edilir ve giderilir. Bu sayede üretim sorunsuz bir şekilde devam edebilir (Siemens, 2017). Üretim süreçlerinin daha çevik, uyarlanabilir ve veri odaklı hale getirilmesi hedeflenmektedir. Akıllı fabrika, endüstriyel üretimde artan karmaşıklığı destekleyerek verimliliği artırmaktadır. İnsan, makine ve lojistik sistemleri arasında doğrudan iletişim, üretim tesislerini birbirine bağlar ve bu entegrasyon (Şekil 2.4.) sayesinde daha akıcı bir üretim süreci sağlanır (Gabriel ve Pessl, 2016).



Şekil 2.4. Akıllı fabrika (smart factory) bileşenleri

Akıllı fabrikaya geçiş, teknolojiye, eğitime ve altyapıya önemli yatırımlar yapılmasını gerektirir, ancak giderek dijitalleşen ve birbirine bağlanan bir dünyada uzun vadeli maliyet tasarrufu ve rekabet avantajı potansiyeli sunar. Çeşitli firmalar tarafından yakın gelecekteki stratejik planlamaları içerisinde mevcut fabrikalarını ve üretim hatlarını akıllı fabrikalara çevrilmesinin olduğu ve bunun için yüksek miktarlarda yatırım planlarının olduğu açıklanmıştır (CDTI, 2017).

2.1.2. Endüstri 4.0'ın temel prensipleri

Endüstri 4.0'ın temel bileşenleri, dijital ve donanımsal olarak kategorize edilebilir. Dijital teknolojiler, Nesnelerin İnterneti (IoT), siber güvenlik, artırılmış gerçeklik (AR), bulut

bilişim, sanal gerçeklik (VR), büyük veri analitiği ve simülasyon gibi çağdaş iletişim ve bilgi teknolojilerini içerir (Liao ve ark., 2017). Donanımsal teknolojiler ise genellikle eklemeli üretim veya sensörler ve dron gibi üretim süreçlerinde kullanılan parçalı teknolojileri ifade eder (Morrar ve ark., 2017).

I4.0, makineleri, bilgi işleme, veri analitiği, bağlanabilirlik, Siber Fiziksel Sistemler (SFS), Nesnelerin İnterneti (IoT), otomasyon, bulut bilişimi ve veri paylaşımını bir araya getiren yeni bir inovasyon çağını temsil etmektedir. Bu bağlamda, mevcut çalışma, endüstriyel büyük verinin zorluklarını ve fırsatlarını vurgulayarak, araştırmacılara algoritmalar ve teknikler geliştirmelerine yardımcı olmayı amaçlamaktadır (Khan ve ark., 2017). Endüstri 4.0'ın etkin uygulanabilmesi için Tablo 2.2'de özetlenen bazı temel prensipler bulunmaktadır ve bu prensipler aşağıda detaylandırılmıştır

Tablo 2.2. Endüstri 4.0 temel teknolojileri ve açıklamaları (Öztuna, 2017)

Endüstri 4.0'ın Temel Teknolojileri ve Uzantıları	Açıklama
Eklemeli Üretim	Üç boyutlu baskı olarak da bilinen eklemeli üretim, torna, freze gibi geleneksel üretim sistemlerinin aksine, parça katmanını doğrudan üç boyutlu dijital model verilerinden alarak son derece karmaşık yapıda tasarlanmış ürünleri bile etkin ve kısa bir süre içinde katman katman üretmeye yönelik bir süreçtir.
Artırılmış Gerçeklik	İnsan merkezli endüstriyel ortamı teşvik etmek amacıyla, gerçek ve sanal öğeleri birbiriyle koordine ederek, esnek ve gerçek zamanlı bilgi elde etmeyi aynı zamanda kullanıcıların fiziksel ve dijital ortam arasındaki boşluğu doldurmasını sağlar.
Otononom Robotlar	İnsan ile işbirliği içinde olan otonom robotlar üretimde esneklik, kalite ve verimliliği sağlarken, insan sağlığı açısından tehlikeli, riskli işleri üstlenerek güvenli bir iş ortamı sağlarlar.
Büyük Veri ve Analitiği	Üstsel oranda artan veri hızının depolanması, analiz edilmesi, yorumlanması, bu yolla müşteri profillerinin ve tüketim alışkanlıklarının anlaşılması günümüz küresel dünyasında birbiriyle sürekli rekabet halinde olan işletmeleri öne çıkaracak bir fırsat oluşturur.
Bulut Bilişim	Bilgi işlem hizmetlerinin internet üzerinden sağlanarak daha hızlı, inovatif ve esnek kaynaklar ile ekonomik ölçeklendirme sunulması anlamına gelir.
Siber Fiziksel Sistemler ve Siber Güvenlik	Birbirleri ile internet üzerinden nesne ve sistemlerin oluşturduğu ağı ve gerçek dünyadaki nesnelerin ve davranışların bilgisayar ortamında simülasyonuyla ortaya çıkan sanal ortamı ifade eder.
Yatay ve Dikey Entegrasyon	İşletmenin içinde ve dışında bulunan tüm paydaşların ve fonksiyonların birbiriyle koordine olarak üretimin kolaylaşmasını, kaynak verimliliğin artmasını ve küresel tedarik zincirinde optimizasyon elde edilmesini sağlar.
Nesnelerin İnterneti	Tüm nesnelerin internete erişmesini ve diğer cihazlar ile etkileşim halinde olmasını, iletişim kurabilmesini sağlayan bir teknolojidir.
Simülasyon	Gerçek hayattaki bir sistemin ya da sürecin çalışmasının bilgisayar ortamında birebir taklit edilmesi ve bu yolla problemlerin önceden tespit edilerek anında çözülmesi, daha verimli ve esnek üretim sistemlerinin oluşturulmasıdır.

2.1.2.1. Gerçek zamanlı veri analitiği

Gerçek zamanlı analitik, Endüstri 4.0'ın önemli bir unsuru olup, verilerin anlık olarak analiz edilmesine dayanan bir yaklaşımdır. Üretim sürecindeki ekipmanlar, sensörler ve diğer bileşenler arasında sürekli veri paylaşımını gerçekleşmektedir. Üretim hattından

elde edilen verilerin anlık analiz edilmesi, hızlı karar almayı, süreç verimliliğini artırmayı ve hataları minimize etmeyi sağlar. Gerçek zamanlı veri analitiği, işletmelere rekabet avantajı kazandırarak maliyetleri düşürür ve müşteri memnuniyetini artırır. Geleneksel veri analitiği metotlarına göre daha hızlı karar almayı ve iş süreçlerinde iyileştirir. Endüstri 4.0 bağlamında, üretim hatlarından gelen verilerin anlık analizi, verimliliği artırır, öngörücü bakımı mümkün kılar, esneklik ve uyarlanabilirliği artırırken aynı zamanda kalite kontrolünü iyileştirme gibi bir dizi avantaj da sağlar (Wang, 2018).

Geleneksel üretim süreçlerinde, veri toplama ve analiz süreçleri genellikle uzun sürer ve manuel olarak gerçekleştirilir. Bu durum, zaman kaybına ve yanlış anlamalara neden olabilir. Ancak, Endüstri 4.0, gerçek zamanlı veri paylaşımı ile üretim süreçlerini daha hızlı ve etkili hale getirir. Sensörler, makinelerin durumunu ve performansını sürekli olarak izlerken, elde edilen veriler anında analiz edilip paylaşılır. Bu sayede, üretim sürecindeki potansiyel sorunlar veya hatalar hızlı bir şekilde tespit edilir ve gerekli önlemler alınabilir (Duan ve Xu, 2021). Ayrıca, gerçek zamanlı veri analitiği, üretim süreçlerinin daha etkin bir şekilde takip edilmesini ve optimize edilmesini sağlayarak süreç verimliliğini artırabilir. Örneğin, üretim hattında oluşan bir arıza, bir makinedeki performans düşüşü veya enerji tüketiminde anormal bir artış gibi durumlar, gerçek zamanlı analitik sistem sayesinde hızlı bir uyarı ile tespit edilip gerekli önlemler alınabilir. Anlık veri analizi, üretim süreçlerinin aksamadan devam etmesini ve daha iyi optimize edilmesini sağlayarak, verimlilik artışını ve müşteri memnuniyetini beraberinde getirir. Bu avantajları değerlendiren şirketler, rekabet avantajı elde etmek, maliyetleri düşürmek, müşteri memnuniyetini artırmak ve geleceğin dijital dönüşümüne daha etkili bir şekilde uyum sağlamak için önemli bir adım atmış olurlar. (Maresova ve ark., 2018).

Endüstri 4.0, fabrikalarda otomasyon, AI, büyük veri analitiği ve IoT gibi teknolojilerin bütünleşmesiyle üretim süreçlerinde devrim niteliğinde değişiklikler sağlamayı hedefler. Bu teknolojiler, fabrikalarda ve üretim hatlarında birçok sensör ve cihaz aracılığıyla veri toplamayı mümkün kılar. Veriler, üretim hatlarındaki makinelere ve diğer cihazlara yerleştirilen akıllı sensörler veya IoT cihazları aracılığıyla elde edilebilir. Bu veriler, anlık olarak analiz edilerek geri bildirimler sağlanabilir ve hızlı müdahaleler yapılabilir. Gerçek zamanlı analitiğin Endüstri 4.0'ın yaygınlaşmasıyla birlikte daha da önem kazanacağı öngörülmektedir (Öztemel ve Gursev, 2018).

2.1.2.2. Esnek ve akıllı üretim

Endüstri 4.0, üretim süreçlerini esnek ve akıllı duruma getirmeyi hedefler. Bu sayede, kişiselleştirilmiş üretim, kitle üretimi ve hızlı değişen taleplere uyum sağlama gibi avantajlar elde edilebilir. Bu kavram, üretim sektöründe bir dönüşümü temsil eder ve esneklik, verimlilik ve akıllı sistemlerin kullanımıyla birlikte yeni fırsatlar sunar. Dijitalleşme, otomasyon ve ileri teknolojilerin entegrasyonuyla, üretim sektöründe daha verimli ve rekabetçi bir ortam oluşturulabilir (Kasa ve Arslan, 2020).

Esnek üretim, Endüstri 4.0'ın önemli bir özelliğidir ve geleneksel üretim sistemlerine göre daha fazla adaptasyon yeteneği sunar. Bu, üretim süreçlerini daha dinamik ve anında değişikliklere uyum sağlayabilir hale getirir. Bu esneklik, müşteri ihtiyaçlarına daha hızlı ve etkili çözümler sunma imkânı sağlar. Makineler genellikle ölçümleme kabiliyetine sahiptir ve bağlı oldukları süreçlerde genellikle büyük ölçüde bağımsızdır. Gerekli olan kaynaklar, yazılım veya donanım gibi unsurlar kiralanabilir, bu da nihayetinde maliyetleri azaltan bir etmen olabilir. Akıllı fabrikalardaki makinelerin doğruluğu, yeni bir kalite standardına evrim geçirmektedir. Tesisler artık çıkış pozisyonundaki değişkenliklere daha esnek tepkiler verebilme yeteneğine sahiptir (Derya, 2018). Akıllı üretim ise veri analitiği, yapay zekâ ve otomasyonun entegrasyonunu içerir. Bu teknolojiler, üretim süreçlerinde verimliliği artırır ve hataları azaltır. Sensörler ve veri toplama cihazları, üretim süreçlerinde gerçek zamanlı veri toplamayı sağlar. Bu veriler, analitik algoritmalar aracılığıyla işlenerek daha iyi kararlar alınmasını sağlar. Makine öğrenimi ve yapay zekâ, üretim süreçlerini otomatikleştirir ve iyileştirir. Öngörücü bakım gibi akıllı sistemler, donanım arızalarını önceden tespit edebilir ve önleyici önlemler alarak üretim sürekliliğini sağlar. Akıllı üretim sistemlerinin oluşturacağı ekosistemlerdeki ağların, gelecek çeyrek yüzyılda küresel ticaret hacminin yaklaşık %46'sını etkileyeceği tahmin edilmektedir (Yıldız, 2018).

Endüstri 4.0'ın esnek ve akıllı üretimi, birçok sektörde çeşitli avantajlar sunmaktadır. Örneğin, otomotiv sektöründe kişiselleştirilmiş üretim ve lojistik sektöründe etkin tedarik zinciri yönetimi gibi avantajlar sunarken, geniş çapta benimsenmesi bir dizi zorlukla karşılaşmaktadır. Bu zorlukların başında, iş gücündeki beceri ve eğitim gereksinimlerindeki değişim gelmektedir. Yeni teknolojilere uyum sağlamak için çalışanların ek eğitim alması gerekebilir. Bu uyumu desteklemek amacıyla çeşitli eğitim

programları düzenlenmeli ve staj imkânları sunulmalıdır. Bu hedeflere ulaşmak için üniversiteler, özel ve kamu kurumları arasında etkili bir iş birliği kurmalıdır. Endüstri 4.0'a odaklanan lisans ve ön lisans programlar açılarak öğrencileri sektör ihtiyaçlarına uygun şekilde yetiştirilmelerini sağlamak, yeni nesil çalışanların iş dünyasındaki taleplere uygun niteliklere sahip olmalarını sağlayabilir (Şekkeli ve Bakan, 2018).

2.1.2.3. İnsan - makine iş birliği

Endüstri 4.0, dijitalleşme ve otomasyonun ilerlemesiyle birlikte üretim sektöründe önemli bir dönüşümü başlatmıştır. Bu dönüşümde önemli bir faktör, insan ve makine iş birliğidir. İnsan ve makine arasındaki bu iş birliği, etkileşimi teşvik eden bir yaklaşımı ifade eder. İnsanlar, bilgi ve deneyimlerini kullanarak teknolojinin sunduğu verileri anlamlandırır, karmaşık kararlar alır ve stratejik görevleri üstlenerek iş süreçlerini yönetirlerken, makineler tekrar eden ve fiziksel olarak zorlayıcı görevleri otomatik olarak gerçekleştirirler (Terziyan ve ark., 2018).

Geleneksel üretim sistemlerinde, makinelerin işçilerin yerini alması amaçlanırken, Endüstri 4.0 ile insanlar ve makineler birbirini tamamlayan bir rol üstlenmektedir. Bu yaklaşım, işletmelerin daha hızlı ve daha esnek bir üretim süreci sağlamasına olanak tanır. İnsanlar, veri analizi ve büyük resmi anlama yetenekleri sayesinde, iş süreçlerini iyileştirme, verimlilik artırma ve kalite kontrolü gibi stratejik görevleri üstlenebilir. Öte yandan, makineler, otomatik üretim hatları, robotlar ve yapay zekâ sistemleri gibi teknolojiler aracılığıyla tekrar eden ve fiziksel görevleri yerine getirerek iş süreçlerini hızlandırır ve doğruluğu artırır. Bu sayede insan-makine iş birliğine dayalı simbiyotik ürünlere yönelik yeni teknolojik üretim ve endüstriyel süreçler oluşacaktır (Yıldız, 2018).

İnsan-makine iş birliği, insanların ve makinelerin bir araya gelerek ortak bir çalışma hedefine ulaşmak için birlikte çalıştığı bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım, Endüstri 4.0'ın temel özelliklerinden biridir ve insanlar ile makinelerin yeteneklerini birleştirerek daha verimli bir çalışma ortamı yaratır. Böylece, insanlar daha stratejik görevlere odaklanabilirken, makineler rutin görevleri üstlenir ve üretkenlik artar. İnsan-makine iş birliği, gelecekte daha da yaygınlaşması beklenen bir eğilimdir ve iş dünyası, üretim sektörü ve toplum üzerinde önemli etkiler yaratmak için büyük potansiyeller sunmaktadır. Fakat bununla birlikte birçok çalışma akıllı fabrika operatörlerine ve eğitim süreçlerine olan ihtiyaçtan bahsetmektedir (Maresova ve ark., 2018).

İnsan-makine iş birliğinin avantajları

İnsan-makine iş birliği ve akıllı fabrikalar birçok avantajı beraberinde getirir. Bu avantajlar, iş dünyası, üretim sektörü ve toplum üzerinde olumlu etkiler yaratır. İşte Şekkeli ve Bakan (2018)'a göre bazı temel avantajlar:

- **Verimlilik artışı:** İnsan-makine iş birliği, iş süreçlerinin hızlı ve etkili bir şekilde yürütülmesini sağlar. Makineler, tekrar eden görevleri hatasız ve sürekli olarak gerçekleştirirken, insanlar daha stratejik görevlere odaklanabilir. Bu, üretkenliği artırır ve daha fazla ürün veya hizmet üretimine olanak tanır.
- **Kalite kontrolü:** İnsan-makine iş birliği, üretim süreçlerinde kalite kontrolünü geliştirir. Makineler, hassas ölçümler yapabilir ve ürünlerin kalite standartlarına uygunluğunu kontrol edebilir. İnsanlar ise deneyim ve uzmanlıkla kalite kontrol sürecini yönetir ve gerekli düzeltici önlemleri alır.
- **İş güvenliği:** Tehlikeli ve zorlu işler, makineler tarafından gerçekleştirilebilirken, insanların iş güvenliği sağlanır. Makineler, riskli ortamlarda çalışabilir ve fiziksel olarak zorlayıcı görevleri üstlenebilirken, insanlar daha güvenli bir ortamda stratejik kararlar alabilir.
- **Yenilikçilik ve inovasyon:** İnsan-makine iş birliği, yenilikçiliği ve inovasyonu teşvik eder. İnsanlar, teknolojiye dayalı veri analizi ve iş zekâsıyla yeni fırsatları keşfedebilir ve iş süreçlerini iyileştirme konusunda öncü rol oynayabilir. Bu şekilde, işletmeler daha rekabetçi ve yenilikçi hale gelebilir.

2.1.2.4. Yapay zekâ ve makine öğrenimi

Endüstri 4.0, önemli bir dönüşümü beraberinde getiren ileri teknolojileri, özellikle yapay zekâ ve makine öğrenimini içermektedir. Bu teknolojiler, otomatik karar verme, tahminler yapma ve karmaşık sorunların çözümünde kritik bir rol oynar. Endüstri 4.0'ın temelini oluşturan yapay zekâ ve makine öğrenimi, işletmelere verilerini etkili bir şekilde analiz etme, üretim süreçlerini optimize etme ve daha verimli hale getirme imkânı sunar (Öztemel ve Gursev, 2018).

Yapay zekâ teknolojileri, Endüstri 4.0'un önemli unsuru olarak öne çıkar ve insan benzeri zekâya sahip bilgisayar sistemleri oluşturma amacını taşır. Yapay zekâ algoritmaları,

büyük verileri analiz edebilme, işleyebilme, öğrenebilme ve karar verme yeteneklerine sahiptir. Bu sayede, üretim süreçlerindeki karmaşık ilişkileri ve desenleri algılayabilir ve gelecekteki sonuçları tahmin edebilir, tedarik zinciri verimliliği artırılabilir, maliyetler düşürülebilir ve müşteri memnuniyeti sağlanabilir (Arvindhan, 2021). Tedarik zinciri yönetiminde yapay zekâ algoritmaları, talep tahmini, envanter yönetimi ve lojistik optimizasyonu gibi alanlarda etkili bir şekilde kullanılabilir. Geçmiş satış verilerini analiz ederek satış tahminleri yapma yeteneği, üretim planlamasında önemli bir rol oynar. Aynı zamanda, makine öğrenimi veri analizi ve baskı kontrol skalalarını tanıma yetenekleriyle üretim süreçlerini büyük ölçüde etkiler. Gerçek zamanlı verileri sensörlerden ve diğer kaynaklardan analiz ederek, makine öğrenimi modelleri, üretim hatlarının performansını izleyebilir ve potansiyel sorunları tespit edebilir. Bu sayede, bakım süreçleri optimize edilebilir ve üretim sürekliliği sağlanabilir. Kalite, maliyet ve zaman yönetimi, yeni teknolojilerin kullanılması durumunda önemli potansiyeller sunmaktadır (García ve García, 2019).

Tıbbi teşhislerde kullanılan yapay zekâ modelleri, hastalıkları teşhis etme ve tedavi planları önerme konusunda doktorlara yardımcı olabilir. Ayrıca, lojistik yönetiminden basım sektörüne kadar birçok alanda yapay zekâ ve makine öğrenimi uygulamaları mevcuttur. Bu teknolojiler, işletme verimliliğini artırma ve rekabet etmede avantaj sağlar. Gelecekte yapay zekâ ve makine öğrenimi teknolojilerinin daha da gelişmesiyle birlikte, Endüstri 4.0'un etkisi derinleşecek ve iş dünyasında yeni fırsatlar yaratmaya devam edecektir (Javaid ve ark., 2022).

2.1.2.5. Otonom karar verme

Endüstri 4.0'ın bir diğer önemli prensibi otonom karar vermektir. Yapay zekâ ve makine öğrenimi teknikleri kullanılarak, karmaşık verileri analiz edilir ve otomatik olarak kararlar alır. Bu prensip, üretim süreçlerinde insan müdahalesini azaltırken aynı zamanda hızlı tepkilerin sağlanmasını mümkün kılar. Sistemler, karmaşık veri kümelerini analiz ederek en uygun üretim parametrelerini belirleyebilir ve üretimi optimize ederek verimliliği arttırır (Terziyan ve ark., 2018).

Endüstri 4.0'ın otonom karar verme prensibi, geleneksel üretim sistemlerindeki insan odaklı karar verme süreçlerinin yerine geçer. Gelişmiş sensörler, veri toplama cihazları ve iletişim ağları aracılığıyla üretim ortamından elde edilen büyük miktardaki veriler, AI

algoritmaları ve makine öğrenimi modelleri tarafından analiz edilir. Bu analiz süreci, veriler arasındaki ilişkileri ve kalıpları tespit etmeyi sağlar. Otonom karar verme, fabrikalarda üretim süreçlerinin optimize edilmesine yardımcı olur. Örneğin, bir sensör arızalandığında veya bir makine arıza verdiğinde, otonom sistemler bu durumu algılayarak ilgili birimlere bildirim gönderir ve hızlı bir şekilde müdahale edilmesini sağlar (Duan ve Xu, 2021).

Otonom karar verme prensibi, Endüstri 4.0'ın üretim süreçlerinde etkili bir dönüşüm sağlar. Bu prensip, AI ve makine öğrenimi kullanılarak gerçekleştirilen bir yetenektir. Endüstri 4.0 kapsamında, otonom karar verme prensibi yalnızca imalat süreçlerinde değil, aynı zamanda tedarik zincirinin yönetiminde de kritik bir rol oynar. Gerçek zamanlı veri izleme ve analiz, daha doğru talep tahminleri ve optimize edilmiş stok yönetimi sağlar. Otonom karar verme, üretim verimliliğini artırır, hataları azaltır ve anlık çözümler sunar. Ancak başarılı bir uygulama için güvenilir algoritmalar, doğru veri analizi ve etkili iş gücü yönetimi stratejileri gereklidir (Derya, 2018).

2.1.2.6. Sanal simülasyon

Endüstri 4.0, üretim süreçlerini bilgisayar tabanlı sanal simülasyonlar aracılığıyla modelleme olanağı sunar. Bu yaklaşım, yeni ürünlerin ve üretim yöntemlerinin önceden test edilmesini, potansiyel hataların erken tespit edilmesini ve verimlilik analizlerinin yapılmasını mümkün kılar. Sanal simülasyon, Endüstri 4.0'ın temel bir unsuru olarak, fiziksel süreçleri bilgisayar ortamında taklit ederek çeşitli senaryoları test eder. Bu teknoloji, üretim süreçlerini dijitalleştirme ve bilişim teknolojileriyle entegre etme konusunda kilit bir rol oynar. Bu sayede, yeni ürünler ve üretim yöntemleri gerçek dünya uygulamalarına geçmeden etkili şekilde değerlendirilebilir (Öztemel ve Gursev, 2018).

Üretim süreçlerinde meydana gelebilecek hataların gerçek dünyada telafisi zor ve maliyetlidir. Ancak, sanal simülasyonun kullanılmasıyla süreçler sanal ortamda test edilebilir ve analiz edilebilir, bu da potansiyel hataların önceden belirlenmesine olanak tanır. İşletmelere, gerçek dünyada hataların önüne geçmek için gerekli önlemleri alma şansı verir. Üretim hattındaki iş akışını iyileştirmek veya kaynakları daha etkili bir biçimde kullanmak amacıyla çeşitli senaryoları test etmek mümkündür. Bu analizler işletmelerin verimliliğini artırmasına, maliyetleri düşürmesine ve rekabet avantajı elde etmesine olanak tanır (Schneider, 2018).

Sanal simülasyonun eğitim ve yetenek geliştirme alanında önemli bir rolü vardır. Üretim süreçlerinin sanal ortamlarda simüle edilmesi, çalışanların becerilerini artırmalarını ve yeni teknolojilere uyum sağlamalarını sağlar. Sanal simülasyonlar, gerçek dünya senaryolarını deneyimleyerek çalışanlara daha iyi bir hazırlık sunar. Ayrıca, karmaşık süreçlerin anlaşılması ve yeni becerilerin kazanılması için eğitimde kullanılarak, Endüstri 4.0'ın bir parçası olarak üretim süreçlerinde önemli değişikliklere yol açar. İşletmelere, yeni ürünlerin ve üretim yöntemlerinin test edilmesi, hataların önceden tespit edilmesi ve verimlilik analizleri gibi avantajlar sunar (Azarian ve ark., 2021).

2.1.3. Endüstri 4.0'ın getirdiği avantajlar

Endüstri 4.0, üretim gerçekleştirilen sektörlerde önemli avantajlar sunmaktadır. Bu dönüşüm, üretim yapan şirketlere yüksek kâr oranları, artan verimlilik seviyeleri ve daha kaliteli, iyileştirilmiş çalışma koşulları gibi birçok fayda sağlamaktadır (Hofmann ve Rüsch, 2017). Verimlilik, esneklik, kişiselleştirme, büyük veri analitiği, insan-makine iş birliği ve sürdürülebilirlik gibi alanlarda sağlanan gelişmeler, işletmelerin rekabetçiliğini artırarak daha yenilikçi ve verimli bir üretim ortamı oluşturur. Bu sebeple, şirketlerin Endüstri 4.0'a uyum sağlamaları ve bu teknolojileri etkin bir şekilde kullanmaları önemlidir. Endüstri 4.0 uygulamaları, ürün, malzeme, enerji ve kaynak tahsisinde akıllı ve birbiriyle bütünleşmiş değer oluşturma aşamalarında etkili şekilde kullanılabilir (Stock ve Seliger, 2016). Endüstri 4.0, üretim sektöründe sağladığı avantajlardan bazıları:

2.1.3.1. Verimlilik artışı

Geleneksel üretim sistemleri, zayıf çevre dengesi ve sürdürülebilirlikle ilgili çeşitli sorunlarla bilinir. Bu sistemler, daha yüksek kaynak tüketimi, küresel ısınma, genel çevresel bozulma ve artan çevre kirliliği gibi sorunları beraberinde getirir. Bu durum, çevresel etkilerin gözlemlendiği ve sürdürülebilirlik açısından zayıf olan geleneksel üretim sistemleri ve teknolojilerindeki tekrarlanan sorunları vurgular (Tseng ve ark., 2018). Otomasyon, dijitalleşme ve veri analitiği, üretim süreçlerinde verimliliği artırmanın yanı sıra maliyetleri düşürme potansiyeli de sunar. Bu teknolojilerin entegrasyonu sayesinde hatalar en aza indirilir, verimsizlikler giderilir ve süreçler daha hızlı hale gelir. Günümüzde ülkeler ve işletmeler, rekabet avantajı ve sürdürülebilir büyüme için sürekli verimliliklerini artırmaya odaklanmaktadır (Kasa ve Arslan, 2020).

Bu bağlamda, otomasyon, dijitalleşme ve veri analitiği gibi teknolojik yeniliklerin kullanımı giderek daha önemli hale gelmektedir. Endüstri 4.0 perspektifi, Türkiye'nin üretim ekonomisinde rekabet avantajı elde etme, sürdürülebilirlik sağlama ve katma değeri yüksek ürün ve hizmetler üretme çabalarını simgeliyor. Bu yaklaşımın etkisiyle, üretim sektörlerinde beklenen verimlilik artışının %4 ila %7 arasında olması öngörülmektedir (Yıldız, 2018).

Otomasyon, dijitalleşme ve veri analitiği, üretim süreçlerinin verimliliğini artırmak için kilit araçlardır. Otomasyonun yaygın kullanımı, insan hatalarını azaltarak süreçlerin tekrarlanabilirliğini ve tutarlılığını artırır. İşletmeler, otomasyon sayesinde işgücü maliyetlerini düşürebilir ve üretim hatalarının neden olduğu maliyetleri en aza indirebilir. Otomasyon, tekrarlayan ve rutin görevleri otomatikleştirerek çalışanların daha stratejik ve değerli faaliyetlere odaklanmasını sağlar. Bu durum iş döngüsü verimliliğini artırır ve işletmelerin rekabet avantajını güçlendirir (Duan ve Xu, 2021). Ağ tabanlı sistemler, üretim ekipmanları, sensörler, aktüatörler ve diğer bileşenler arasında iletişim kurabilen ve veri paylaşımını sağlayan bir altyapı sağlar. Bu sayede, üretim süreçlerindeki verimlilik artar, hata oranı azalır ve kaynaklar daha etkin bir şekilde kullanılarak işletmelere rekabet avantajı sağlayacak ve üretim süreçlerini daha sürdürülebilir hale getirilecektir (Schneider, 2018).

Dijitalleşme, işletmelerin üretim süreçlerini dijitalleştirerek verileri gerçek zamanlı takip edip analiz edebilmelerine olanak tanır. Veri analitiği ve iş zekâsı araçlarıyla bu verileri anlamlı bilgilere dönüştürerek, işletmeler süreçlerindeki verimliliği artırabilir, darboğazları belirleyebilir, verimsizlikleri tespit edebilir ve iyileştirme fırsatlarını tanımlayabilir. Ayrıca, tahmini analizler ve geleceğe yönelik trend değerlendirmeleri, işletmelere talepleri öngörmelerinde ve süreçlerini buna göre planlamalarında yardımcı olur. Bu, stok yönetimi, talep tahmini, üretim planlaması, israfın azaltılması ve kaynakların daha etkin kullanılması gibi alanlarda verimlilik artışını beraberinde getirir. Gelecekte, otomasyon, dijitalleşme ve veri analitiği gibi teknolojik yeniliklerin rolü daha da artacak, işletmelerin verimliliklerini artırmalarına destek olacaktır (Wang, 2018).

2.1.3.2. İyileştirilmiş ürün kalitesi

4.Sanayi Devrimi'ne geçişin farklı yönleri ve hızı öngörülmekte zorlu bir süreçtir, ancak kesinlikle imkânsız değildir. Mevcut durumun daha fazla evrim geçirmesiyle birlikte,

dünya genelinde üretim ve tüketim alanlarında önemli değişikliklere şahit olma olasılığımız oldukça yüksektir. Bu evrim, çok çeşitli işlevleri içeren kapsamlı bir dönüşümü beraberinde getirecektir (Fırat ve Fırat, 2017).

Endüstri 4.0 teknolojileri, otomasyon ve sensör teknolojilerini kullanarak üretim hatlarındaki her işlemi izleyip analiz ederek daha fazla kontrol sağlar. Bu sayede potansiyel hatalar önceden tespit edilir ve ürün kalitesi artırılır. Endüstri 4.0 teknolojileri, üretim süreçlerindeki kontrolü yükseltir, gerçek zamanlı veri analitiği ile ürün kalitesini iyileştirir ve otomasyon, veri analitiği, yapay zekâ ve internet bağlantılı cihazların birleşimiyle fabrikaları daha akıllı hale getirir. Bu teknolojilerin benimsenmesi, şirketlerin rekabet gücü artırılması ve müşterilerin beklentilerinin karşılanması için kritik pay sahibidir (Maresova ve ark., 2018).

Sensörler ve diğer veri toplama cihazları, üretim sürecinden büyük miktarda veri toplar. Gerçek zamanlı analitik algoritmalarıyla işlenen bu veriler, anlamlı bilgilere dönüştürülür. Örneğin, otomotiv fabrikasında motor parçalarının üretiminde sensörler kullanılarak hatalar tespit edilebilir ve bu veriler anında analiz edilerek hatalara müdahale edilebilir. Bu teknolojilerin uygulanması, üretim hatlarında daha fazla kontrol ve izleme sağlar, hataların önceden tespit edilmesini mümkün kılar (Terziyan ve ark., 2018).

2.1.3.3. Esnek üretim

Endüstri 4.0 ile otomasyon ve dijital teknolojiler, matbaalarda esnek üretim ve özelleştirme imkânlarını artırmaktadır. Üretim süreçlerinin ölçeklendirilmesi, üretim hattı değişikliklerine hızlı adaptasyon ve özelleştirme imkânları, işletmelere rekabet avantajı sağlamakta ve müşteri ihtiyaçlarına daha iyi cevap verebilmelerini sağlamaktadır. Matbaalarda, üretim kapasitesini artırmak veya azaltmak için makine ve ekipmanların fiziksel olarak yeniden düzenlenmesine gerek kalmamaktadır. Otomasyon sayesinde, üretim hatlarının hızlı bir şekilde yeniden programlanması ve kapasite değişikliklerine uyum sağlaması mümkün olmaktadır. Bu da işletmelere esneklik sağlamakta ve üretim aşamalarını verimli bir düzeye çıkarmaktadır (Bajic ve ark., 2021).

Endüstri 4.0 ve akıllı fabrika kavramları, üretim hattı değişikliklerine hızlı adaptasyon sağlama konusunda önemli bir gelişme sunmaktadır. Sensörler, veri analitiği, bulut bilişim ve yapay zekâ gibi teknolojilerin entegrasyonu, fabrikalara gerçek zamanlı veri

toplama ve analiz yeteneği kazandırmaktadır. Bu, üretim süreçlerini anlık olarak izleme, analiz etme ve gerektiğinde değişiklik yapma kolaylığı sağlar. Potansiyel sorunları veya performans düşüşlerini hızlı bir şekilde belirleyip, müdahale edilmesi gereken noktaları tespit ederek, üretim süreçlerini optimize etmek mümkün olur (Öztemel ve Gursev, 2018). Esnek üretim, aynı zamanda özelleştirme imkânlarını da artırmaktadır. Geleneksel seri üretim yerine, müşteri taleplerine göre özelleştirilmiş ürünlerin üretimi daha yaygın hale gelmektedir. Endüstri 4.0'ın sağladığı teknolojik altyapı sayesinde, fabrikalar daha çeşitli ürünler üretebilir ve üretim süreçlerini müşteri ihtiyaçlarına göre ayarlayabilir. Bu da müşteri memnuniyetini artırırken, rekabet avantajı sağlama ve yeni pazar fırsatlarını değerlendirme imkânı sunmaktadır (Arvindhan, 2021).

Matbaalar Endüstri 4.0'ın sağladığı fırsatları ve avantajları değerlendirirken, uygun stratejileri ve planlamaları yaparak dönüşüm sürecini başarıyla yönetebilirler. Bununla birlikte, bu dönüşümün esnek üretim için sağladığı avantajlar yanında getirdiği zorlukların da göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Öncelikle, bu yeni teknolojileri benimsemek ve uygulamak için yüksek maliyetler ve zaman gerekmektedir. Bu dönüşüm sürecinde, işletmelerin değişime uyum sağlayabilmeleri için teknolojik altyapılarını güncellemeleri kaçınılmazdır. Bu hedefe ulaşmak için, karmaşık yapıları entegre etmek amacıyla nesnelerin internetine, bulut bilişim sistemlerine, siber-fiziksel sistemlere, AI uygulamalarına ve dijital uygulamalara yatırım yapmak, işletmelerin öncelikli görevi haline gelmiştir. (Şekkeli ve Bakan, 2018). İşletmelerin üretim sistemlerini dönüştürmek ve yeni teknolojileri entegre etmek için uygun kaynaklara ve yeteneklere sahip olmaları gerekmektedir. Ayrıca, otomasyonun artmasıyla iş gücü ihtiyacı da değişmektedir ve işletmeler çalışanlarını bu yeni süreçlere uyum sağlaması için eğitmek ve yeni becerilere yatırım yapmak zorunda kalabilir (Azarian ve ark., 2021).

2.1.4. Endüstri 4.0 uygulama zorlukları

Endüstri 4.0'ın uygulanması, çeşitli zorlukları içermektedir ve genellikle teknolojik, yönetimsel ve operasyonel alanları etkileyebilir. Teknolojik açıdan, farklı üreticilerden gelen endüstriyel cihazların uyumsuzluğu, büyük veri setlerinin etkili bir şekilde analiz edilmesi ve uyumlu bir şekilde kullanılması, karmaşık algoritmaların oluşturulması ve optimize edilmesi gibi zorluklarla karşılaşılabilir. Aynı zamanda, Endüstri 4.0'a geçiş için gereken yatırımların karşılanamaması, uzmanlık gerektiren yeni teknolojilere hâkim

personel eksikliği, veri güvenliği ve siber güvenlik konularındaki endişeler gibi yönetimsel sorunlar da ortaya çıkabilir. Bu bağlamda, Endüstri 4.0'ın başarılı halde uygulanabilmesi için teknolojik, yönetimsel ve operasyonel alanlarda çeşitli mücadelelere karşı etkili çözümler geliştirilmesi önemlidir (Bajic ve ark., 2021).

2.1.4.1. Yönetimsel Endüstri 4.0 uygulama zorlukları

Endüstri 4.0'ın zorlukları genellikle yönetimsel düzeyde ortaya çıkar. Sistematik bir literatür taraması, Endüstri 4.0'ın yönetimsel açıdan planlama ve uygulama, strateji ve analiz, iş modelleri, iş birliği ve ağlar, insan kaynakları ile değişim ve liderlik olmak üzere altı ana kümeye ayrıldığını göstermektedir. Bu yönetimsel zorluklar, genellikle Endüstri 4.0 kavramının genel uygulanmasıyla veya belirli I4.0 teknoloji kategorilerinin tanımlanmış konseptlerinin uygulanmasıyla ilişkilidir. Bu sorunlar, genel Endüstri 4.0 uygulamasının yanı sıra belirli teknoloji kategorilerinin başarılı bir şekilde entegrasyonunu engelleyebilir. Bu bağlamda, yöneticilerin bu kritik altı kümeyi etkili bir şekilde yönetmeleri, Endüstri 4.0'ın benimsenmesinin başarısı için önemlidir. (Schneider, 2018).

2.1.4.2. Teknolojik Endüstri 4.0 uygulama zorlukları

Endüstri 4.0'ın uygulanmasında karşılaşılan zorluklar, belirli teknolojik sorunlara odaklanmaktadır. Bu zorluklar arasında cihaz uyumsuzluğu, veri uyumsuzluğu, analiz zorlukları ve algoritma geliştirme gibi teknolojik konular bulunmaktadır. Bu çerçeve, Endüstri 4.0 uygulama zorlukları için teknoloji kategorilerini içermektedir. Analiz sonuçları, SFS, IoT, Büyük Veri Analitiği (BDA), bulut bilişim, sis ve uç bilişim, AR, VR, robotik, siber güvenlik, semantik web teknolojileri gibi ana kategorilere odaklandığını göstermektedir. Bu teknoloji kategorileri, Endüstri 4.0 uygulamaları için türetilmiş çerçevenin zorluklarını ortaya koymaktadır. Bu tür zorluklar, genellikle belirli bir teknoloji kategorisinin uygulanmasıyla ilgili olup, her biri çeşitli uygulama zorluklarını içerebilir (Rikalovic ve ark., 2022).

Bajic ve ark. (2021) tarafından yürütülen Endüstri 4.0 uygulamasına dair makale analizi, 55 yönetimsel zorluğu belirlemiştir. Bu zorluklar genel olarak 23 Endüstri 4.0 uygulama zorluğu ve belirlenmiş I4.0 teknoloji kategorilerinin uygulanması için 32 uygulama zorluğunu içermektedir. Bu sonuçlar, Endüstri 4.0'ın genel uygulanması ile belirli

teknoloji kategorilerinin uygulanması arasında farklılık gösteren zorluklara dikkat çekmektedir.

2.2. Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri ve Sürdürülebilir Üretim Kavramı

Birleşmiş Milletler Üye Devletleri tarafından 2015 yılında kabul edilen 2030 sürdürülebilir Kalkınma Gündemi, dünya genelinde barış ve refahı sağlamak için bir yol haritası sunmaktadır. Bu kapsamlı plan, Şekil 2.5'te vurgulanan 17 Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi (SDG) üzerine kuruludur. Bu hedefler, yoksulluk ve sosyal eşitsizlikleri sona erdirmek, sağlık ve eğitimi geliştirmek, eşitsizlikleri azaltmak ve ekonomik büyümeyi desteklemek amacıyla gelişmiş ve gelişmekte olan tüm ülkelerin acil eylemler almasını öngörmektedir. Ayrıca, küresel çabaların bir parçası olarak, iklim değişikliği ile mücadele ve doğal kaynakların korunması da bu hedefler arasında yer almaktadır (BM, 2015).



Şekil 2.5. Sürdürülebilir kalkınma için küresel amaçlar (BM, 2015)

Sürdürülebilirlik, geniş bir disiplinler arası bağlamda önemli bir kavramdır. Birleşmiş Milletler Dünya Çevre Kalkınma Komisyonu Bruntland Raporunda, sürdürülebilirliği gelecek nesillerin ihtiyaçlarını karşılama kabiliyetinden ödün vermeden bugünün ihtiyaçlarını karşılamak olarak tanımlamaktadır. Birçok alanda kullanılan ve aranan bir terim olmasını, farklı disiplinlerle sıkı bir ilişki içinde olmasına borçludur (Ghobakhloo ve Fathi, 2021). Sürdürülebilir üretim, kaynakların etkili ve verimli bir şekilde kullanıldığı, çevreye ve topluma zarar vermeden üretim faaliyetlerinin sürdürüldüğü bir yaklaşımdır. Bu kavram hem çevresel hem de sosyal açılardan sürdürülebilirlik ilkelerini

benimser ve gelecek nesillerin ihtiyaçlarını da göz önünde bulundurur (Longoni ve Cagliano, 2018). Sürdürülebilir üretim, kaynakların tükenmemesini, atıkların minimize edilmesini, çevre kirliliğinin azaltılmasını ve insan sağlığına zarar verilmemesini hedeflemektedir (Chiarini, 2021). Günümüzde, Tablo 2.3'de gösterildiği üzere üretim paradigmasının gelişim evrelerinde sürdürülebilir üretim, sürecin son aşaması olarak kabul edilmektedir (Jovane ve ark., 2003).

Tablo 2.3. Üretim paradigmalarının evrimi (Jovane ve ark., 2003; akt. Özenir ve Nakıboğlu, 2019)

Paradigma	Zanaatkârlığa dayalı üretim	Kitle Üretimi	Esnek Üretim	Kitle Özelleştirme ve Kişiselleştirme	Sürdürülebilir Üretim
Başlangıcı	**~1850**	**1913**	**~1980**	**2000**	**2020-?**
Toplum ihtiyacı	Kişiye özel ürünler	Düşük maliyetli ürünler	Ürün çeşitliliği	Kişiye özel ürünler	Temiz ürünler
Pazar	Ürün başına oldukça küçük	Talep>Arz Sürekli talep	Arz>Talep Ürün başına küçük hacimler	Küreselleşme Dalgalı talep	Çevre
İş modeli	Çekme Sat–Tasarla–Üret–Montaj	İtme Tasarla–Üret–Montaj–Sat	Çekme-İtme Tasarla - Üret – Sat - Montaj	Çekme Tasarla - Sat - Üret - Montaj	Çekme Çevre için tasarla - Sat - Üret - Montaj
Teknoloji sağlayıcı	Elektrik	Değiştirilebilir parçalar	Bilgisayarlar	Bilgi teknolojisi	Nano / Bio / Malzeme Teknolojisi
Süreç sağlayıcı	Takım tezgâhları	Hareketli montaj ve özel işleme hatları	Esnek Robotlar	Yeniden yapılandırılabilir üretim sistemleri	Üretimde artış

Sürdürülebilir üretimin ana hedefleri arasında aşağıdaki noktalar bulunur:

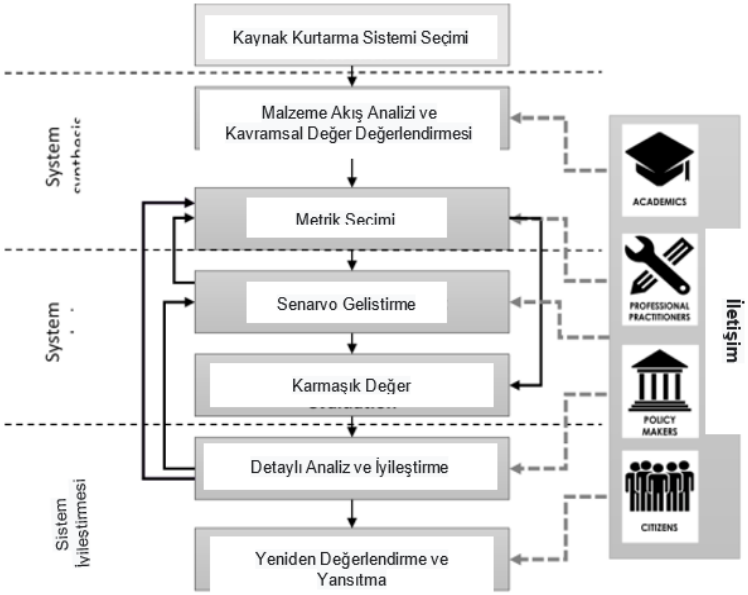
2.2.1. Atık yönetimi

Dünya genelindeki şehirlerin hızlı büyümesi, genişleyen ekonomilerini desteklemek adına büyük miktarda kaynağa (inşaat malzemeleri, gıda, temiz su, gaz, petrol, elektrik vb.) bağımlılıklarını artırmaktadır. Şehirler, termodinamik sistemler olmaları nedeniyle, kaynakların sürekli tüketilmesi kaçınılmaz bir sonuç doğurmakta ve bu durum atık malzemelerin, atık suyun ve kirli havanın oluşmasına yol açmaktadır. Bu durum, sürdürülebilir kaynak yönetimi ve çevresel etkilerin azaltılması açısından önemli bir zorluk ortaya çıkarmaktadır (Tseng ve ark., 2020). Sürdürülebilir üretim, atık miktarını en aza indirmeyi amaçlar. Bu hedef doğrultusunda, atıkların kaynaklardan çıktığı noktada azaltılması, geri dönüşüm ve yeniden kullanım gibi yöntemlerle atıkların yeniden değerlendirilmesi ve doğaya zarar vermeyen bir şekilde bertaraf edilmesi önem taşır. Bu

yaklaşım, çevre kirliliğini azaltarak doğal ekosistemlere zarar verilmesini engeller. Atık azaltma önlemleri, sürdürülebilir üretim ve çevre koruma stratejilerinde merkezi bir rol oynar, çünkü atıkların kaynağında azaltılması, geri dönüşüm ve yeniden kullanım ile doğa dostu bir yöntemle bertaraf edilmesi, kaynakların daha etkili bir şekilde kullanılmasını sağlar ve ekosistemleri korur (Sharma ve ark., 2020).

Sürdürülebilir üretim, çevreye zarar vermeden ve doğal kaynakları koruyarak mal ve hizmetlerin üretilmesini sağlayan bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım, atık miktarını en aza indirerek kaynakların verimli kullanılmasını hedefler. Sürdürülebilir üretim süreçlerinde, atık oluşumunu önlemek veya azaltmak için tasarım aşamasından başlayarak çeşitli stratejiler uygulanır (Awasthi ve ark., 2021). Üretim süreçlerinde atık azaltma için birkaç strateji bulunmaktadır. İlk olarak, malzeme seçimi aşamasında geri dönüşüme uygun malzemelerin tercih edilmesi önemlidir. Bu şekilde, malzemelerin gelecekteki değerlendirme ve geri kazanım potansiyeli artırılır. İkinci olarak, üretim süreçlerinde verimliliği artırmak için enerji ve su tasarrufu önlemleri alınabilir. Bu hem kaynakların daha etkili bir şekilde kullanılmasını sağlar hem de atık miktarını azaltır. Üçüncüsü, atık yönetimi süreçlerinin bütünleştirilmesiyle atık miktarı azaltılabilir. Geri dönüşüm ve yeniden kullanım gibi yöntemlerle atıkların değerlendirilmesi, yeniden işlenmesi ve kaynak kullanımının azaltılması ile sürdürülebilir atık minimizasyonu sağlanabilir (Hussain ve ark., 2021).

Atıkların etkili yönetimi, sürdürülebilirlik açısından hayati bir öneme sahiptir. Geri dönüşüm ve yeniden kullanım, atıkların çevreye zarar vermeden tekrar değerlendirilmesini sağlayan etkili stratejilerdir. Geri dönüşüm, atıkların geri kazanılması ve üretim süreçlerinde tekrar kullanılması anlamına gelir. Plastik, kâğıt, cam, metal gibi malzemeler geri dönüştürülerek yeni ürünlerin hammaddesi olarak kullanılabilir. Bu yöntem, doğal kaynak tüketimini azaltır, enerji tasarrufu sağlar ve çevre kirliliğini önler. Yeni geliştirilen ve Şekil 2.6'da gösterilen Kaynak Kurtarmanın Karmaşık Değer Optimizasyonu (CVORR) yaklaşımı, atık sistemlerinin sürdürülebilir yönetimi ve döngüsel potansiyeli ile ilgili zorluklar ve koşullar hakkında kapsamlı bir anlayış sağlamaktadır (Iacovidou ve ark., 2017).



Şekil 2.6. CVORR çerçevesi (Iacovidou ve ark., 2017)

Atık azaltma çabalarıyla birlikte, doğaya zarar vermeyen atık imha yöntemleri de büyük önem taşır. Atıkların yanlış bir şekilde bertaraf edilmesi çevre kirliliğine, toprak ve su kaynaklarının tahrip olmasına neden olabilir. Bu nedenle, doğaya zarar vermeyen imha yöntemleri kullanılmalıdır (Mahanta ve Rafizul, 2019). Atıkların uygun şekilde bertaraf edilmesi için birkaç yöntem vardır. Bunlardan biri, atıkların düzenli depolama sahalarında kontrol altında tutulmasıdır. Bu sahalar, çevreye zarar vermeden atıkların toplanması ve uzun vadeli depolanması için özel olarak tasarlanmıştır. Düzenli depolama sahalarında atıkların çevreyle temas etmesi ve yayılması önlenir. Atık depolama, dünyada kentsel katı atıklarının (MSW) bertaraf edilmesine yönelik en yaygın önlemlerden biridir (Kaza ve ark., 2018). Diğer bir imha yöntemi ise atıkların termal işlem veya biyolojik işlem gibi teknolojilerle enerji üretimi amacıyla kullanılmasıdır. Atıkların yakılması veya biyolojik olarak ayrıştırılması sonucunda enerji üretimi sağlanabilir. Bu yöntemler hem atıkların hacmini azaltır hem de enerji kaynaklarının sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasını sağlar (Öztürk ve Özgüven, 2022).

Matbaacılar, yayıncılar ve ambalaj şirketleri, üretim sonrası atık sorunuyla uğraşmak zorundadır. Basım endüstrisindeki farklı atık türleri farklılıklar gösterir. Örneğin, baskı makineleri üretim sırasında büyük miktarlarda atık kâğıt, mürekkep ve çeşitli solüsyonlar oluşturur. Bu atıkların uygun şekilde bertaraf edilmesi, tekrar üretimde kullanılabilecek malzemelerin geri dönüşüme gönderilmesi gerekmektedir.

Atık azaltma, sürdürülebilir üretimin temel prensiplerinden biridir. Atıkların kaynaklardan çıktığı noktada azaltılması, geri dönüşüm ve yeniden kullanım gibi yöntemlerle atıkların yeniden değerlendirilmesi ve doğaya zarar vermeyen bir şekilde bertaraf edilmesi, çevre kirliliğinin azaltılmasında ve doğal ekosistemlere zarar verilmesinin engellenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Richardson'a (2011) göre atıkların azaltılmasına yönelik uygulanması gereken önlemler;

- Üretilen ürünlerin ekonomik ömürlerinin daha uzun olarak geliştirilmesi; tekrar tekrar onarımı yapılabilen, yeniden kullanılabilmesi ve tekrar üretilebilen yüksek kaliteli ürünlerin tasarlanması,
- Son kullanım kısıtlı ürünlerin kompost hale gelebilmesi, toksik olmaması ve çevre bakımından faydalı olan veya zararlı etkisi olmayan malzemelerin tercih edilmesi,
- Geri dönüştürme, ileri dönüşüm veya yeniden üretme yoluyla sağlam bir yeniden kullanım sisteminin oluşturulması.

Sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için atık azaltma stratejilerine odaklanmak ve doğaya duyarlı üretim ve bertaraf yöntemlerini benimsemek, gelecek nesillerin yaşayabileceği sağlıklı bir çevrenin korunmasına katkı sağlayacaktır (Jayal ve ark., 2010).

2.2.2. Çevresel etkilerin azaltılması

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması ve çevre dostu malzeme ile ürünlerin üretilmesine yönelik teknolojik gelişmeler, teknolojinin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılmasına önemli ölçüde katkıda bulunacağı yollar arasındadır (Berawi, 2019). Geçmişteki teknolojik yenilikler kaynak tüketim oranını azaltmadığından, verimliliği artırmanın dünyamız sınırları dâhilinde herkes için iyi bir yaşam sağlamak için nihai çözüm olamayabileceği endişesini artırmaktadır. İnsan ihtiyaçlarını karşılayacak etkili sistemler kurulmalı, ardından çevresel verimlilik için optimize edilmelidir (Hu ve ark., 2017). Sürdürülebilir üretim, üretim süreçlerinin ve ürünlerin kullanımının çevresel etkisini azaltmayı hedefler. Bu yaklaşım, üretim süreçleri ve ürünlerin kullanımı sırasında ortaya çıkan emisyonlar, su kullanımı ve diğer çevresel etkiler minimize edilerek iklim değişikliği, su kaynaklarının tükenmesi ve çevre kirliliği gibi sorunlarla mücadele edilebilir (De Ron, 1998). Günümüzde çevresel sorunlar, iklim değişikliği, su kaynaklarının tükenmesi ve çevre kirliliği gibi faktörler, dünya genelinde büyük bir

endişe kaynağı haline gelmiştir. Bu sorunlar, insan etkinliklerinin bir sonucu olarak ortaya çıkmış ve doğal ekosistemler üzerinde ciddi etkilere yol açmıştır. Bu bağlamda, sürdürülebilir üretim kavramı, çevresel etkiyi azaltmayı hedefleyen bir yaklaşım olarak ön plana çıkmıştır (McMichael ve ark., 2003).

Kaynakları verimli bir şekilde kullanma, enerji tasarrufu sağlama, atıkları azaltma ve yenilenebilir kaynaklara yönelme gibi prensiplere dayanır. Sürdürülebilir üretim, endüstriyel faaliyetlerin çevreye olan etkisini minimize ederken, aynı zamanda ekonomik büyüme ve sosyal refahın sürdürülmesini de hedeflemektedir (De Ron, 1998). Üretim süreçlerinin çevresel etkisini azaltma amacıyla, çeşitli önlemler alınabilir. Örneğin, enerji verimliliğini artırmak için üretim hatları yeniden düzenlenebilir, enerji tasarruflu ekipmanlar kullanılabilir ve yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş sağlanabilir. Ayrıca, atık miktarını azaltmak için geri dönüşüm ve yeniden kullanım önlemleri alınabilir. Ürünlerin kullanım aşamasında ise enerji tasarrufu sağlayan ürünler tercih edilebilir ve tüketicilere bilinçli kullanım konusunda bilgilendirme yapılabilir. Sürdürülebilir ekonomik büyümenin sağlanması, iş süreçlerinde değişiklik yapılmasını gerektirecektir. Sektörlerin enerji ve kaynak verimliliğine sahip olması ve atıkları en aza indirmesi gerekmektedir. (Toker, 2018).

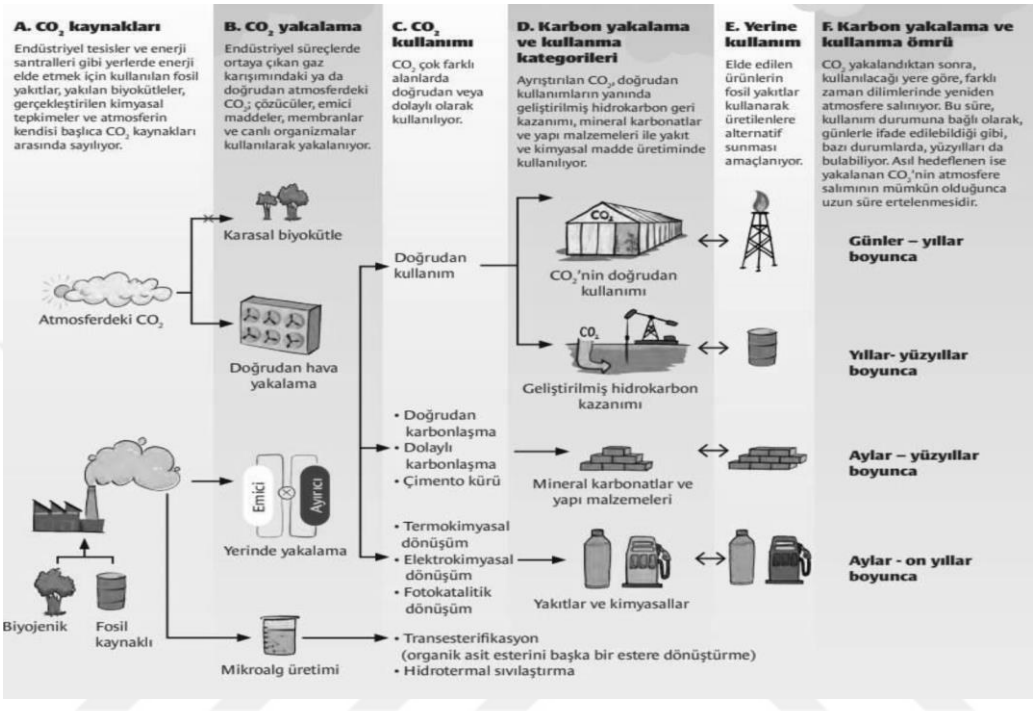
İklim değişikliği, günümüzde dünyanın karşılaştığı en önemli çevresel sorunlardan biridir. Değerlerinin uzun bir süre boyunca hesaplanan yağış ve sıcaklık gibi meteorolojik unsurların ortalama değerlerinde meydana gelen önemli değişiklikler olarak tanımlanır. (WMO, 1992). Fosil yakıtların kullanımı, endüstriyel faaliyetler ve ormansızlaşma gibi etkenler, sera gazı emisyonlarının artmasına ve atmosferdeki sera gazı derişimin yükselmesine yol açmaktadır. Küresel düzeyde iklimde meydana gelen önemli değişikliklerin, küresel atmosferin bileşimini değiştiren artan insan faaliyetlerinin sonucu olduğunu göstermektedir (Change, 2014). Sürdürülebilir üretim, iklim değişikliği ile mücadele etmede önemli rol oynayarak enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik geçiş gibi önlemlerle sera gazı emisyonlarını azaltmayı hedeflemektedir. Enerji verimliliği, üretim süreçlerinde daha az enerji kullanılmasını ve böylece daha az sera gazı emisyonunun ortaya çıkmasını sağlar. Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıtların kullanımını azaltarak iklim değişikliğine katkıda bulunan bir faktörü ortadan kaldırır (Mathy ve ark., 2018).

Su kaynaklarının tükenmesi, dünya genelinde büyük bir sorun haline gelmiştir. İklim değişikliği, artan nüfus ve su kaynaklarının yanlış kullanımı, su kaynaklarının azalmasına ve su kıtlığı sorununun ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Ayrıca 2050 yılına gelindiğinde dünya nüfusunun 2/3'ünün su sıkıntısı koşullarıyla karşı karşıya kalabileceği tahmin edilmektedir (Gosain ve ark., 2006). Sürdürülebilir üretim, su kaynaklarının tükenmesiyle mücadelede önemli bir role sahiptir ve su kullanımını minimize etmeyi amaçlar. Üretim süreçlerinde su tasarrufunu sağlayan teknolojilerin kullanımı ve su geri dönüşümü, sürdürülebilir su yönetimi için etkili araçlardır. Ayrıca, üretimde kullanılan kimyasalların su kaynaklarına olan etkisinin değerlendirilmesi ve çevre dostu alternatiflerin tercih edilmesi, su kaynaklarının sürdürülebilir bir şekilde kullanılması ve tükenmesinin önlenmesi hedeflenir. Bu bağlamda, su kullanım verimliliğinin artırılması önemlidir, ancak aynı zamanda su talebindeki süregelen artışı sınırlayacak tedbirlerle desteklenmelidir (Hoekstra, 2013).

Birçok bilimsel araştırma, iklim değişikliğinin olumsuz etkilerinden kaçınmak için atmosferden sürekli olarak karbon dioksit çıkaran negatif emisyon teknolojilerinin uygulanmasının kaçınılmaz olduğunu gösteriyor. Bu teknolojiler arasında yer alan doğrudan hava yakalama, jeolojik depolama ile birleştirildiğinde büyük miktardaki karbon dioksiti atmosferden uzaklaştırma potansiyeli taşıyor. Artan yatırımlar, destekleyici politikalar ve maliyetlerin düşmesiyle birlikte, bu teknolojilerin büyük ölçekli tesislerde daha yaygın bir şekilde benimsenmesi bekleniyor. Bu bağlamda, doğrudan hava yakalama teknolojilerinin, küresel iklim hedeflerinin başarılmasına önemli bir katkıda bulunacağı düşünülmektedir (Baydemir, 2022).

Sürdürülebilir üretim, çevre kirliliğiyle mücadelede önemli bir rol oynar. Endüstriyel faaliyetler, tarım ilaçları, atık yönetimi sorunları ve hava kirliliği gibi faktörlerin birleşimiyle ortaya çıkan çevre kirliliği, sürdürülebilir üretim prensipleri doğrultusunda azaltılabilir. Geri dönüşüm ve yeniden kullanım gibi atık yönetimi stratejileri uygulanabilir. Üretim süreçlerinde kullanılan kimyasalların ve zararlı maddelerin etkisi göz önünde bulundurularak çevre dostu alternatiflere yönelmek de önemlidir (Garetti ve Taisch, 2012). Şekil 2.7'de ayrıntıları verilen karbon yakalama gibi çözümler, çevre kirliliğinin azaltılmasını ve doğal ekosistemlerin korunmasını hedefler. Sürdürülebilir üretim prensipleri, iklim değişikliği, su kaynakların tükenmesi gibi çevresel sorunlara çözüm sunar. Enerji verimliliği, yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş, su tasarrufu, atık

yönetimi ve çevre dostu üretim gibi önlemler, çevresel etkiyi minimize eder, doğal kaynakların sürdürülebilir kullanımına katkı sağlar. Bu temel prensipleri benimseyen iş modelleri, gelecek nesillere sağlıklı bir çevre ve sürdürülebilir bir gelecek sunmada etkili olabilir (Stubbs ve Cocklin, 2008).



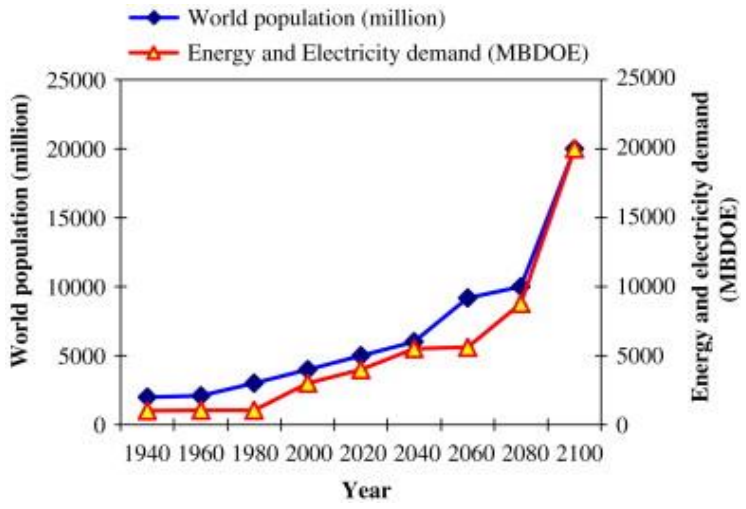
Şekil 2.7. Karbon yakalama teknolojileri (Kleijne, ve ark., 2022; akt. Baydemir, 2022)

2.2.3. Kurumsal sosyal sorumluluk

Kavramsal açıdan sürdürülebilirliğin önemi, hayatın devamlılığını sağlama ve doğal sistemleri koruma ve iyileştirilmesi ile alakalıdır. Üretim aşamalarında kullanılan kaynakların sınırlı olarak bulunması ve konvansiyonel üretimin çevremiz ile dünyamıza bilinen olumsuz etkileri tüm sektör üretimleri için sürdürülebilirliği ihtiyaç ve zorunluluk haline getirmiştir (Egger, 2006). Sürdürülebilirlik, iş dünyasında ve toplumda sorumluluk bilinci anlamına gelir. Bu ilke, öncelikle insan sağlığı ve güvenliği temelinde yükselir, çalışma koşulları iyileştirilir ve işçi haklarına tam saygı gösterilir. Aynı zamanda, yerel toplulukların dinamiklerini anlamak ve onların ihtiyaçlarına duyarlı bir şekilde yaklaşmak, ekonomik fırsatların doğru ve adil bir şekilde dağıtılmasını sağlar. Bu bağlamda, işletmeler sadece kâr amacı gütmekle kalmaz, aynı zamanda yerel ekosistemlerin güçlenmesine ve toplumsal adaletin sağlanmasına katkıda bulunurlar (Gladwin ve ark., 1995). Günümüzde sürdürülebilirlik ve toplumsal sorumluluk

kavramları, iş dünyası ve toplumun genelinde önemli bir odak noktası haline gelmiştir. Johannesburg Zirvesi işletmelere kar maksimizasyonuna odaklanmanın ötesine geçerek, toplumun ihtiyaçlarını ve çevrenin korunmasını gözeten bir yaklaşım benimsemelerini ve bu bağlamda işletmelerin etik, çevresel ve sosyal açıdan sorumlu bir şekilde faaliyet göstermelerini önermiştir (Ulusal Çevre ve Kalkınma Programı, 2004).

Sürdürülebilir üretim, insan sağlığı ve güvenliği üzerinde öncelikli bir odak noktası taşır. İşletmeler, üretim süreçlerinde çevresel riskleri en aza indirecek tedbirleri almalı ve çalışanların sağlığını korumak için güvenlik standartlarını uygulamalıdır. Tehlikeli maddelerin kullanımı azaltılmalı, atık yönetimi süreçleri etkin bir şekilde uygulanmalı, Şekil 2.8'de gösterilen sürekli artan enerji talebi kontrol altına alınmalı ve yenilenebilir enerji kaynakları tercih edilmelidir (Sarvajayakesavalu ve Charoensudjai, 2021), Böylelikle, insan sağlığına zarar verebilecek etkiler en aza indirgenerek sürdürülebilir bir üretim süreci sağlanmış olur. Gielen ve ark. (2019) göre yenilenebilir enerjinin payı %15 olan 2015 yılından 2050 yılına bütün birincil enerji arzının %63'e çıkması öngörülmektedir. Böyle bir büyüme sağlayan yenilenebilir enerji, daha yüksek enerji verimliliğiyle birleştiğinde, Paris İklim Anlaşması sınırları dâhilinde kalmak için emisyonun %94'ünün düşmesini sağlayabilir. İklim hedeflerine ulaşmada mutlak rakamlar farklılık gösterse de yenilenebilir enerji ve enerji verimliliğinin en uygun seçenek olduğu konusunda fikir birliği vardır.



Şekil 2.8. Yıllık ve tahmini dünya nüfusu ve enerji talebi (Omer, 2008**)**

Kurumsal sosyal sorumluluk (KSS), işçilerin çalışma koşullarının iyileştirilmesini ve işçi haklarına saygı gösterilmesini gerektirir. İşletmeler tarafından, adil ücret politikaları

uygulamalı, işçilerin çalışma saatlerini düzenlemeli ve işçi sağlığı ve güvenliği konularında gerekli önlemleri alınmalıdır. İşçi haklarına verilen değer, işletmelerin toplumsal sorumluluğunun bir göstergesidir. KSS kapsamında şirketler, kârı korumakla birlikte iç ve dış paydaşların yaşam standartlarını iyileştirmek şeklindeki iki yönlü hedefe ulaşmak için etik ve sorumlu bir şekilde davranmalıdırlar (Hopkins, 2003). KSS ve sürdürülebilir üretim, işletmelerin yerel toplulukları anlaması ve onların ihtiyaçlarına uygun şekilde hareket etmesini gerektirir. İş birliği ve iletişim, proje sürdürülebilirliğini artırır ve yerel toplulukların katılımıyla daha olumlu sonuçlar ortaya çıkar. İşletmeler, projelerini topluluk ihtiyaçlarına göre şekillendirmeli, ekonomik fırsatlar yaratmalı ve sosyal adaleti sağlamalıdır. Bu, KSS'yi sadece bir taahhüt değil, aynı zamanda sürdürülebilir ekonomik kalkınmaya yönelik bir iş dünyası çabası olarak değerlendirir. Bu çerçevede, çalışanlar, aileler ve yerel topluluklarla etkileşim, yaşam kalitesini artırmak ve iş dünyasının kalkınmasına katkıda bulunmak için önemlidir (World Bank, 2003).

Sürdürülebilir üretim ve toplumsal sorumluluk, ekonomik fırsatların yaratılmasını ve sosyal adaletin sağlanmasını hedefler. İşletmeler, yerel ekonomilere katkıda bulunmalı, istihdam yaratmalı ve iş gücünün becerilerinin geliştirilmesine olanak tanımalıdır. Ayrıca, işletmelerin tedarik zincirinde de adaletli uygulamaları benimsemesi önemlidir. Sürdürülebilir üretim ve toplumsal sorumluluk ilkelerine dayalı olarak, işletmeler toplumun sorunlarına duyarlı ve çözüm üreten, kurumsal sosyal sorumluluğu ve sosyal adaleti teşvik etmeye çalışmalıdır (Engin ve Akgöz, 2013). İnsan sağlığı ve güvenliği gözetilir, çalışma koşulları iyileştirilir ve işçi haklarına saygı gösterilir. Yerel toplulukların katılımı ve ihtiyaçları dikkate alınır, ekonomik fırsatlar yaratılır ve sosyal adalet sağlanır. İşletmeler, sürdürülebilirlik ve toplumsal sorumluluk prensiplerini benimseyerek hem topluma hem de çevreye karşı sorumluluklarını yerine getirebilirler. Bu şekilde, daha sürdürülebilir bir gelecek inşa etmek ve toplumun refahını artırmak mümkün olacaktır. (Wirba, 2023)

2.2.4. İnovasyon ve teknoloji

Sürdürülebilir üretim, sürekli bir gelişim ve yenilikçilik gerektirir. Yeni teknolojilerin kullanımı ve süreçlerin iyileştirilmesi, daha sürdürülebilir üretim yöntemlerinin benimsenmesine ve daha çevre dostu ürünlerin geliştirilmesine olanak sağlar. Bununla

birlikte enerji ve kaynaklar bakımından verimlilik ile üretkenliğin artırılması, inovasyon ve pazarlamaya yönelik döngülerin sürelerinin kısaltılması, bütünsel dijital teknoloji entegrasyonu ile hedeflenmiştir (Prause, 2015). Bu potansiyel faydalar göz önüne alındığında, araştırmacılar ve uygulayıcılar arasında büyük ilgi görmüştür (Liao ve ark., 2017). Faydaların yanı sıra uzman eksikliği, yüksek maliyetler, önceki sistemin değişim süreçleri ve potansiyel enerji olumsuzlukları gibi dezavantajlar, yeni dijital süreçleri benimsenmesini ve değerlendirme aşamasını zorlaştırmıştır (Saberi ve ark., 2018). Bir amaca yönelik farklılık oluşturmaya odaklanarak başarıyı yakalama çabalarına inovasyon denmektedir. Günümüzde iş dünyası ve endüstriyel sektörler sürekli bir gelişim ve yenilikçilik gerektirmektedir. İnovasyon ve teknoloji, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak ve sürdürülebilir üretimin gerçekleştirilmesi için güçlü araçlar olarak ortaya çıkmaktadır (Bekmezci, 2015). Tasarruflu ve yüksek teknolojili inovasyonun geliştirilmesi, yeni ihtiyaçları karşılamak ve etkili ürünler, süreçler ve hizmetler üretmek için daha iyi çözümler bulma gerekliliğini ortaya koyar. Bu özellikle sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için önemlidir; çünkü sürdürülebilir kalkınma için inovasyon ve teknolojinin benimsenmesi, çevre dostu ürünlerin geliştirilmesi ve süreçlerin iyileştirilmesi bu hedeflere ulaşmada kritik bir rol oynar (Ferauge, 2012).

Sürdürülebilir üretim, kaynakların etkin kullanılması, enerji verimliliğinin artması ve azaltılmış çevresel etkiler gibi prensiplere dayanan yaklaşımdır. Geleneksel üretim yöntemleri genellikle kaynakları israf eden, enerji tüketimini artıran ve çevreye zarar veren süreçlere sahiptir. Ancak, inovasyon ve teknoloji kullanımıyla olumsuz etkilerin üstesinden gelmek mümkündür (Bocken ve ark., 2014). Yeni teknolojilerin kullanımı, sürdürülebilir üretimin temel bir unsuru haline gelmiştir. Örneğin, enerji verimli makinelerin ve ekipmanların geliştirilmesi, üretim süreçlerinde enerji tasarrufu sağlamaktadır. Aynı zamanda, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımıyla, üretim süreçleri çevre dostu hale getirilebilmektedir. Rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi ve hidroelektrik gibi yenilenebilir enerji kaynakları, geleneksel enerji kaynaklarına göre daha temiz ve sürdürülebilir bir enerji sağlamaktadır. Gerçekleştirilen karşılaştırmalı analizler, Endüstri 4.0'ın kapsadığı yeni teknolojilerin sürdürülebilirliğe yönelik olan katkıları göstermektedir (Çirkin ve Özdağoğlu, 2021). Çevre dostu ürün geliştirmenin temel amacı, tüketicilerin taleplerine cevap verirken çevresel etkileri en aza indirmektir. İnovasyon ve teknoloji, daha sürdürülebilir malzemelerin kullanımını teşvik ederek bu

hedefe ulaşmada kilit bir rol oynar. Örneğin, geri dönüştürülebilir malzemelerin kullanımıyla ürün ömrü uzatılabilir ve atık miktarı azaltılabilir. Ayrıca, ürünlerin imha edilmesi yerine geri kazanılması ve parçalarının yeniden kullanılması, çevresel etkileri azaltmanın yanı sıra daha sürdürülebilir ürünlerin maliyetini de düşürerek piyasaya sunulmalarını kolaylaştırır (Haque, 2011).

İnovasyon ve teknoloji, sadece sürdürülebilir üretim yöntemlerini teşvik etmekle kalmaz, aynı zamanda yeni pazar fırsatları yaratır. Sürdürülebilirlik, günümüzde tüketicilerin ve işletmelerin önem verdiği bir konu haline gelmiştir. Çevre dostu ürünlere talep artarken, inovasyon ve teknoloji sayesinde bu taleplere cevap verebilen işletmeler rekabet avantajı elde eder. Ayrıca, yeşil teknolojilerin geliştirilmesi ve sürdürülebilir çözümlerin pazara sunulması, yeni iş fırsatları ve istihdam yaratır (Strandhagen ve ark., 2017). İnovasyon ve teknoloji, sürdürülebilir üretim, sürekli gelişim ve yenilikçilik için kritik bir faktördür. Yeni teknolojilerin kullanımı, süreçlerin iyileştirilmesi ve çevre dostu ürünlerin geliştirilmesi, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada büyük bir potansiyele sahiptir. İşletmelerin inovasyon ve teknolojiye yatırım yapması hem çevresel etkileri azaltmak hem de rekabet avantajı elde etmek için önemli bir adımdır. Bu nedenle sürdürülebilirlik ve inovasyon birlikte düşünülmeli ve stratejik olarak ele alınmalıdır. Gelecekte, inovasyon ve teknoloji odaklı sürdürülebilir üretim yöntemlerinin daha da yaygınlaşması ve benimsenmesi beklenmektedir. (Bekmezci, 2015).

2.3. Endüstri 4.0 Uygulamalarının Sürdürülebilirlik Hedeflerine Katkıları

Teknolojinin üretimi ve kullanımı, çevreye zarar veren hava, su ve gürültü kirliliğine yol açmaktadır. Bu sorunu ele almak amacıyla, yeşil teknolojinin benimsenmesi hedeflenmektedir. Bu kapsamda, elektronik cihazların enerji tüketiminin azaltılması, eski ekipmanların doğru bir şekilde imha veya geri dönüşümü, enerji verimli bilgisayarlar ve çevre dostu dijital cihazların tasarlanması gibi adımlar atılmaktadır. Yeşil teknoloji, çevresel etkileri azaltarak bilgi işlem kalitesini artırmayı ve dünyayı daha sürdürülebilir hale getirmeyi amaçlamaktadır. Bu yaklaşım, gelecek nesillere çevresel sorunları çözebilecekleri bir teknoloji aktarılmasını hedeflemektedir (CBDDO, 2022).

Günümüzde rekabet avantajı elde etmek için, Endüstri 4.0 ve bu dönüşümü sağlayan teknolojiler önemli bir potansiyel sunmaktadır. Sürdürülebilirlik, üretim süreçlerinin tüm aşamalarında gözetildiğinde, ürün, süreç ve sistem entegrasyonu ile ilgili etkileşimler,

sürdürülebilir üretim açısından hayati bir rol oynar. Endüstri 4.0, özellikle enerji endüstrisinin faaliyet alanını yeniden şekillendirerek daha gelişmiş, akıllı ve karmaşık enerji üretim ve dağıtım ekipmanlarını kullanarak enerjinin sürdürülebilirliğine önemli katkılarda bulunur. Bu sayede, sürdürülebilir üretim için entegre bir yaklaşım benimsenmiş olur (Ghobakhloo ve Fathi, 2021).

Temelde Endüstri 4.0'ın ana hedefi, veri, iletişim ve zekâyı kullanarak üretimin esneklik ve etkinliğini artırarak şirketin uzun vadede rekabet gücünü güçlendirmek ve genişletmektir. Dördüncü sanayi devrimi, sadece teknoloji, üretim organizasyonu ve çalışanlar üzerinde değil, aynı zamanda sosyal ve ekolojik çevre üzerinde de etkiler yaratmaktadır (Gabriel ve Pessl, 2016). Kuruluşların I4.0 teknolojilerinin sürdürülebilirliğe olan katkılarını anlamak, önemlidir. Ancak, mevcut bilimsel ve uygulamalı literatürde bu konuda yeterli rehberlik bulunmamaktadır (Bai ve ark., 2020). Araştırmanın bu aşamasında I4.0 teknolojisi uygulamalarını ve sürdürülebilirlik perspektifinden daha ayrıntılı şekilde incelenerek, bu alanda bir rehberlik sunmayı amaçlanmaktadır. Endüstri 4.0'ın sürdürülebilirlik üzerinde oluşturduğu etkileri ve sürdürülebilir kalkınmaya ekonomik, çevresel ve sosyal açıdan bulunabileceği katkıları araştırmacıların daha da ilgisini çekmektedir. Literatüre daha yakından bakıldığında, özellikle gelecekteki iş üzerindeki etkinin yanı sıra çevre üzerindeki etkinin de yoğun bir şekilde tartışıldığı görülebilir (Ghobakhloo, 2020).

Endüstri 4.0, enerji ve kaynak kullanımının optimize edilmesi için önemli fırsatlar sunar. Akıllı enerji yönetimi, atık azaltma ve çevresel etkilerin kontrolü gibi uygulamalar, Tablo 2.4'te vurgulanan daha sürdürülebilir bir üretim sürecinin sağlanmasına yardımcı olur. Bu süreçte ortaya çıkabilecek potansiyel olumsuzluklara karşı alınacak önlemlerin belirlenmesi ve uygulanması için akademik ve sektörel çalışmalara odaklanılmalıdır. Üretim sektörleri, I4.0 teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte önemli bir endüstriyel dönüşümü deneyimlemekte ve bu durum ekonomi, çevre ve toplumda önemli değişimlere yol açmaktadır. Bu nedenle, bu teknolojik gelişmelerin getirdiği avantajların yanı sıra ortaya çıkabilecek risklerin de anlaşılması ve bu risklere karşı etkili önlemlerin alınması için çaba harcanmalıdır. (Toker, 2018).

Tablo 2.4. Endüstri 4.0 perspektifinde sürdürülebilirlik konuları (Toker, 2018)

Çevresel	Ekonomik	Toplumsal
3B Baskı	Küresel ekonomide artan akıllı sistemler	Nitelikli işgücü ihtiyacı
Bio-enerji kullanımı	Dijital dönüşüm	Azalan çalışma süreleri
Verimlilik artışı	Artan yatırımlar	Küresel ölçekte endüstri göçleri
Azalan hammadde kullanımı	Hızlı ekonomik büyüme	Yeni işler / meslekler
Üretimde azalan atıklar dönüşüm	-	GIG ekonomisi

2.3.1. Endüstri 4.0 ve toplumsal etkileri

Sosyal sürdürülebilirlik, insanlar üzerindeki çeşitli iş, çevresel, ekonomik ve teknolojik etkilerin bilinçli bir şekilde tanınması ve yönetilmesi sürecini ifade eder. Sürdürülebilirliğin toplum üzerindeki nihai hedefi, herkesin ayrımcılıktan korunduğu, evrensel insan haklarına saygı gösterildiği ve temel olanaklara, örneğin güvenlik veya sağlık hizmetlerine erişebildiği sağlıklı ve yaşanabilir toplulukların oluşturulmasıdır (Dempsey ve ark., 2011). Bu bağlamda, Endüstri 4.0'ın sosyal etkileri, özellikle insanın yerini makinelerin ve yeni teknolojilerin alması gibi durumlar, dikkate alınmalıdır (Digilina ve ark., 2019).

Sosyal kalkınma açısından değerlendirildiğinde, dijital dönüşüm ve endüstriyel yeniden yapılanmanın işgücü piyasasını önemli ölçüde etkilemesi beklenmektedir. Uzmanlar, dijitalleşme ve iş gücünden tasarruf sağlayan teknolojilerin (otonom araçlar, akıllı robotlar, bulut çözümleri gibi) ortaya çıkmasının düşük vasıflı işlerin azalmasına neden olabileceğini, fakat aynı zamanda kontrol sistem tasarımı, otomasyon mühendisliği, makine öğrenimi ve yazılım mühendisliği tarzı bölümlerde yeni iş fırsatları yaratabileceğini öngörmektedirler (Frey ve Osborne, 2017).

2.3.2. Endüstri 4.0 ve ekonomik etkileri

Endüstri 4.0'ın gelecek süreçlerde ekonomi ve iş dünyası üzerinde daha fazla sonuç doğurması, sanayi ve pazar üzerinde önemli etkiye sahip olması, süreçlerin iyileştirilmesine olanak sağlaması, şirketin rekabet gücünü artırması, mal ve hizmet

üretmenin yeni bir yolunu sunması, sonuç olarak tüm ürün yaşam döngüsünü etkileyecek yeni iş modellerinin geliştirilmesine imkân sağlaması beklenmektedir (Pereira ve Romero 2017). Endüstri 4.0, maliyet ve zaman verimliliğini artırmaya olanak sağlayan teknolojiler, yöntemler ve araçlar sayesinde Şekil 2.9'da gösterilen endüstrilerin döngüsel dönüşümünde önemli rol oynamaktadır (Albers ve ark. 2016).



Şekil 2.9. Döngüsel ekonomi stratejileri (World Economic Forum, 2024)

İşletme ve ekonomi odaklı araştırmalarda Endüstri 4.0'ın işgücü piyasası, eğitim, operasyonel süreçlerdeki değişiklikler ve ekonomik büyüme üzerindeki etkilerine dair birçok çalışma bulunmaktadır. Ancak, literatür genellikle belirli bir görüşten yoksun olup, iş ve ekonominin etkilerinin bir yönüne odaklanarak derinlemesine inceleme eğilimindedir (Tablo 2.5). Bu durumda, ilgili paydaşların (özel ve devlet şirketleri, devlet, sendikalar ve işveren sendikaları gibi) bağlantıları ve ilişkileri genellikle göz ardı edilmektedir. Gelecekte, endüstri, bilim, araştırma ve inovasyonun giderek artan bir şekilde birbirine entegre olması beklenmektedir. Endüstri 4.0'a geçişin başarılı olması için, bu karmaşık bağlamın tüm paydaşlarını içeren kapsamlı bir yaklaşım benimsemek önemlidir. Bu, özel sektör, kamu sektörü, sendikalar ve işveren sendikaları arasındaki ilişkileri ve iş birliğini anlamayı, değerlendirmeyi ve geliştirmeyi içermelidir. Bu bağlamda, gelecekteki araştırmalarda bu tür bağlantıların ve ilişkilerin vurgulanması, Endüstri 4.0'ın etkilerini daha bütünlüklü bir şekilde anlamamıza ve yönetmemize katkı sağlamaktadır (Maresova ve ark., 2018).

Tablo 2.5. Endüstri 4.0'ı ele alan makalelerde ekonomik hususlar (Maresova ve ark., 2018)

Araştırma Makaleleri	Ülke	Çalışma alanı	Beceri geliştirme	Ekonomi Büyümesi ve Makroekonomik Boyutu	Sürdürülebilirlik ve Çevre	Dijitalleşme / Akıllı Fabrika / Akıllı Üretim	Politika	İş Sistemlerinde / Süreçlerinde Değişim
Agola (2018)	X		X			X	X	X
Akberdina ve ark. (2017)				X			X	X
Gavrysh ve Boiarynova (2017)							X	X
Hirsch-Kreinsen (2016)		X	X				X	X
Chovancova ve ark. (2018)		X		X		X		
Kireeva ve Tsoi (2018)				X				
Petrillo ve diğerleri. (2018)	X		X					
Povolná ve Švarcová (2017)	X			X		X	X	
Prause ve Atari (2017)							X	
Sung (2018)	X		X			X		X

Bildiri Yazıları	Ülke	Çalışma alanı	Beceri geliştirme	Ekonomi Büyümesi ve Makroekonomik Boyutu	Sürdürülebilirlik ve Çevre	Dijitalleşme / Akıllı Fabrika / Akıllı Üretim	Politika	İş Sistemlerinde / Süreçlerinde Değişim
Caricato ve Grieco (2017)								X
Elbestawi ve ark. (2018)		X				X		
Erol et al. (2016)		X				X		X
Gášová ve diğerleri. (2017)		X		X	X	X		
Çen (2017)	X	X		X		X		X
Ibarra ve ark. (2018)						X		X
Issa ve ark. (2017)		X	X			X		X
Kuch ve Westkämper (2017)	X				X			
Meissner ve ark. (2017)								X
Pagalday ve ark. (2018)		X	X			X	X	X
Paravizo ve ark. (2018)			X		X			
Pereira ve Romero (2017)		X	X					X
Prinz ve ark. (2017)		X	X			X	X	X
Rauch ve ark. (2017)		X	X			X		X
Zhong ve diğerleri (2017)	X					X		X
Reniler (2017)			X	X				
Rita ve ark. (2017)		X	X		X	X		X
Schumacher ve ark. (2016)	X	X	X		X	X		X
Sutikno ve Suliswanto (2015)	X				X		X	
Tonelli ve ark. (2016)	X				X	X	X	

Endüstri 4.0, KOBİ'ler endüstriyel yönetimi için yeni paradigmalar sunmaktadır. Giderek artan sayıda yeni teknolojiyle desteklenen bu kavram, Kurumsal Kaynak Planlama (ERP) ve Üretim Yönetim Sistemi (MES) gibi geleneksel kurumsal bilgi sistemlerine göre daha esnek ve ucuz görünmektedir. Ancak KOBİ'ler, üretim planlama ve kontrol fonksiyonlarına ilişkin bu yeni fırsatları karşılama konusunda kendilerini yetersiz

donanıma sahip bulmaktadır (Moeuf ve ark., 2018). KOBİ'ler birçok ekonominin çok önemli unsurlarıdır. Ekonomik sistemde önemli bir rol aldıkları İtalya'daki KOBİ'lerde yalın ürün geliştirmenin uygulanmasına yönelik Rauch ve ark. (2017) tarafından çeşitli sektörlerden 54 KOBİ tarafından doldurulan bir anket kullanarak nitel bir araştırma yürütülmüştür. I4.0 teknolojileri sinerjisine ilişkin ilginç sonuçlar analiz edilmiş ve bu teknolojilerin kullanılmasını arttırabilecek 5 hipotezin türetilmesiyle sonuçlanmıştır.

2.3.3. Endüstri 4.0 ve çevresel etkileri

Ekonomik ve sosyal boyutu ele alındığında, enerji ve kısıtlı kaynakların kullanımı ile gereksiz malzeme kullanımının azaltılması, ideal atık yönetiminin sağlanması ve üretim ortamlarının sürdürülebilir yönetilebilecek hale getirilmesi ve çevre üzerinde oluşturdukları etkileri azaltacak çözümler önem arz etmektedir (Garetti ve Taisch, 2012). Endüstri 4.0, üretim süreçlerinin çevresel etkilerini kontrol etme konusunda önemli fırsatlar sunar. Akıllı sensörler, çevresel parametreleri izleyebilir ve anlık veriler sağlayarak fabrikaların çevresel performansını değerlendirmeye yardımcı olmaktadır. Bu veriler, fabrika işletmecilerine çevresel etkileri minimize etmek için gerekli düzeltici ve önleyici tedbirleri alma konusunda bilgi sağlar. Ayrıca, enerji verimliliğini artırmak ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak amacıyla I4.0 teknolojileri kullanılmakta ve bu sayede, daha esnek ve duyarlı bir üretim ortamı oluşturularak çevresel etkilerin azaltılmasına yönelik sürdürülebilir çözümler geliştirilmiştir (Morrar ve ark., 2017). Endüstri 4.0, enerji ve kaynak kullanımının optimize edilmesi için önemli fırsatlar sunmaktadır. Akıllı enerji yönetimi, atık azaltma ve çevresel etkilerin kontrolü gibi uygulamalar, daha sürdürülebilir bir üretim sürecinin sağlanmasına yardımcı olur. Bu yaklaşımlar sayesinde, enerji ve kaynaklar verimli bir şekilde kullanılırken çevresel etkiler minimize edilebilir. Ancak, Endüstri 4.0'ın sürdürülebilirlik açısından tam potansiyelini gerçekleştirebilmesi için işletmelerin bu teknolojileri benimsemesi ve uygun stratejiler geliştirmesi önemlidir. Ayrıca, enerji ve kaynakların optimize edilmesine yönelik teşvikler ve düzenlemeler de sürdürülebilirlik hedeflerinin gerçekleştirilmesine yardımcı olacaktır (Toker, 2018).

İklim değişikliğinin tarım alanları üzerindeki olumsuz etkilerini dengelemek amacıyla çeşitli sürdürülebilir uyum stratejileri geliştirilmiştir. Bu stratejiler arasında akıllı-su uygulamaları (lazerle arazi tesviye, yağmur suyu hasadı, mikro sulama, mahsul

çeşitlendirme, yükseltilmiş yatak ekimi, doğrudan tohumlanan pirinç), akıllı-besin uygulamaları (hassas besin uygulaması, yaprak renk çizelgeleri, mahsul kalıntı yönetimi) bulunmaktadır. Bu stratejiler, hava koşullarına duyarlı faaliyetler, karbon açısından akıllı faaliyetler ve bilgi açısından akıllı faaliyetler gibi yaklaşımları içermektedir. Bu teknolojiler, iklim değişikliğinin mahsuller üzerindeki olumsuz etkilerini büyük ölçüde azaltarak bitkileri daha iklime uyumlu hale getirmekte ve tarım sektörünü daha sürdürülebilir bir şekilde yönetmeye yardımcı olmaktadır (Malhi ve ark., 2021)

Endüstri 4.0, akıllı enerji yönetimi sistemlerinin kullanımını teşvik ederek enerji verimliliğini artırır. Sensörler ve akıllı cihazlarla donatılan izleme sistemleri, üretim tesislerinde enerji tüketimini daha etkin bir şekilde izleme ve kontrol etme imkânı sağlar. Bu sayede enerji israfının önüne geçilir ve enerji maliyetleri düşürülür. Akıllı aydınlatma sistemleri, tesis içindeki aydınlatma enerji tüketimini otomatik olarak optimize ederek gereksiz enerji harcamalarını engeller (Li ve ark., 2021). IoT ve veri analitiği, geri dönüştürülebilir malzeme ile atıkların takip ve yönetimini kolaylaştırır. Bu veriler, üreticilere atık oluşumunu önlemek veya minimize etmek için gerekli önlemleri alma imkânı tanır. Endüstri 4.0, atık azaltma ve geri dönüşüm süreçlerini daha etkin bir şekilde yönetir ve oluşan atıkların miktarını izleyerek üretimin çevresel etkilerini azaltmaya yardımcı olur (Bagdadee ve ark., 2020).

2.4. Basım Sanayisindeki Mevcut Durum

Basım endüstrisi, bağlantılı yan sanayileriyle birlikte dünya çapında tüm ekonomilerde önemli bir sektörü temsil etmektedir. Gelişmiş ekonomilerde matbaacılık ve bağlantılı endüstrilerin büyüklük açısından ilk 10 endüstri sektörü arasında yer almıştır. Baskı sektörünün tüm dalları, yayıncılık ve ilgili endüstriler olan ambalaj, kâğıt ve karton yapımı, mürekkep yapımı ve makine imalatı ile birleştirildiğinde, havacılık ve otomobil imalatı gibi endüstrilere eşit bir sektörü temsil etmektedir (Blunden ve Birkenshaw, 1988). Basım sanayisi, bilginin aktarılmasında önemli bir role sahip olan endüstrilerden biridir. Yüzyıllardır kitaplar, dergiler, gazeteler ve diğer yayınlar aracılığıyla bilgiye erişim sağlamıştır. Ancak son yıllarda dijitalleşme ve teknolojideki hızlı ilerlemeler, basım sanayisini derinden etkilemiştir (Sunesti, 2011). Araştırmanın bu bölümü basım sanayisindeki durumu ve teknolojiyle birlikte yaşanan dijital dönüşümü kapsamaktadır.

2.4.1. Baskı teknolojileri

Matbaanın icadı modern toplum yapısı için büyük bir eser olduğu kabul edilmektedir. İnsanlık tarihi ile iletişimde önemli bir gelişme ve aynı zamanda sosyal, kültürel ve politik Batı toplumunun değişiminde olağanüstü bir araç olmuştur. Avrupa'da erken modern dönemde icat edilmesinden bu yana, matbaa tekniği, ileri teknolojinin hızlı büyümesiyle birlikte birçok kez dönüşüme uğramış, insanların sosyal yaşamına sürekli katkıda bulunmuştur. Modern dönemin yükselişiyle birlikte matbaa, milliyetçiliğin ve ulus-devletin, medya endüstrilerinin, rasyonel düşüncenin, kamusal alanın ve modern devlet sisteminin ortaya çıkışını teşvik ederek Batı toplumunun modernleşmesinde de rol oynamıştır (Sunesti, 2011).

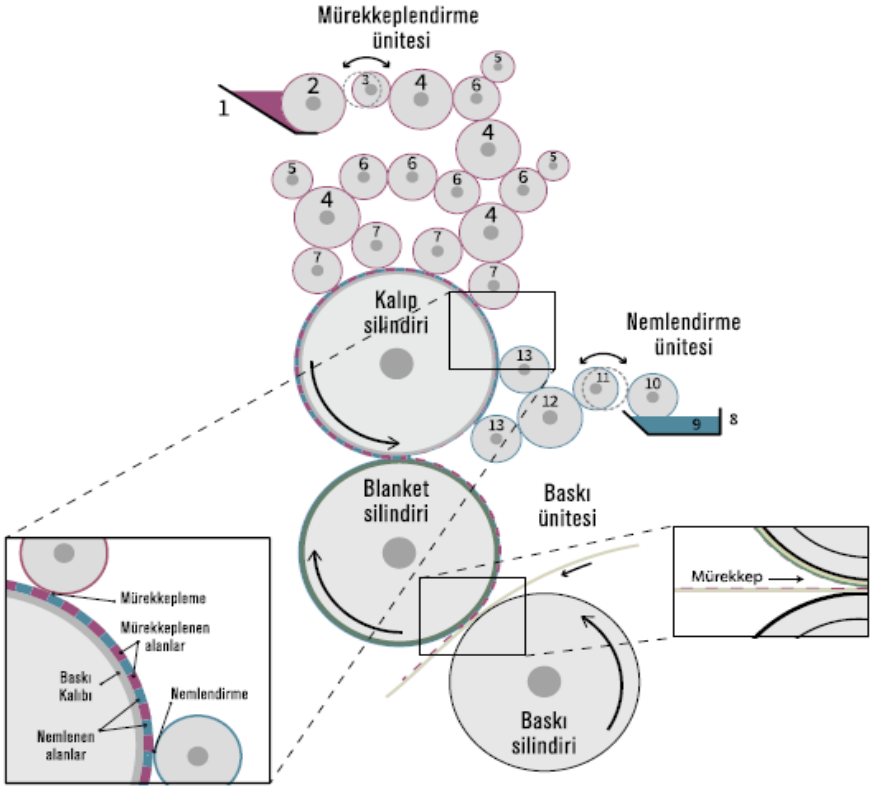
Basım sanayisindeki teknolojik gelişmeler, üretim süreçlerini daha verimli ve sürdürülebilir hale getirmiştir. Günümüzde baskı teknikleri olarak Şekil 2.10'da gösterildiği gibi ofset baskı, flekso baskı, gravür baskı, serigrafi ve dijital baskı gibi yöntemler kullanılmaktadır. Bu baskı yöntemleri, gelişen teknoloji ile daha yüksek kaliteli baskılar, daha hızlı üretim süreçleri ve daha esnek baskı seçenekleri sunmaktadır. Ayrıca, mürekkep ve kâğıt tasarrufu sağlayarak çevresel etkiyi azaltma potansiyeline sahiptirler (Tunçel, 2019).



Şekil 2.10. Temel baskı yöntemleri

2.4.1.1. Ofset baskı

Ofset baskı, yüksek kaliteli ve büyük miktarda baskı yapmanın etkili bir yöntemidir. Ofset baskı kalıbı üzerindeki görüntünün doğrudan baskı malzemesine aktarılması yerine, önce blanket silindirine ve ardından blanket silindir üzerinde oluşan görüntünün de baskı altı materyaline aktarılması prensibine (Şekil 2.11) dayanır. Bu süreç, daha keskin hatlar, daha zengin renkler ve daha yüksek baskı çözünürlüğü elde etmeyi mümkün kılar. Ofset baskı, geniş bir renk yelpazesi ve yüksek baskı çözünürlüğü sunmasıyla birlikte çeşitli kâğıt türleri ve malzemeler üzerine baskı yapma yeteneği ile esneklik sağlar (Şimşeker, 2007b).



Şekil 2.11. Ofset baskı tekniği sistemi (Acar Büyükpehlivan ve Oktav, 2021)

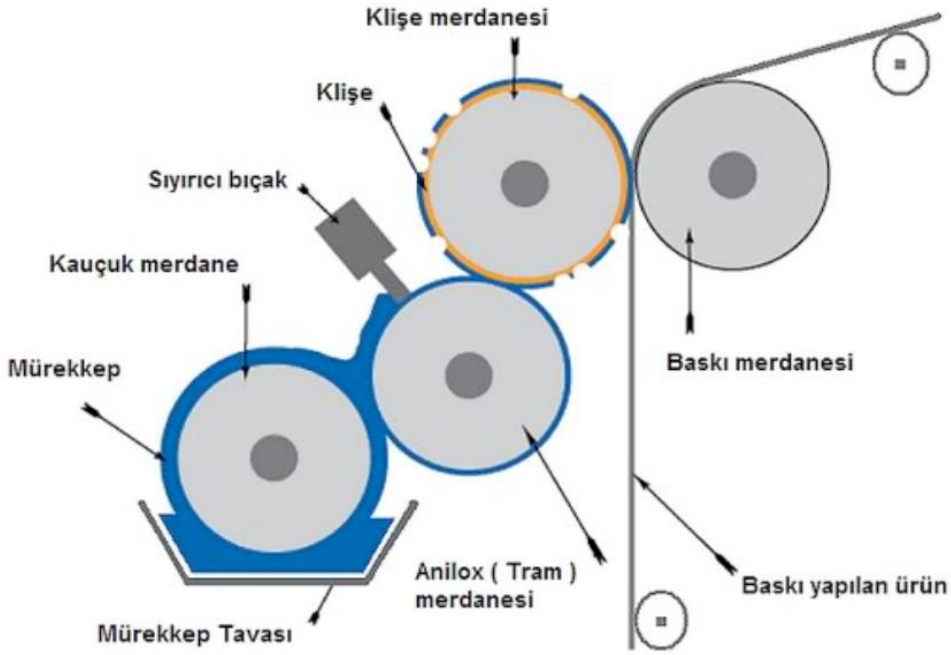
Ofset baskı yöntemi, ekonomik bir çözüm sunması ve yüksek verimlilik sağlamasıyla öne çıkan bir baskı tekniğidir. Bu özellikleri, özellikle yüksek adetli baskılarda tercih edilmesini sağlar ve farklı endüstrilerde ve uygulama alanlarında geniş bir kullanım yelpazesi sunar. Hedeflenen kısa sürede ekonomik bir şekilde ideal sonuca ulaşma, baskı sürecinde önemli olan ideal zaman, ekonomi ve kalite unsurlarını bir araya getirir. Bu kapsamda, zaman ve ekonominin ölçümlenmesi mümkün olabilirken, kaliteyi sağlamak

için baskı tekniğini iyi bilmek ve kalite kontrol standartlarını uygulamak gereklidir. Bu üç unsur, ofset baskının çeşitli endüstrilerde ve uygulama alanlarında tercih edilmesini ve başarılı sonuçlar elde edilmesini sağlayan önemli faktörlerdir (Ünal, 2007). Yüksek tirajlı baskılarda ofset baskı yöntemi, hız ve verimlilik sayesinde maliyetleri düşük tutmada etkili bir rol oynar. Baskı kalıplarının tekrar tekrar kullanılabilmesi ve baskı malzemelerinin hızlı bir şekilde beslenebilmesi, makinelerin enerji tüketiminin optimize edilebilmesi gibi faktörler, ofset baskının özellikle büyük ölçekli baskı projelerinde tercih edilmesini sağlar. Bu yöntem, büyük adetli baskı projelerinde ekonomik ve verimli bir çözüm sunarak endüstriyel ölçekteki baskı ihtiyaçlarını karşılamak için idealdir (Acar Büyükpehlivan ve Oktav, 2021).

Ofset baskı yöntemi, birçok avantajıyla sektörde tercih edilmektedir. Günümüzde, yayınlar, reklam malzemeleri, dergiler, kitaplar ve birçok diğer basılı ürün için yüksek kaliteli ve büyük miktarda baskı yapma ihtiyacı oldukça yaygındır. Bu tür baskı işlemlerinde ofset baskı yöntemi, tercih edilen ve etkili bir çözüm olarak öne çıkar ve basılı ürünlerin üretiminde önemli bir rol oynamaya devam edecektir. (Kipphan, 2001). Ayrıca, baskı kalıbı oluşturulduktan sonra baskı işlemi hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilir. Ofset baskı makineleri, yüksek hızda çalışabilir ve yüksek adetli baskılar yapabilir, bu da zamandan ve emekten tasarruf sağlar. Bu baskı türünün bir diğer önemli avantajı, malzeme çeşitliliği ve esnekliği sunmasıdır. Bu yöntem, çeşitli kâğıt türleri, karton, plastik ve metal gibi farklı malzemeler üzerine baskı yapma yeteneğine sahip olmasıdır (Aydemir ve Özakhun, 2014).

2.4.1.2. Flekso baskı

Flekso baskı, esnek ambalaj malzemeleri, karton kutular, etiketler, karton gibi yüzeylere baskı yapmada ve gazete, dergi gibi birçok ürünün baskısında yaygın olarak kullanılır. Gıda sektörü, ilaç endüstrisi, hızlı tüketim malları üretimi ve perakende sektörü gibi birçok sektörde flekso baskıya ihtiyaç duyulur. Bu teknoloji, hızlı baskı süreleri, düşük maliyetler ve dayanıklı baskılar sağlayan bir yöntemdir (Kurt, 2012). Flekso baskı sistemi, yüksek baskı sistemleri içinde yer almaktadır. Bu baskı sistemine ait olan baskı ünitesi, mürekkep ünitesi, baskı kalıbı silindiri, Dr. blade olarak da adlandırılan sıyırıcı rakle, aniloks merdane ve baskı silindirini içermekte ve bu öğeler (Şekil 2.12) yüksek baskı sistemlerinin temel bileşenleridir (Hofstrand, 2006).



Şekil 2.12. Flekso baskı tekniği sistemi (Kurt, 2012)

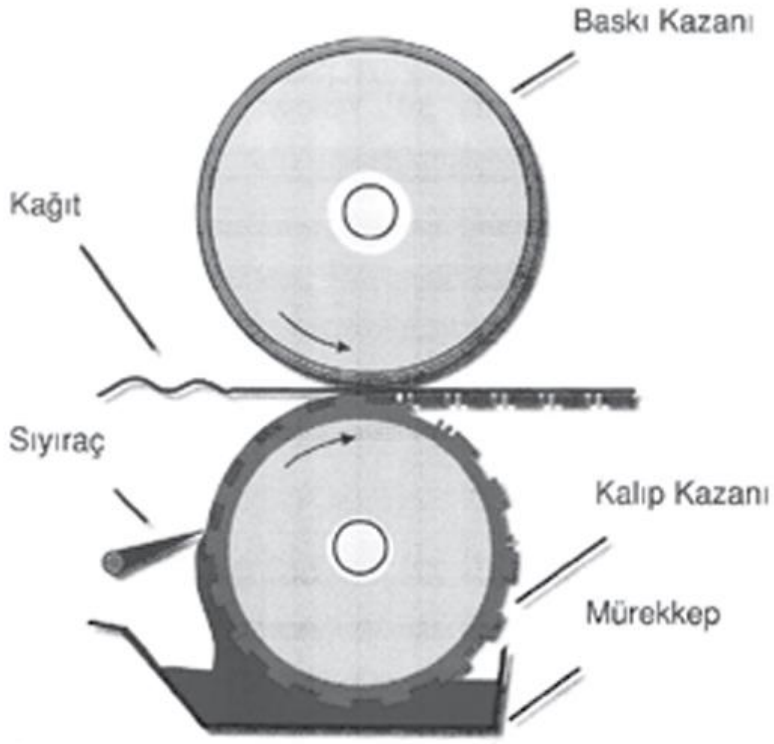
Bu sistemde, baskı kalıbının tasarım alanı yükseltilmiş bir yüzeye sahiptir. Mürekkep silindiri, baskı kalıbının üzerinden geçerken mürekkebi alır ve ardından baskı malzemesi yüzeyine aktararak baskı işlemini gerçekleştirir. Flekso baskı yöntemi, yüksek hızlarda çalışabilen makinelerle kullanılabilir ve büyük miktarlarda baskı yapma kapasitesine sahiptir. Bu özellikleri sayesinde flekso baskı, endüstriyel baskı alanında geniş bir kullanım alanına sahiptir ve yaygın bir şekilde tercih edilmektedir (Şimşeker, 2007c).

Flekso baskının düşük maliyetleri, bu yöntemin önemli bir avantajını oluşturur. Flekso baskı ekipmanları ve malzemeleri genellikle uygun fiyatlıdır ve uzun süreli kullanım için dayanıklıdır. Ayrıca, flekso baskıda kullanılan mürekkeplerin maliyeti diğer baskı yöntemlerine göre daha düşüktür. Bu yöntemde kullanılan mürekkepler genellikle pigment bazlıdır ve çeşitli yüzeylere iyi yapışma özelliğine sahiptir. Bu nedenle, suya, yağa ve sürtünmeye karşı dayanıklı ve yüksek kaliteli baskılar elde edilebilir. Uzun süre dayanması gereken ürünler, özellikle ambalaj malzemeleri için ideal bir baskı yöntemidir. Gelişmiş flekso baskı teknolojileriyle birlikte, daha yüksek kaliteli ve çevre dostu baskılar elde etmek mümkündür (Gençoğlu ve ark., 2009).

2.4.1.3. Gravür baskı

Gravür, bir görüntünün oyma teknikleriyle bir metal plaka üzerine kazınmasıyla yapılan bir baskı yöntemidir. Bu yöntem, yüksek kaliteli ve detaylı baskılar elde etmek için kullanılır. Gravür, özellikle güvenlik baskıları, banknotlar, kartvizitler ve kaliteli sanat baskıları gibi alanlarda tercih edilir. Bu yöntem uzun süredir sanatçılar, tasarımcılar ve baskı uzmanları tarafından kullanılmaktadır. Gravür, yüksek kaliteli ve detaylı baskılar elde etmek için ideal bir seçenektir ve birçok farklı endüstride kullanılmaktadır (Grau ve ark., 2016; Lee, 2002). Ayrıca, gravür, kartvizitlerde ve davetiyelerde profesyonel bir görünüm sağlamak için tercih edilen bir baskı yöntemidir. Gravür baskılar, yüksek kaliteli ve zarif bir görünüm sunar ve bir işletmenin veya etkinliğin prestijini artırır. Sanat dünyasında ise gravür, sanatçıların detaylı ve özgün baskılar oluşturmasına olanak tanır. Gravür baskıları, sanat galerilerinde sergilenen eserlerin yanı sıra koleksiyonlarda da sıkça bulunur. Gravürün başlıca avantajlarından biri, uzun ömürlü olmasıdır. Metal kalıplar, yüzbinlerce baskı yapabilme kabiliyetine sahiptir. Bu, büyük miktarlarda baskı yapılması gereken durumlarda avantajlıdır. Ayrıca, gravür baskılarının yüksek çözünürlüğe sahip olması ve ince detayları başarıyla yansıtabilmesi, diğer baskı tekniklerine kıyasla öne çıkan bir özelliktir (Kipphan, 2001).

Gravür baskıda öncelikle görüntü bir metal plakanın yüzeyine kazıma veya oyma işlemiyle aktarılır. Bu plaka genellikle bakır, çelik veya pirinç gibi metal malzemelerden yapılmıştır (Aydemir ve Özhakun, 2014). Görüntü aktarımı yapılan plaka kalıp görevi üstlenir ve üzeri mürekkeple kaplanır. Ardından fazla mürekkep yüzeyden silinir, böylece sadece görüntü olan alanlar mürekkeple kaplanmış olur. Sonraki adımda, kalıp bir baskı presine yerleştirilir ve mürekkepli yüzey kâğıt üzerine bastırılır. Bu işlem, görüntünün kalıptaki oymalarının kâğıda aktarılmasını (Şekil 2.13) sağlar. Gravür, çeşitli endüstrilerde tercih edilen bir baskı yöntemidir. Gravür, benzersiz ve karmaşık desenlerin oluşturulmasına olanak tanır ve bu da güvenlik baskılarında sahteciliği önlemek için önemli bir faktördür. Kâğıt paralarda, gravür tekniği kullanılarak özel çizgiler, desenler ve hologramlar oluşturulur, böylece sahtecilik girişimleri daha zor hale gelir (Szentgyörgyvölgyi, 2016).



Şekil 2.13. Gravür baskı tekniği sistemi (Şimşeker, 2007a)

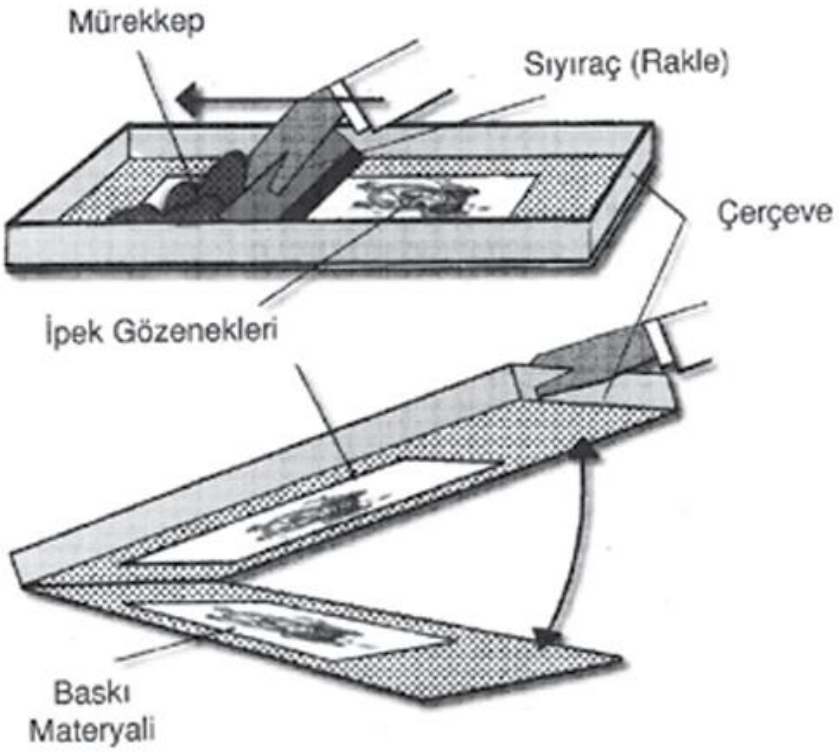
Ancak gravür baskı yöntemi bazı zorluklar da içerir. Öncelikle, hazırlık süreci oldukça zaman alıcı olabilir. Plakanın kazınması için hassas işçilik ve uzmanlık gerekmektedir. Yeni geliştirilen baskı öncesi otomasyon süreçlerinin yanı sıra daha hızlı kalıp hazırlama ve daha kısa baskı makinesi hazırlama süreleri, önemli ölçüde üretkenliği arttırıp ve maliyetleri düşürmüş olsa da gravür baskılarının maliyeti diğer baskı tekniklerine göre hala daha yüksek olabilir. Gravür baskı, geleneksel gravür baskı süreçlerini geliştirmiş ve bu proseslerden daha yüksek çözünürlük, daha yüksek hız ve daha fazla üretim kapasitesi sağlayabilen bir rotasyon baskı prosesine uyarlanmıştır. Bu nedenle, bu baskı yöntemi genellikle yüksek kaliteli ve özel baskılar için tercih edilen bir yöntemdir (Lee, 2002).

2.4.1.4. Serigrafi baskı

İpek baskı veya serigrafi baskı, yüzeyinde delikli gözeneklerden oluşan bir kalıp oluşturarak, bu kalıba mürekkep uygulanarak görüntünün aktarılmasını sağlayan bir baskı tekniğidir. Bu yöntem, kumaş, kâğıt, cam, metal ve plastik gibi çeşitli malzemelere baskı yapmak için kullanılabilir. Bu esneklik, serigrafi baskının geniş bir uygulama yelpazesi

içinde kullanılmasına olanak tanır (Akgül, 2011).

Serigrafi baskı süreci, ilk olarak dijital bir tasarım oluşturarak başlar, bu tasarım baskı için bir şablon görevi görür. Gözenekli serigrafi kumaşı bir çerçeve üzerine gerilir ve ışığa duyarlı emülsiyon veya film kullanılarak bir şablon oluşturulur. Şablon, mürekkebin belirli alanlardan geçmesine izin vererek istenen tasarımı oluşturur. Çerçeve, baskı yapılacak malzemenin üzerine yerleştirilir ve sabitlenir. Mürekkep çerçevenin üst kısmına uygulanır ve bir silecek (rakle) kullanılarak mürekkep şablon üzerine eşit şekilde yayılır. Mürekkep, şablonun açık alanlarından geçerek baskı altı malzemesine aktarılır ve baskı gerçekleşir (Şekil 2.14). Baskıdan sonra malzeme genellikle bir kurutucudan geçirilir ve mürekkebin kuruması için ısıya tabi tutulur. Bu süreç, tasarımdaki her renk ve her katman için ayrı bir kalıp ve mürekkep rengiyle tekrarlanır. Bu yöntem, çeşitli yüzeylere baskı yapmak için kullanılan etkili bir tekniktir. (Kipphan, 2001).



Şekil 2.14. Serigrafi baskı tekniği sistemi (Şimşeker, 2007a)

Serigrafi baskı, özel tişörtler, posterler, tabelalar, etiketler ve diğer birçok basılı materyalin oluşturulmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu baskı tekniği, çok yönlülüğü, dayanıklılığı ve çeşitli yüzeylerde canlı ve opak baskılar üretebilme yeteneği

ile bilinir. Ancak, küçük tirajlar veya karmaşık tasarımlar için diğer baskı yöntemleri, özellikle dijital baskı ile karşılaştırıldığında maliyet açısından verimli olmayabilir. Serigrafi baskının dezavantajları arasında daha yavaş baskı hızı ve daha uzun baskı ön hazırlık aşamalarının bulunması öne çıkar (Akgül, 2011).

2.4.1.5. Dijital baskı

Dijital baskı, bilgisayar kontrollü bir yöntem olup dijital dosyaların doğrudan bir baskı makinesine aktarılmasıyla gerçekleştirilen bir teknolojidir. Geleneksel baskı yöntemlerine göre daha hızlı, hassas ve esnek bir baskı süreci sunar. Dijital baskı, daha az işgücü gerektirir ve kısa baskı öncesi süreleriyle düşük tirajlı işlerde zaman ve maliyet tasarrufu sağlar. Ayrıca özelleştirilmiş baskılar için ideal bir seçenektir (Şimşeker, 2007b). Bu aşamada dijital baskının çalışma prensipleri, avantajları ve uygulama alanları üzerinde durulacaktır. Dijital baskı teknolojisi, bilgisayarda oluşturulan dijital bir dosyanın, bir baskı makinesine aktarılıp direkt olarak malzeme üzerine baskı yapılmasını sağlar. Bu dosyalar genellikle sayısal görüntüler, grafikler veya metinler olabilir ve çeşitli dijital formatlarda saklanabilirler. Dijital baskı süreci, bilgisayar tarafından kontrol edilen bir yazıcı veya baskı makinesi aracılığıyla gerçekleştirilir (Polat, 2018).

Dijital baskının birçok avantajı bulunmaktadır. İlk olarak, dijital baskı daha az işgücü gerektirir, çünkü süreç otomatiktir ve insan müdahalesi azalır, bu da zaman ve maliyet tasarrufuna yol açar. İkinci olarak, dijital dosyaların doğrudan baskı makinesine aktarılması, ön hazırlık süreçlerini ortadan kaldırır ve baskı süresini kısaltır, bu da acil baskı ihtiyaçları için idealdir. Üçüncü olarak, dijital baskı yüksek hassasiyet sunar, ince ayrıntıları ve karmaşık tasarımları yüksek çözünürlükte ve netlikte basabilir. Renk doğruluğu ve kalitesi de geleneksel baskı yöntemlerine kıyasla daha yüksektir. Bir diğer önemli avantajı da özelleştirilebilirlik ve küçük miktar baskı imkânı sunmasıdır. Dijital baskı, düşük tirajlı baskıları ekonomik bir şekilde gerçekleştirebilir, hatta tek bir kopya bile ekonomik olabilir. Bu durum, kişiselleştirilmiş ürünlerin veya özel projelerin basımını kolaylaştırır (Kipphan, 2001).

Dijital baskı teknolojisi, çeşitli uygulama alanlarına sahiptir. Reklam ve pazarlama sektöründe broşürler, el ilanları, afişler ve promosyon ürünleri gibi materyallerin hızlı bir şekilde basılması için kullanılır. Ayrıca, kitap yayıncılığı, dergi basımı ve ambalaj endüstrisi gibi sektörlerde de önemli bir rol oynar. Dijital baskı, aynı zamanda tekstil,

seramik, cam ve metal gibi farklı malzemeler üzerine de uygulanabilir, bu da sanat ve tasarım alanlarında yaratıcı projelerin gerçekleştirilmesini sağlar. Dijital baskı, çağımızın hızla ilerleyen teknoloji dünyasına uyum sağlayarak rekabetin sağlanabilmesi için önemli bir araçtır (Tunçel, 2019).

Baskı sistemlerinde en son geliştirilen dijital baskı sistemleri, Endüstri 4.0'ın tam olarak kullanılmasını sağlayan baskı sistemidir. Tamamen bilgisayarlı sistem olduğundan Endüstri 5.0'a ilk adım atan sistem de haliyle dijital baskı sistemleri olacaktır.

2.4.2. Baskı teknolojilerindeki gelişmeler

Yeni nesil baskı teknolojileri, daha yüksek çözünürlük, renk doğruluğu ve detaylarla baskı yapma yeteneği sunar. Bu, profesyonel ve kaliteli baskılar elde etmek için önemlidir. Dijital baskı ve flekso baskı gibi teknolojiler, daha hızlı baskı süreleri sunarak zaman tasarrufu sağlar. Zaman kısıtı olan baskı ihtiyaçlarına cevap vermek ve müşteri beklentilerini karşılamak kaliteyi arttırmaktadır. Yeni teknolojiler, çeşitli malzemelere baskı yapma yeteneği ve özelleştirilmiş baskı seçenekleri sunar. Bu, farklı pazarlama kampanyaları için uyarlanabilirlik esnekliği sağlar ve baskı ürünlerinin çeşitliliğini artırır. Yeni teknolojiler, mürekkep ve kâğıt tasarrufu sağlayarak çevresel etkiyi azaltma potansiyeline sahiptir. Dijital baskı özellikle, ihtiyaç duyulan mürekkep miktarını minimize ederek ve kâğıt atığını azaltarak sürdürülebilirlik açısından avantaj sağlar (Kipphan, 2001).

Baskı teknolojilerindeki gelişmeler, basım sanayisinde daha verimli, yüksek kaliteli ve sürdürülebilir baskı süreçlerini mümkün kılmıştır. Dijital baskı, ofset baskı, flekso baskı, serigrafi ve gravür baskı gibi çeşitli yöntemler, farklı baskı ihtiyaçlarına uygun çözümler sunar. Bu teknolojiler, işletmelerin rekabet avantajı elde etmelerine ve müşteri beklentilerini karşılamalarına yardımcı olur. Ayrıca, çevresel etkiyi azaltma potansiyeline sahip olmaları, sürdürülebilirlik açısından önemli bir katkı sağlar (He, 2019).

2.4.2.1. Akıllı matbaa dijital inovasyonları

2017'de gerçekleştirilen bir Smithers Pira araştırmasına katılan şirketlerin %96'sı, sürdürülebilir ambalajlamanın şirketleri için son derece kritik bir unsur olduğunu vurgulamıştır. Basım sanayisinde, Endüstri 4.0 teknolojilerinin kullanımı, sürdürülebilir

üretim hedeflerini desteklemek adına önemli bir rol oynamaktadır. Sektördeki öncü firmalar, ürünlerinin enerji verimliliğini artırmak ve çevresel etkilerini minimize etmek için çeşitli stratejiler benimsemektedir. Üretim süreçlerinin her aşamasında sürdürülebilirlik ilkelerini benimsemekte ve çeşitli önlemlerle çevresel etkilerini azaltmaktadır. Bu kapsamda, kâğıt atığı, işlem emisyonları ve proses atıklarını azaltmaya odaklanarak çevre dostu üretim pratikleri geliştirilmektedir. Ayrıca, baskı öncesi, baskı ve baskı sonrası aşamaları içeren tüm üretim hatlarının genel verimliliğini optimize etmek için Endüstri 4.0 teknolojilerini kullanmaktadır.

Matbaalarda hala en çok kullanılan baskı sistemi ofset baskı sistemidir. Bu nedenle, araştırmada innovasyonlar hakkındaki gelişmeler ofset baskı sistemleri üzerinde anlatılmıştır ama bu sistemdeki genel unsurlar diğer baskı sistemleri için de geçerlidir.

Baskı makinesi enerji verimliliği

Endüstri 4.0, modern üretim süreçlerine entegre edilen akıllı teknolojilerin evrimini temsil eder. Bu kapsamda, üretici firmalar tarafından geliştirilen yeni nesil baskı makinelerinde avantajlı özellik olarak bulunan bekleme modu, Endüstri 4.0'ın sunduğu yenilikçi çözümlerden biridir. Bekleme modu, özellikle sistem enerji tüketimini işletim moduna kıyasla önemli ölçüde azaltma kapasitesine sahiptir. Bu modun sistem enerji tüketimi işletim modu ile karşılaştırıldığında enerji sarfiyatını 10 kW'dan 3 kW'a kadar azaltarak, sürdürülebilir üretim pratiğine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır.

Bu özellik, enerji verimliliğini artırmaya yönelik etkileyici bir strateji sunar ve makinelerin kullanılmadığı veya düşük kapasitede çalıştığı durumlarda devreye girer ve enerji tüketimini düşürerek çevresel etkileri minimize eder. Özellikle, bekleme modu sayesinde sistem enerji tüketimi, işletim moduna kıyasla önemli ölçüde düşerek hem enerji tasarrufu hem de karbon ayak izini azaltma hedefine yönelik etkili bir strateji sağlar.

Bu özellik, sadece enerji verimliliği sağlamakla kalmaz, aynı zamanda makinelerin ömrünü uzatarak sürdürülebilir üretim sürecine katkıda bulunur. Endüstri 4.0'ın getirdiği bu akıllı teknoloji, üretici firmaların makinelerinin çevresel sürdürülebilirlik odaklı üretimde önemli bir rol oynamasını sağlar. Bu bağlamda, bekleme modu gibi inovatif özellikler, modern baskı endüstrisinin çevresel etkiyi azaltma ve enerji verimliliğini artırma hedeflerine ulaşmasına yardımcı olur.

Yüksek verimli kurutucular

Endüstri 4.0 teknolojileri, baskı makinelerinde, son derece hassas ve verimli bir işleme sahiptir. Bu makinelerde bulunan çeşitli özelliklerden biri de basılan tabakada mümkün olan en küçük açıklıkla çalışabilen gelişmiş kurutucuların tasarlanmasıdır. Bu kurutucular, baskı sürecindeki ıslak mürekkebin hızla kurumasını sağlayarak üretkenliği artırır. Yeni nesil baskı makinelerinin öne çıkan bir özelliği, çevresel sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği odaklı tasarımlarıdır. Bu özellikler, baskı işleminin çevresel uyumluluğunu artırmayı hedefler ve enerji ile malzeme kullanımını optimize etmeyi amaçlar. Yüksek verimli kurutucular, enerji tasarrufunu mümkün kılar ve aynı zamanda baskı sürecinin karbon ayak izini azaltmaya yönelik uygulanan bir adımdır.

Bu geliştirmeler, sadece üretkenliği ve kaliteyi artırmakla kalmaz, aynı zamanda endüstriyel süreçlerin çevresel etkilerini minimize etme amacını taşır. Bu şekilde, baskı makineleri, sadece teknik açıdan mükemmel sonuçlar elde etmekle kalmaz, aynı zamanda sürdürülebilir baskı uygulamalarına geçişi teşvik eder. Bu özellikler, modern baskı endüstrisinde çevresel sorumluluk ve kalite standardı arayan endüstri profesyonelleri için önemli bir çözüm sunmaktadır.

Dijital kontrollü nemlendirme ünitesi

Bu sistemde, nemlendirme çözeltisine ait mevcut miktar, döner ve dozaj merdaneleri ile belirlenip ölçülmektedir. Geliştirilen otomasyon sistemi, baskı merkezi üzerinden presleme/sıkma artıklarını otomatik olarak kontrol edebilmekte, bu da zaman ve emek tasarrufu sağlamaktadır. Ayrıca, nemlendirme ünitesinin temel ayarları dijital olarak kaydedilebilmekte ve nemlendirme çözeltisi ölçümü, kontrol üniteleri üzerinden tek taraflı ayarlanabilmektedir. Bu gelişme, matbaa endüstrisindeki nemlendirme ünitesi ayarlarının yanlış konfigürasyonundan kaynaklanan servis çağrılarını azaltmayı amaçlamaktadır. Yapılan açıklamalara göre, mürekkeple ilgili servis çağrılarının büyük bir kısmı nemlendirme ünitesinin doğru şekilde ayarlanmamasından kaynaklanmaktadır. Geliştirilen kontrol sistemi, bu sorunu çözmek ve dijital uzaktan servis için tanımlanabilir ve ölçülebilir ayarlar sunmak üzere tasarlanmıştır.

Baskı operatörleri kontrol paneli üzerinden artık tek taraflı nemlendirme ayarlarını daha hassas bir şekilde kontrol edebilmekte ve bu sayede daha hızlı tepki verebilmektedir. Bu, kirlenme (scumming) kısmına hassas biçimde yaklaşmayı mümkün kılarak, daha az kâğıt

atığını ve daha istikrarlı bir baskı üretimini destekler. Bu gelişmeler, matbaa endüstrisinde sürdürülebilir ve etkili üretim koşulları sağlamak adına önemli bir adım olarak değerlendirilebilir. Özellikle ambalaj baskısı süreçlerinde, yıkama süreleri önemli bir zaman faktörüdür ve bu süreleri azaltmak için merdaneler ve yıkama sistemleri üzerinde çeşitli iyileştirmeler yapılmaktadır. Yeni kontrol ünitesi yazılımları, kirlilik derecesi ve optimal yıkama programını akıllıca belirleme konusunda yardımcı olmaktadır. Ayrıca, su ve geleneksel veya UV mürekkepler yıkama sıvısı, merdane koruma sıvısı veya derin temizleyiciler gibi üç farklı ortamın mürekkepleme ünitesinde ölçülmesine imkân tanımaktadır.

Yeni nesil mürekkep merdaneleri, genişletilmiş akıllı yıkama sistem ve programları

Son yıllarda, blanket yıkama cihazları alanında yapılan araştırmalar, yeni teknolojilerin devreye alınmasıyla birlikte önemli gelişmelere tanık olmuştur. Bu kapsamda, modüler yapıdaki blanket yıkama cihazlarının bileşenleri üzerinde yapılan iyileştirmeler, özellikle %20'lik bir hafifletme sağlanarak sektöre önemli katkılar sunmuştur. Ayrıca, kaplama üniteleri için geliştirilen tam otomatik baskı silindiri yıkama cihazı, endüstriyel baskı makinelerindeki baskı işlemlerinde etkili bir performans sergilemektedir.

Lak üniteli iki yönlü baskı makinelerinde üç vardiyalı çalışmalarda manuel temizleme sürelerinde yılda yaklaşık 50 saatlik bir tasarruf sağlanmaktadır. Bu hem iş verimliliğini artırmakta hem de operasyonel maliyetleri düşürmektedir. Özellikle, mürekkep değişimlerinin sık olduğu durumlarda, yeni nesil mürekkep merdaneleri önemli avantajlar sunmaktadır. Uzun süreli testlerden geçirilen bu merdaneler, patentli yüzey kaplamaları sayesinde mükemmel baskı özellikleri sunmakta olup, yeniden yıkanma ihtiyacını minimize etmektedir. Bu gelişmeler, özellikle ambalaj baskı sektöründe önemli bir tercih sebebi haline gelmiştir. Yüksek kaliteli baskıların yanı sıra operasyonel verimliliğin artırılması, endüstriyel baskı süreçlerinde rekabet avantajı sağlamaktadır. Yeni teknolojilerle donatılmış blanket yıkama cihazları, ambalaj ve baskı endüstrisindeki hızlı ve yoğun üretim taleplerine karşı etkili çözüm sunarak sektördeki paylarını artırmaktadır.

Çalışmanın bu aşamasında önemli pazar payına sahip üretici firmalar tarafından mürekkep merdaneleri ile blanket yıkama cihazları alanında yapılan yenilikçi geliştirmeler ele alınmış ve endüstriyel baskı süreçlerindeki verimliliği artırmaya yönelik önemli katkıları vurgulanmıştır. Yapılan iyileştirmelerin özellikle ambalaj baskısı

alanında tercih edilen bir seçenek haline gelmesi, sektördeki rekabet avantajını güçlendirmiştir. Bu bağlamda, gelecekte yapılacak olan araştırmaların, endüstriyel baskı teknolojilerindeki ilerlemeleri daha da genişletmeye yönelik olması beklenmektedir.

Baskı kalıbı yönetimi dijital çözümleri

Baskı teknolojilerinde maliyet etkinliği, tekrarlanabilirliği ve kalitesi, giderek küçük tirajlı işler için de önem kazanmaktadır. Müşteri talepleri doğrultusunda, düşük tirajlı işler için 100 tabakaya kadar üretim yapma gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Ancak, manuel olarak yapılan kalıp değiştirme işlemleri operatör üzerinde büyük fiziksel gerginlik yaratmakta ve uzun vadede sürdürülebilir olmamaktadır.

Bu soruna bir çözüm olarak önerilen direkt kalıptan üniteye sistemleri, baskı kalıplarının tam otomatik olarak takılması ve çıkarılmasını sağlamaktadır. Bu sistem, saf mekanik özelliklerin ötesinde, dijital iş akışı entegrasyonunu da içermektedir. Kalıp değiştirme sürecini kolaylaştırmanın yanı sıra operatörlere gerçek zamanlı iş bilgileri sağlanıyor. Sensör kontrollü bir süreç aracılığıyla yüklenen kalıplar taranır; her form için gerekli tüm iş bilgileri alınır ve veriler önceden yüklenir, bu da çok hızlı hazırlıklara olanak tanır. Üretim yöneticisi araçları kullanılarak, iş planlamasında uygun bir baskı işi sıralaması tanımlanmakta, çıktı dizisi doğru bir şekilde belirlenmekte ve dijital olarak tanımlanabilir bir kalıp taşıma sistemine teslimat sağlanmaktadır. Bu süreç, örnek baskı makinelerinde 23 manuel müdahaleyi sadece 3'e indirerek zaman ve işgücü tasarrufu sağlamaktadır.

Ayrıca, daha az kalıp değiştirilecek işler için, operatöre rahatlama sağlayan bir diğer özellik ise kalıp arabasının bir mobil tarayıcı ile doğrulanması ve prosedürü ile galeri seviyesine kaldırılmasıdır. Bu sayede, operatöre iş hazırlığı sırasında ergonomik koşullar sunulmaktadır. Kalıp değişimi için gerekli sürede, tam otomatik kalıp değiştirici teknolojisi ile yüzde 30'un üzerinde azaltılmış, aynı anda gerçekleşen blanket yıkama ile ek süre gereksinimi ortadan kaldırılmıştır. Bu gelişmeler, baskı aşamasında daha hızlı, verimli ve sürdürülebilir üretim imkânı sağlamaktadır.

Sonuç olarak, Endüstri 4.0 teknolojileri, basım sanayisinde sürdürülebilir üretim hedeflerine ulaşmada önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır. Önemli Pazar payına sahip öncü firmaların benimsemiş olduğu bu teknolojiler, çevre dostu üretim ve enerji verimliliği konularında sektöre öncülük etmektedir.

2.4.2.2. Baskı üretim süreçlerinin uzaktan izlenmesi

Baskı ve ambalaj endüstrisinde, makinelerin ve baskı süreçlerinin uzaktan izlenmesi, kalite, verimlilik ve esneklik taleplerini karşılamak amacıyla kritik bir gereklilik haline gelmiştir. Bu uzaktan izleme, çalışma süresini en üst düzeye çıkarma, erken arıza tespiti, verimli bakım, maliyet tasarrufu ve optimize edilmiş küresel üretim ve lojistik gibi bir dizi avantaj sunmaktadır. Uzaktan izleme için temel araçlar şunlardır:

Telemetri ve sensör teknolojisi: Gerçek zamanlı verileri, sıcaklık, basınç, hız ve üretim oranları gibi, toplamak için sensörler ve telemetri sistemleri kullanılır.

Nesnelerin İnterneti platformları: IoT makinelerin bağlanmasını ve verilerin merkezi sunuculara veya bulut hizmetlerine aktarılmasını sağlar.

Uzaktan erişim yazılımı: Özel yazılım uygulamaları, teknisyenlerin ve mühendislerin uzak konumlardan makinelere erişmesine ve kontrol etmesine olanak tanır.

Veri analizi araçları: Toplanan verileri işlemek ve sorunlara veya bakım ihtiyaçlarına işaret edebilecek kalıpları belirlemek için gelişmiş veri analizi araçları kullanılır.

Artırılmış gerçeklik (AR) ve sanal gerçeklik (VR): Teknisyenler, sahadaki uzmanlardan gerçek zamanlı talimatlar için AR ve VR teknolojilerini kullanabilirler.

Uzaktan bakım sistemleri: Teknisyenlerin uzaktan bakım yapmalarına olanak tanıyan sistemlerdir, örneğin makine ayarlarını yaparak veya yazılım güncellemelerini gerçekleştirerek.

Alarm ve bildirim sistemleri: Kritik makine parametreleri normal aralığın dışında olduğunda veya bakım gerektiğinde otomatik alarmlar ve bildirimler tetiklenir.

Mobil uygulamalar: Özel mobil uygulamalar, kullanıcıların makine verilerini ve durum güncellemelerini mobil cihazlarından kontrol etmelerine olanak tanır.

Bulut platformları: Verilerin güvenli bir şekilde saklandığı ve işlenebildiği bulut ortamları, her yerden erişim ve analiz yapma imkânı sağlar.

Bu araçlar ve teknolojiler, baskı ve ambalaj endüstrisindeki makinelerin verimli uzaktan izlenmesi ve bakımı için hayati bir rol oynamaktadır, çünkü çalışma süresini maksimuma çıkarmak, arıza süresini en aza indirmek ve genel verimliliği artırmak gibi önemli avantajlar sunmaktadır.

2.4.2.3. Özelleştirme ve kişiselleştirme eğilimi

Teknolojik ilerlemeler, basım sanayisine özelleştirme ve kişiselleştirme imkânı sunmuştur. Geleneksel olarak, kitaplar, dergiler ve diğer basılı yayınlar kitlelere yönelik olarak üretilirdi. Ancak bugün Endüstri 4.0'ın gelişmesiyle birlikte dijital baskı teknolojileri ve kişisel verilere dayalı pazarlama stratejileri, müşterilere özelleştirilmiş içerik sunma imkânı sağlamıştır. Teknolojik ilerlemeler, özelleştirmeyi basım sanayisinde kolaylaştırmıştır. Bu eğilim, tüketici taleplerini karşılamak ve deneyimi daha kişiselleştirilmiş hale getirmek için kullanılan kişiselleştirilmiş kitaplar, dergiler ve reklam malzemeleri gibi ürünlerin ortaya çıkmasını sağlamıştır (Hsieh ve ark., 2019).

Reklamcılık alanında ise, şirketler müşterileri hedefleyen özelleştirilmiş promosyon malzemeleri ve reklam kampanyaları oluşturabilirler. Bu özelleştirme ve kişiselleştirme trendi, tüketicilerin taleplerini daha iyi karşılamak ve onlara benzersiz deneyimler için önemli fırsatlar sunar. Müşteriler daha fazla seçenek ve kişisel ifade imkânı bulurken, şirketler de müşteri sadakatini artırabilir ve pazarlama stratejilerini daha etkili hale getirebilirler. Özelleştirme ve kişiselleştirme, basım sanayisi geleceğinde daha da önemli bir rol oynayabilir ve müşteri memnuniyetini artırmaya devam edebilir (Tunçel, 2019).

2.4.2.4. Zorluklar ve fırsatlar

Basım sanayisi, dijitalleşme ve teknolojik ilerlemelerle birlikte önemli değişiklikler yaşamıştır. Basım sanayisi, dijital ortama uyum sağlamak ve teknolojik gelişmeler sayesinde daha verimli ve rekabetçi hale gelmektedir. Ancak basım sanayisi son yıllarda dijitalleşme ve teknolojik ilerlemelerle birlikte bazı avantajları ve fırsatların yanında, büyük zorluklar ve fırsatlarla karşı karşıyadır (Lovelace ve ark., 2014). Dijitalleşme ve elektronik yayıncılık, geleneksel basılı yayınların satışlarını olumsuz etkilerken, aynı zamanda yeni teknolojiler sayesinde daha geniş kitlelere ulaşma, daha hızlı üretim yapma ve düşük maliyetlerle yayınları dağıtma imkânı sunmaktadır. Bu teknolojik gelişmeler, üretim planlaması ve kalite kontrol aşamalarını daha etkin bir şekilde gerçekleştirme yeteneğiyle, basım süreçlerini iyileştirmiştir. Yüksek hızlı baskı makineleri, otomasyon ve stok kontrol sistemleri gibi faktörler, baskı sürecini hızlandırarak maliyetleri düşürmeye katkıda bulunmaktadır (Gencan Acar ve Yılmaz, 2013).

2.5. Basım Sanayisinde Endüstri 4.0 Teknolojileri

Endüstri 4.0, üretim süreçleri ile bütünleşen otomasyon ve dijitalleşme gibi teknolojik ilerlemeleri temsil eden bir kavramdır. Bu dönüşüm, çeşitli sektörlerde verimliliği artırmak, süreçleri optimize etmek ve rekabet gücünü yükseltmek amacıyla benimsenmiştir (Bai ve ark., 2020). Endüstri 4.0 gelişmiş birçok ülke tarafından temelleri atılmış ve devamı için güçlü adımlar atmaktadırlar. Amerika, Almanya, Finlandiya ve Çin gibi ülkelerde Endüstri 4.0 ile ilgili çalışmalar yapılmakta olduğu görülmektedir (Yıldız, 2018). Basım sanayisi, I4.0 teknolojileriyle büyük bir dönüşüm sağlamaktadır. Otomasyon, veri analitiği, yapay zekâ ve diğer ileri teknolojiler, basım süreçlerini daha verimli, esnek ve özelleştirilebilir hale getirmektedir. Bu teknolojilerin kullanımı, basım sanayisinin rekabet gücünü artırırken aynı zamanda kalite kontrolü, bakım ve servis gibi alanlarda da önemli iyileştirmeler sağlamaktadır. Gelecekte, Endüstri 4.0'ın etkisiyle basım sanayisinde daha fazla inovasyon ve gelişim beklenmektedir. (Kluczek ve ark., 2023).

Araştırmanın bu aşamasında basım sanayisinde I4.0 teknolojilerinin kullanımına yönelik uygulama alanları ve avantajları ele alınacaktır.

2.5.1. Otomasyon ve verimlilik

Endüstri 4.0, otomasyon ve verimlilik odaklı bir dönüşüm sürecidir. Akıllı makineler, sensörler ve veri analitiği gibi teknolojiler, üretim süreçlerini daha etkin ve hızlı hale getirerek işletmelere önemli avantajlar sunar. Bu teknolojiler ayrıca, hataların gerçek zamanlı izlenip düzeltilmesine olanak tanır, tedarik zinciri yönetimi ve işgücü dönüşümü gibi alanlarda olumlu etkiler sağlar. Ancak, bu dönüşüm sürecinde işletmelerin teknik, organizasyonel ve güvenlikle ilgili zorlukları aşabilmek için stratejik bir yaklaşım benimsemeleri ve uygun önlemleri almaları önemlidir. Çalışanların yeni teknolojilere uyum sağlaması için eğitim ve destek de kritik bir rol oynar, böylece işletmeler Endüstri 4.0'ın sunduğu fırsatları en etkili şekilde değerlendirebilirler (Bal ve Erkan, 2019).

Otomasyon, üretim süreçlerinde insan müdahalesini azaltarak işleri hızlı ve hatasız bir şekilde gerçekleştirmeyi amaçlar. Örneğin; baskı makineleri baskı sırasında oluşan renk hatalarını optik okuyucular ve kameralarla tespit eder, hatalı olan renk düzeltmelerini yapması için gerekli komutları sisteme otomatik olarak girerek, mürekkep haznesini

kontrol eden vanaların mürekkep akışını düzeltir, bu sayede hatanın otomatik olarak düzeltilmesini sağlar. I4.0 teknolojileri, istenilen baskı hedeflerine ulaşmak için akıllı sensörler ve yapay zekâ sistemleri gibi araçlar sunar. Bu teknolojiler, tekrarlayan görevleri otomatize ederek üretim hattındaki işçilerin daha karmaşık görevlere odaklanmasını sağlar (Janczar, 2024). Endüstri 4.0 teknolojileri, gelişmiş bir altyapı ile veri toplama, analiz ve paylaşma yetenekleri sunar. Veri analitiği, süreçlerdeki iyileştirme potansiyellerini ortaya çıkararak verimlilik artışına katkıda bulunabilir. Üretim hatlarının performansı, üretkenlik ve enerji tüketimi gibi faktörler analiz edilebilir ve optimize edilebilir. Bu da işletmelere daha verimli ve rekabetçi üretim süreçleri tasarlama imkânı sağlar. (Rüßmann ve ark., 2015). I4.0 teknolojileri aynı zamanda tedarik zinciri yönetiminde de büyük faydalar sağlar. Akıllı lojistik sistemleri, ürünlerin takibini ve yönetimini kolaylaştırır. Bu sayede, stok düzeyleri optimize edilebilir, malzeme kayıpları azaltılabilir ve tedarik süreçleri daha verimli hale getirilebilir. Ayrıca, tedarik zinciri içindeki farklı bileşenler arasında gerçek zamanlı veri paylaşımı, daha iyi koordinasyon ve hızlı reaksiyon imkânı sağlar (Gabriel ve Pessl, 2016).

Ancak Endüstri 4.0'ın getirdiği otomasyon ve verimlilik işletmelerin büyümesini ve yenilenmesini sağlaması gibi avantajlarıyla birlikte bazı zorluklar da vardır. Özellikle, mevcut işgücünün bu teknolojilere uyum sağlaması ve yetkinliklerini geliştirmesi gerekmektedir. Eğitim ve dönüşüm programlarıyla işçilerin yeni teknolojileri kullanma becerileri geliştirilmelidir. Ayrıca, veri güvenliği ve altyapı gibi konular da dikkate alınmalıdır (Blunck ve Werthmann, 2017). Chris Janczar'a (2024) göre, otomasyon sistemleri sadece verimsizlikleri ortadan kaldırarak süreçleri kolaylaştırmakla kalmaz, aynı zamanda insan sermayesini katma değerli görevlere odaklanması için güçlendirir.

2.5.2. Esneklik ve özelleştirme

I4.0 bileşenleri ile geliştirilmiş akıllı fabrikalarda gerçekleştirilen üretimler yeniden planlanabildiklerinden hammadde, malzeme, ürün veya program değişikliği gibi etkenlere bağlı olarak senkron biçimde güncellenebilmektedirler. Bu esneklik ile üretim değişikliklerine asgari düzeyde müdahale ile entegre olmasına izin vermektedir. Endüstri 4.0'ın basım sanayisine getirdiği esneklik ve özelleştirme imkânları, müşteri taleplerine hızlı yanıt verme yeteneğini artırır (Şekkeli ve Bakan, 2018). I4.0, üretim süreçlerindeki veri toplama ve analiz yeteneklerini artırır. Bu sayede, üretim süreçlerinin izlenmesi,

sorunların tespit edilmesi ve iyileştirmelerin yapılması kolaylaşır. Veri analitiği, kalite kontrolünü iyileştirir ve hataları azaltır. (Bal ve Erkan, 2019). Basım şirketlerinin çeşitli müşteri talep ve beklentilerini karşılayabilmesi için üretim süreçleri daha kolay uyarlanabilir. I4.0'ın ilerleyen dönemlerde daha da gelişmesiyle birlikte, basım sanayisinde esneklik ve özelleştirme potansiyeli daha da artacak ve müşteri taleplerine hızlı yanıt verme imkânı sağlanacaktır. Bu sayede, basım şirketleri müşteri beklentilerini daha kolay karşılayabilir ve rekabet avantajı edebilir (Villalba-Diez ve ark., 2019).

2.5.3. Kalite kontrolü

Kalite kontrolü, bir üretim sürecinin ayrılmaz bir parçasıdır. Kaliteli ürünlerin üretimi, müşteri memnuniyetini artırır, geri çağırma ve iade gibi maliyetli durumları önler ve şirketin itibarını güçlendirir. Geleneksel kalite kontrol yöntemleri zaman alıcı, maliyetli ve hata oranına açık olabilirken, I4.0 teknolojileri bu süreçleri daha verimli, hızlı ve hatasız hale getiriyor. Sensörler ve görüntü işleme teknikleri kullanılarak gerçek zamanlı kalite kontrolü sağlanır, bu da hatalı üretimi önleyerek kalite standartlarına uygunluğu temin eder. Bu, şirketlerin rekabet gücünü artırmanın yanı sıra müşteri memnuniyetini ve üretim verimliliğini yükseltir (Şekkeli ve Bakan, 2018).

Endüstri 4.0'ın kalite kontrol süreçlerine getirdiği en büyük yeniliklerden biri sensör teknolojileridir. Üretim hatlarına entegre edilen sensörler, ürünlerin çeşitli özelliklerini ölçerek gerçek zamanlı veriler elde eder. Bu sensörler, ürünlerin boyutlarını, ağırlıklarını, sertliklerini, renklerini ve diğer kalite kriterlerini sürekli olarak izleyebilir. Bu veriler, hataların erken tespit edilmesini sağlar ve üretim hattındaki problemleri hızla çözme imkânı sunar. Görüntü işleme teknikleri de basım sanayisinde kalite kontrol süreçlerinin iyileştirilmesinde büyük bir etkiye sahiptir. Kameralar ve bilgisayar algoritmaları kullanılarak ürünlerin görüntüleri analiz edilir ve istenmeyen hatalar veya kusurlar tespit edilir. Bu teknikler, insan hatasını en aza indirir ve daha objektif bir kalite kontrol süreci sağlar (Blunck ve Werthmann, 2017). Örneğin, ambalajlanmış bir ürünün etiketindeki yazıların doğru olduğunu kontrol etmek veya baskı kalitesini değerlendirmek için görüntü işleme teknikleri kullanılabilir.

I4.0 teknolojileri ayrıca veri analitiği ve yapay zekâ algoritmalarıyla entegre edilerek kalite kontrol süreçlerini daha da geliştirebilir. Büyük veri analizi sayesinde, üretim sürecindeki verilerin analiz edilerek anlamlı bilgilere dönüştürülmesi mümkün olur.

Yapay zekâ algoritmaları ise hataları tahmin edebilir ve kalite kontrol sürecindeki iyileştirmeler için önerilerde bulunabilir (Bal ve Erkan, 2019). I4.0 teknolojilerinin kalite kontrol süreçlerindeki bu önemli katkıları, basım sanayisinin gelecekte daha kaliteli ve sürdürülebilir üretim yapabilmesini sağlayacaktır.

I4.0 teknolojisinin uygulanmasıyla üretimde kullanılan optik okuyucular, densitometreler ve spektrofotometreler makineler üzerine adapte edilip, kalite kontrolün baskı sırasında yapılması ve hatalı üretimin önüne geçilmesi sağlanmıştır. Böylelikle zaman kaybının, enerjinin, hammaddenin ve insan gücü kaybının önüne geçilmiş olup, tasarruf sağlanmıştır.

2.5.4. Bakım yönetimi

Endüstri 4.0 teknolojileri, basım makinelerinin bakım ve servis süreçlerini daha verimli hale getirir. Sensörler ve veri analitiği gibi ileri teknolojileri kullanarak makinelerin durumunu ve çalışma performansını izler. Bu sayede, basım makinelerinin gerçek zamanlı verileri toplanarak analiz edilir, böylece makinelerin anlık durumu ve performansı takip edilebilir. Bu izleme sistemi, bakım ihtiyaçlarını önceden tespit edebilir, bakım süreçleri planlanabilir, arıza süreleri minimize edilebilir ve gereksiz bakım işlemleri ortadan kaldırılarak makinelerin daha verimli çalışması sağlanabilir (García ve García, 2019). Bu teknolojilerin birçok farklı yönü bulunmakla birlikte, bu aşamada özellikle I4.0 teknolojilerinin basım makinelerinin bakım ve servis süreçlerini nasıl iyileştirdiği üzerinde durulacaktır.

Sensörler, makinenin çeşitli parametrelerini izler ve herhangi bir anormallik veya arıza durumunda operatörlere ve bakım ekiplerine anlık bildirim gönderir. Bu sayede, planlı bakım ve servis işlemleri gerçekleştirilebilir, beklenmedik üretim duruşlarının önüne geçilebilir. Bakım ihtiyaçlarının önceden tespit edilebilmesi, makinelerin daha uzun ömürlü olmasını sağlar ve işletmelere önemli ölçüde maliyet tasarrufu sağlar. Örneğin, bir makinedeki bir aşınma veya hatalı bir bileşenin tespit edilmesi durumunda, bu durumun çözümü için gerekli önlemler alınabilir. Bu, daha büyük bir arızanın meydana gelmesini engelleyerek, arıza sürelerini minimize eder ve üretim sürekliliğini artırır (MacArthur ve Waughray, 2016).

Ayrıca, veri analitiği ve makine öğrenimi gibi I4.0 teknolojileri, makinelerin performansını optimize etmek için kullanılabilir. Toplanan veriler, makine davranışlarının analiz edilmesi ve iyileştirilmesi için kullanılabilir. Bu sayede, makineler daha verimli çalışır, enerji tüketimini azaltır ve üretim kapasitesini artırır. Bu da işletmelere maliyet tasarrufu, üretim sürekliliği ve rekabet avantajı sağlar. I4.0 teknolojilerinin kullanımıyla birlikte, basım sektörü daha akıllı, verimli ve sürdürülebilir bir şekilde gelişmeye devam edecektir (Bal ve Erkan, 2019).

2.6. Basım Sanayisinde Sürdürülebilir Üretim

Bu çalışma, basım sanayisinde sürdürülebilir üretim konusundaki bilgi eksikliklerini doldurarak, akademi ve sektördeki paydaşlara değerli bir perspektif sunmayı amaçlamaktadır. Endüstriyel sektörlerin sürdürülebilirlik hedeflerine yönelik artan talep üzerinde odaklanarak, basım sanayisinde sürdürülebilir üretimi desteklemek adına benimsenen maliyetleri ve çevresel etkileri azaltmak için çeşitli çözüm yöntemleri, enerji verimliliği, malzeme kullanımı, atık yönetimi ve dijital dönüşüm gibi kilit alanlarda nasıl etki sağlayabileceğini işlenmektedir.

Basım sanayisinde sürdürülebilirlik, ekonomik, çevresel ve sosyal boyutlarıyla bir dizi avantaj ve etki sağlayabilir. Sürdürülebilir üretim, çevresel, sosyal ve ekonomik açılardan dikkate alınarak kaynakların etkin kullanılmasını ve atıkların azaltılmasını hedefleyen bir üretim yaklaşımını ifade eder. Basım sanayisinde sürdürülebilir üretim, Tablo 2.6'da belirtilen çevresel etkilerin azaltılmasını, enerji ve su verimliliğini arttırmayı, geri dönüşümü teşvik etmeyi ve toksik maddelerin kullanımını sınırlamayı içerir. Bu yaklaşım, sanayi faaliyetlerinin uzun vadeli sürdürülebilirlik ilkesine uygun olmasını ve toplumsal fayda sağlamasını amaçlar. (Aydemir ve ark., 2023).

Tablo 2.6. Basım sanayisinde sürdürülebilir üretim önlemleri (Wikina ve ark., 2010)

Malzemeler / Yan Ürünler	Önerilen Sürdürülebilir Uygulamalar
Enerji	%100 yerel kaynaklı yenilenebilir enerji kullanımı
Su	Susuz baskının benimsenmesi ve dijital süreçler kullanarak su kullanımının azaltılması
Atıklar	Atıkların (baskı kalıpları, mürekkep kutuları, paletler, ambalajlar) yeniden kullanılması ve geri dönüştürülmesi
Emisyonlar	Baskı öncesi kimyasalların mümkün olduğunca az kullanılması
Mürekkepler	Petrol bazlı mürekkepler yerine bitkisel bazlı mürekkepler kullanılması. (Bitkisel bazlı mürekkepler, yenilenebilir kaynaklar olan bitkisel yağlardan elde edilir.)

2.6.1. Basım sanayisinde sürdürülebilir üretimin etkileri

Araştırmanın bu aşamasında basım sanayisinde sürdürülebilir üretim kavramını, sürdürülebilir üretimin neden önemli olduğunu ve Tablo 2.7'de verilen bazı sürdürülebilir üretim yöntemlerini inceleyeceğiz. Basım sanayisi, yüzyıllardır bilgi ve iletişim alanında önemli bir rol oynamıştır. Ancak, konvansiyonel basım süreçleri çevresel etkilere yol açabilir ve kaynakların aşırı tüketimine neden olabilir. Özellikle baskı aşamasında gerçekleştirilen işlemlerde yüksek enerji kullanımı, kâğıt, mürekkep ve kimyasal kullanımının bir sonucu olarak çevresel kirliliğe katkıda bulunabilir. Bu durum, basım sanayisinin sürdürülebilirlik açısından gözden geçirilmesi ve çevre dostu uygulamalara yönelik adımlar atılması gerekliliğini ortaya koymaktadır (Masurel, 2007). Birçok baskı işleminde kullanılan kimyasallardan bazıları potansiyel olarak çevreye zararlı olmaktadır. Baskı şirketleri en çok çevre kirliliğine neden olan endüstrilerden birini temsil etmektedir (Blansch, 1995). Henüz paydaşları arasında yeterli ve sağlam sürdürülebilirlik konsensüsü oluşmamışsa da baskı endüstrisi, sürdürülebilir üretim hedeflerine ulaşmada en önemli endüstrilerden biri olarak varsayılmaktadır (Yılan ve ark., 2020).

Tablo 2.7. Basım sanayisinde sürdürülebilir üretimin etkileri

Basım Sanayisinde Sürdürülebilir Üretimin Etkileri				
Çevresel Faydaları	**Ekonomik Faydalar**		**Toplumsal ve Sosyal Faydalar**	
Mürekkeplerin çevresel etkileri	Verimlilik artışı ve maliyet tasarrufu	Çalışan motivasyon, bağlılık ve memnuniyeti	Toplumsal farkındalık ve bilinçlenme	Teknolojik gelişmelerin teşviki ve istihdam olanakları
Kimyasalların çevresel etkileri	İnovasyon ve teknolojik gelişmeler	Atık azaltma ve geri dönüşüm	İnsan sağlığı ve iş güvenliği	Toplumsal inovasyon ve bilgi transferi
Enerji kaynaklarının çevresel etkileri	İş sürekliliği ve risk yönetimi	Müşteri memnuniyeti ve marka değeri	Çevresel bilinç ve sorumluluk	

Diğer sektörlere benzer şekilde, iyi yönetilen baskı ve ilgili işletmeler stratejik hedefler kullanmalıdır. Bu hedefler, işletmenin yeşil teknoloji, yenilenebilir ve geri dönüştürülebilir olmasının yanı sıra ekonomi açısından kârlı olması anlamında sürdürülebilirliği de sağlamalıdır. Basım ve ilgili sektörlerde başarıya yönelik planlamalar, iç ve dış paydaşlar için kârlı olurken yalın, yeşil ve sürdürülebilir olan çevreye duyarlı süreçler oluşturmayı içermelidir. Bu nedenle, basım sanayisinde sürdürülebilir üretim yöntemlerinin benimsenmesi önemlidir (Wikina ve ark., 2010).

2.6.1.1. Çevresel faydaları

Günümüzde, sürdürülebilirlik kapsamında çevresel etkilerin azaltılması önemli bir konu haline gelmiştir. Çevre dostu uygulamaların yaygınlaşması ve çevresel etkilerin azaltılması giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Artan nüfus, toplam ekonomik hacim ve insan tüketim düzeyleri; kaynak kıtlığı, iklim değişikliği, ozon tabakasının incelmesi, arazi gerilemesi ve çevre kirliliğinin kötüleşmesi gibi sorunlara yol açmıştır (Bekmezci, 2015). Matbaacılık ve ilgili endüstriler, yoğun enerji ve kaynak kullanımı nedeniyle çevre kirliliğinin ana kaynaklarından birini oluşturmaktadır. Basım sanayisi gibi birçok

sektörde kullanılan mürekkepler, kimyasallar ve enerji kaynakları doğaya zarar verebilmektedir. Ancak, sürdürülebilir üretim yöntemleri benimsendiğinde, üretim gerçekleştirilen sektörlerin çevresel etkileri azaltılabilir ve çevre dostu bir yaklaşım sunulabilir (Amon-Tran ve ark., 2012). Daha çevre dostu mürekkeplerin kullanımı, kimyasalların toksikliğini azaltmak için su bazlı solventlerin tercih edilmesi ve enerji verimliliğinin artırılması gibi stratejiler, basım sanayisinde çevresel etkileri en aza indirmek için önemli adımlardır. Sürdürülebilir basım süreçleri, kâğıt gibi doğal kaynakların daha etkili bir şekilde kullanılmasına ve ormanlar gibi doğal kaynakların korunmasına yönelik de uygulamaları içerir. Ormanların korunması ve ağaç kesiminin azaltılmasıyla birlikte biyoçeşitliliğin korunması, ekosistemlerin dengesine, erozyonun azaltılmasına ve habitatların korunmasına katkıda bulunabilir. Bu stratejilerin benimsenmesi, doğal kaynakların korunmasına, hava ve su kirliliğinin azaltılmasına ve sürdürülebilir bir geleceğin oluşturulmasına katkı sağlayacaktır (Omer, 2008).

Mürekkeplerin çevresel etkileri

Basım sanayisi, kitaplar, dergiler, broşürler, ambalaj malzemeleri ve diğer materyallerin üretimini içeren geniş bir sektördür. Bu sektörde kullanılan mürekkepler, çoğunlukla petrokimya kökenli bazı kimyasallardan oluşur. Bu kimyasallar, üretim ve kullanım sürecinde çevresel etkilere neden olabilir. Özellikle, VOC olarak bilinen maddelerin yayılması havayı kirletebilir ve solunum yolu rahatsızlıklarına neden olabilir. Ayrıca, bazı mürekkeplerin içerdikleri ağır metaller nedeniyle toprak ve su kaynaklarını da kirletebilir. Sürdürülebilir üretim yöntemleri, basım sanayisinde kullanılan mürekkeplerin çevresel etkilerini azaltmak için bir dizi strateji sunar. Örneğin, daha çevresel mürekkeplerin kullanılması, VOC emisyonlarını azaltabilir ve hava kalitesini korumaya yardımcı olabilir. Ayrıca, geri dönüştürülmüş malzemelerden yapılan mürekkeplerin kullanımı, doğal kaynakların korunmasına katkı sağlar (Aydemir ve Özsoy, 2020).

Kimyasalların çevresel etkileri

Basım sanayisinde kullanılan diğer kimyasallar da çevresel etkilere neden olabilir. Baskı işlemlerinde kullanılan bazı solventler, toksik ve havaya yayılan kimyasallar içerebilir. Bu solventlerin kullanımı, hava kalitesini olumsuz yönde etkileyebilir ve insan sağlığına zarar verebilir. Sürdürülebilir üretim yöntemleri, basım sanayisinde kullanılan kimyasalların çevresel etkilerini azaltmak için çeşitli stratejiler sunar. Örneğin, su bazlı

solventlerin kullanımı, toksik etkileri azaltabilir ve hava kirliliğini önleyebilir. Ayrıca, atık yönetimi süreçlerinin iyileştirilmesi ve kimyasal atıkların doğru bir şekilde bertaraf edilmesi de çevresel etkilerin azaltılmasına yardımcı olur (Larsen ve ark., 2009).

Enerji kaynaklarının çevresel etkileri

Fosil yakıtlara dayalı enerji kaynaklarının kullanımı, sera gazı emisyonlarına ve iklim değişikliğine katkıda bulunabilir. Ayrıca, enerji tüketimi de doğal kaynakların tükenmesine ve çevre üzerindeki baskıların artmasına neden olabilir (Dinçer ve Rosen 1998). Basım sanayisinde enerji yoğunluklu işlemler gerçekleştirildiği için enerji kaynaklarının kullanımı önemli bir konudur. Sürdürülebilir üretim yöntemleri, basım sanayisinde enerji kullanımını azaltmak ve çevresel etkileri en aza indirmek için çeşitli yaklaşımlar sunar. Örneğin, enerji verimliliğini artırmak için enerji tasarruflu ekipmanların kullanımı teşvik edilebilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı da çevre dostu bir yaklaşım sunar ve fosil yakıtların kullanımını azaltabilir (Lipiak ve Salwin, 2019).

2.6.1.2. Ekonomik faydalar

Basım sanayisinde sürdürülebilir üretim, ekonomik sonuçlar açısından bir dizi avantaj sağlayabilir. Sürdürülebilir üretimin sağladığı bazı ekonomik faydaları;

Verimlilik artışı ve maliyet tasarrufu: Sürdürülebilirlik, enerji ve hammadde kullanımını optimize etme, atık azaltma ve geri dönüşüm gibi uygulamalarla işletmelerin genel verimliliğini artırabilir. Bu, işletmelerin maliyetleri düşürmesine ve daha verimli bir şekilde kaynakları kullanmasına olanak tanır (Lipiak ve Salwin, 2019).

Rekabet avantajı: Tüketiciler ve iş ortakları, çevre dostu ve sürdürülebilir üretim uygulamalarına daha fazla ilgi göstermeye başladıkça, sürdürülebilir üretim benimseyen şirketler rekabet avantajı elde edebilirler. Sürdürülebilir iş uygulamalarına sahip olan şirketler, bu özellikleriyle pazarlama avantajı elde edebilir ve müşteri sadakatini artırabilir. Bu durum mevcut müşterileri korumanın yanında yeni pazarlara ve müşterilere ulaşma potansiyelini artırabilir (Engin ve Akgöz, 2013). Karmaşık bir yapı olan sürdürülebilirlik basitleştirilmiş modelinde, 34 Avrupa ülkesinden oluşan örneklemden elde edilen makalede elde edilen sonuçların analizi; sürdürülebilir rekabetçiliğin ekonomik boyutu üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu, çevresel boyutun etkisinin ise kişi

başına elde edilen GSYİH düzeyine bağlı olarak önemli ölçüde daha zayıf olduğu vurgulanmıştır (Despotovic ve ark., 2016).

İnovasyon ve teknolojik gelişmeler: Sürdürülebilirlik, işletmelerin daha verimli ve çevre dostu üretim süreçler ile teknolojileri geliştirmelerini teşvik eder. Bu da şirketin teknolojik liderlik konumunu güçlendirebilir ve inovasyonu teşvik ederek şirketleri rekabet avantajına kavuşturabilir. Yeni teknolojilere geçiş, dış piyasa koşullarının yanında firmanın iç yetkinlerine de bağlıdır (Omer, 2008).

İş sürekliliği ve risk yönetimi: Sürdürülebilirlik stratejileri, işletmelerin çevresel ve sosyal risklere karşı direncini artırmada önemli bir rol oynayabilir. Örneğin, enerji verimliliği önlemleri sayesinde şirketler, enerji fiyatlarındaki dalgalanmalara karşı direnç geliştirerek mali stabilitelerini koruyabilir. Aynı zamanda, sosyal sorumluluk projeleri aracılığıyla şirketler, toplumla olumlu bir ilişki kurma konusunda katkı sağlayabilir. Ancak, bazı durumlarda standart sürdürülebilirlik uygulamaları, işletmeler için temel stratejik riskler oluşturabilir. Bu nedenle, daha yenilikçi modeller ve radikal gelişmeler, sürdürülebilirlik uygulamalarında daha az stratejik risk içerebilir. Bu durum, işletmelerin çevresel ve sosyal dirençlerini güçlendirme ve stratejik riskleri en aza indirme hedeflerine daha etkili bir şekilde hizmet edebilecekleri anlamına gelir (Cavaleri ve Shabana, 2018).

Çalışan motivasyon, bağlılık ve memnuniyeti: Sürdürülebilirlik stratejileri, çalışanların şirketleriyle gurur duymalarını sağlayabilir ve şirket kültürüne bağlılıkları ile motivasyonlarını artırabilir. Aynı zamanda, enerji tasarrufu ve çevre dostu uygulamalar, işyerinde daha sağlıklı bir ortam yaratılmasına katkıda bulunabilir. Sosyal sorumluluk projeleri ve çevre dostu uygulamalar, şirketin çekiciliğini artırabilir. (Engin ve Akgöz, 2013).

Atık azaltma ve geri dönüşüm: Sürdürülebilirlik üretimi, işletmelerin çevresel etkilerini azaltma ve kaynakları daha etkili kullanma stratejisidir. Bu kapsamlı yaklaşım, atık üretimini minimize etmeyi, geri dönüşümü artırmayı ve malzeme döngüsünü teşvik etmeyi amaçlar. Atık azaltma, işletmelerin üretim süreçlerini optimize ederek atık maliyetlerini düşürürken çevresel etkileri azaltır. Geri dönüşüm teşviki, kullanılmış malzemelerin ikinci bir hayat bulmasını sağlar, kaynak tükenmesini önler ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından önemlidir. Sürdürülebilirlik üretimi, işletmelerin ekonomik çıkarlarına odaklanırken çevresel ve sosyal sorumluluklarına hizmet eder, atık

maliyetlerini düşürür, doğal kaynakları korur ve sürdürülebilir bir çevre bırakma amacını taşır (Omer, 2008).

Müşteri memnuniyeti ve marka değeri: Sürdürülebilir üretim uygulamalarını benimseyen şirketler, müşterileri tarafından daha olumlu bir şekilde değerlendirilebilir. Bu, marka değerini artırarak müşteri sadakatini güçlendirebilir. Ayrıca, sürdürülebilir iş uygulamalarına sahip şirketlere olan yatırımcı ilgisi giderek artmaktadır. Yatırımcılar, çevresel ve sosyal sorumlulukları olan şirketlere yatırım yapma eğilimindedirler. Şirketin çevresel ve sosyal sorumluluklarına odaklanması, daha geniş bir müşteri kitlesi ve yatırımcı kitlesi çekebilir, aynı zamanda yatırımcılar ile tüketiciler arasında güven oluşturabilir. Bu durum, şirketin finansal performansını olumlu bir şekilde etkileyebilir (Engin ve Akgöz, 2013).

Basım endüstrisinde sürdürülebilir üretim, ekonomik sonuçlar açısından genellikle uzun vadeli başarı ve sürdürülebilir büyüme için stratejik avantajlar sunar. Bu avantajlar, işletmelerin çevresel ve sosyal sorumluluklarını yerine getirmelerini, maliyetleri düşürmelerini ve rekabet avantajı elde etmelerini sağlar. Ancak, bu avantajları elde etmek için baskı şirketlerinin etkili stratejilerin benimsenmesi ve uygulanması önemlidir. Bu noktalar, sürdürülebilirlik uygulamalarının ekonomik faydalarını temsil etmektedir (Wikina ve ark., 2010).

2.6.1.3. Toplumsal ve sosyal faydalar

Basım sanayisinde sürdürülebilirlik, çeşitli toplumsal etkiler ve sosyal faydalar sağlayabilir. Bu faydalardan bazıları şu şekillerde özetlenebilir:

Toplumsal farkındalık ve bilinçlenme: Şirketlerin sürdürülebilirlik çabaları, toplumun çeşitli kesimlerini sürdürülebilirlik konularında bilinçlendirme ve toplumsal katılımı artırma potansiyeline sahiptir. Eğitim programları ve bilinçlendirme çabaları, genel bilgi düzeyini artırarak sürdürülebilirlik konusundaki farkındalığı yaygınlaştırabilir. Sürdürülebilir basım uygulamaları, çevre dostu davranışları teşvik ederek toplumda olumlu değişikliklere katkıda bulunabilir. Hem şirketlerin hem de tüketicilerin sürdürülebilirlik konusunda bilinçlenmesi, daha geniş bir sürdürülebilirlik kültürünün oluşturulmasına katkı sağlayabilir. Ayrıca, sivil toplum kuruluşları, yerel topluluklar ve diğer paydaşlar arasında iş birliği ve iletişim, sürdürülebilirliğin sosyal etkilerini

güçlendirebilir. Bu bağlamda, şirketlerin liderlik ettiği sürdürülebilirlik çabaları, toplumun geneline yayılan pozitif değişimlere öncülük edebilir (Cavaleri ve Shabana, 2018).

İnsan sağlığı ve iş güvenliği: Sürdürülebilir basım süreçleri genellikle daha güvenli ve sağlıklı çalışma koşullarını gerektirir. Bu süreçlerde zararlı kimyasal maddelerin azaltılması, iş güvenliği standartlarının yükseltilmesi ve daha sağlıklı çalışma koşullarının oluşturulması, işçi sağlığını koruma açısından önemli bir rol oynar. Bu uygulamalar, iş kazalarının önlenebilmesine katkı sağlar ve çalışanların sağlığını ve refahını olumlu yönde etkileyebilir. Aynı zamanda, toplum sağlığına yönelik olumlu etkilerle birlikte, sürdürülebilir basım süreçleri işçi sağlığı ve güvenliği konusunda bir standart oluşturarak, iş dünyasında daha geniş bir etki yaratma potansiyeline sahiptir (Larsen ve ark., 2009).

Çevresel bilinç ve sorumluluk: Sürdürülebilir baskı ve basım yöntemleri, toplumda çevresel bilinç oluşturabilir ve şirketlerin çevresel sorumluluklarını yerine getirmelerini teşvik edebilir ve enerji tasarrufu yapılmasına ile çevresel etkilerin azaltılmasına katkıda bulunabilir. Geri dönüştürülebilir malzemelerin kullanımı ve atıkların azaltılması, çevresel sürdürülebilirliği artırabilir. Bu, tüketicilerin çevre dostu ürün ve hizmetlere yönelmesine ve şirketlerin bu konuda daha sorumlu davranmasına yol açabilir (Engin ve Akgöz, 2013).

Teknolojik gelişmelerin teşviki ve istihdam olanakları: Sürdürülebilirlik hedefleri, yeni ve daha çevre dostu teknolojilerin geliştirilmesini teşvik eder. Bu da hem sektördeki iş fırsatlarını artırabilir hem de daha yenilikçi çözümlerin topluma kazandırılmasına yardımcı olur. Aynı zamanda, sürdürülebilirlikle ilgili uzmanlık alanlarında iş gücü talebini artırabilir. Bu, toplumda işsizlikle mücadeleye ve ekonomik kalkınmaya katkıda bulunur (Lipiak ve Salwin, 2019).

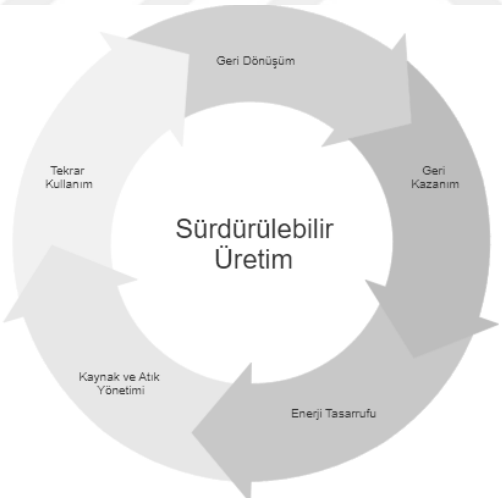
Toplumsal inovasyon ve bilgi transferi: Sürdürülebilir basımın önemli bir yanı, sektördeki profesyonellerin ve çalışanların sürekli eğitim ve bilgi transferini teşvik edebilir. Bu, sektördeki tüketici ve profesyonellerin sürdürülebilirlik konusunda daha bilinçli olmalarına yardımcı olabilir. Ayrıca, inovasyonu destekleyerek sektörde sürdürülebilir teknolojik süreçlerin hızlanmasına ve geliştirilmesine olanak tanır. Toplumun genel bilgi düzeyini ve rekabet avantajını artıran yenilikçi çözümler, toplum sorunlarına daha sürdürülebilir ve etkili şekillerde yaklaşılmasını sağlayacaktır. İletişim

teknolojilerindeki gelişme süreci, işletmeleri daha ulaşılabilir ve gerçekleştirilen çalışmaları incelenebilir hale getirmiştir (Engin ve Akgöz, 2013).

Bu faktörler, sürdürülebilir basımın geniş bir sosyal fayda yelpazesine katkıda bulunabileceğini, toplumun genel refahına ve çevresel sürdürülebilirliğe olumlu etkiler sağlayabileceğini göstermektedir. Bu etkiler, sürdürülebilir basımın toplumsal düzeyde bir dönüşüm sağlayarak daha sağlıklı, bilinçli ve çevresel açıdan sorumlu bir toplum oluşturmasını göstermektedir (Nandini ve ark., 2021).

2.6.2. Basım sanayisinde sürdürülebilir üretim çözüm yöntemleri

Günümüzde, endüstriyel sektörlerin birçoğu, sürdürülebilirlik ilkelerine odaklanarak çevresel etkileri azaltma ve kaynakları daha etkili kullanma yollarını araştırmaktadır. Bu kapsamda, basım sanayisi de önemli bir alan olarak öne çıkmaktadır. Basım sektörünün, I4.0 teknolojilerini de benimseyerek Şekil 2.15'de gösterilen sürdürülebilir üretim süreçlerini nasıl geliştirebileceği konusu, gün geçtikçe daha fazla önem kazanmaktadır (Radermacher, 2016).



Şekil 2.15. Sürdürülebilir üretim süreçleri

2.6.2.1. Geri dönüşüm ve geri kazanım

Günümüzde sürdürülebilirlik, çevresel sorunlar ve kaynak verimliliği konuları giderek artan bir öneme sahiptir. Geri dönüşüm süreci, yeni ham madde teminindeki maliyetleri azaltır ve enerji tasarrufu sağlar. Aynı zamanda, geri dönüşüm sektörü istihdam oluşturan bir sektördür ve ekonomik büyümeye katkıda bulunur. Bu yöntemler, atık yönetimi, çevre

koruma ve kaynak verimliliği açısından büyük avantajlar sunar (Omer, 2008). Hem çevresel etkilerin azaltılması hem de ekonomik faydaların elde edilmesi açısından, geri dönüşüm ve geri kazanım süreçlerinin yaygınlaştırılması önemlidir. Baskıaltı materyalleri, mürekkep ve diğer baskı malzemelerinin üretiminde kullanılan selüloz, elyaf, maden, kimyasallar ile bunların üretim ve atık bertarafında harcanan enerji sürdürülebilir ürün yaşam döngüsünde önemli yer kaplamaktadır (Wikina ve ark., 2010).

Atık yönetimi ve geri dönüşüm süreçleri, pek çok sektörde olduğu gibi basım sanayisinde de büyük bir önem arz etmektedir. Geri dönüşüm ve geri kazanımın basım sanayisinde kullanılan malzemeler için sağladığı avantajlar sadece çevresel değil, aynı zamanda ekonomik olarak da önemlidir. Basım sektörü, bu süreçlere aktif bir şekilde katılım sağlayarak sürdürülebilir bir geleceğe katkıda bulunabilir. Baskı alanında uzmanların, çevre sorunları, malzeme ve üretimleri, ambalaj tasarımı ve lojistiği hakkında bilgi sahibi olmalıdır. Kâğıt, mürekkep, baskı kalıpları, temizlik maddeleri ve enerji gibi baskı bileşenleri çevre üzerinde çeşitli etkilere sahiptir. Bu etkilerin azaltılması veya ortadan kaldırılması için çok sayıda yaklaşım bulunmaktadır (Amon-Tran ve ark., 2012).

Kâğıt, karton ve ambalaj malzemeleri

Basım sanayisinde kullanılan kâğıt, karton ve ambalaj malzemeleri, geri dönüşüm ve geri kazanım yöntemleriyle tekrar kullanılarak çevresel ve ekonomik avantajlar sağlar. Bu malzemeler, basım sektörünün temel unsurları olarak önemli bir rol oynar ve kullanıldıktan sonra geri dönüşüm ile tekrar kullanılabilirler. Özellikle kâğıt, karton ve ambalaj malzemelerinin geri dönüşümü, çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük bir öneme sahiptir ve aynı zamanda ekonomik olarak da verimlilik sağlar. Bu yöntemler, kaynakların etkili bir şekilde kullanılmasını destekler ve atıkların azaltılmasına katkıda bulunarak sürdürülebilir bir basım sanayisi için önemli bir adımı temsil eder (Aydemir ve ark., 2023). Kâğıt ve karton malzemeleri, yaygın olarak gazete, dergi, kitap, broşür, el ilanı gibi basılı ürünlerin üretiminde kullanılan temel malzemelerdir. Basım sektöründe büyük miktarda kâğıt ve karton atığı ortaya çıkar ve bu atıkların doğru bir şekilde yönetilmesi büyük önem taşır. Bir baskı işinin karbon ayak izini küçültmek için önemli etkenlerden biri kâğıttır. Özelliklerine ve nasıl üretildiğine bağlı olarak kâğıt, toplam CO_2 emisyonlarının %60-80 ini kapsamaktadır (Amon-Tran ve ark., 2012). Geri dönüşüm süreci, kullanılmış kâğıt ve karton malzemelerin toplanması, ayrıştırılması, geri kazanımı

ve tekrar kullanılabilir hale getirilmesi aşamalarını içerir. Geri dönüşüm şirketleri, belediyeler veya atık yönetimi kuruluşları tarafından toplanan kullanılmış kâğıt ve karton malzemeleri, öncelikle türlerine göre ayrıştırılır. Ayrıştırılan malzemeler, daha sonra geri kazanım işlemine tabi tutulur (Oliveira ve ark., 2018).

Geri dönüşüm ve geri kazanım yöntemleri, basım sanayisinde sadece kâğıt ve karton malzemeleri için değil, aynı zamanda ambalaj malzemeleri için de büyük bir öneme sahiptir. Ambalaj malzemeleri, ürünlerin korunması, taşınması ve tanıtılması için kullanılan malzemelerdir. Özellikle plastik ambalajlar, çevre kirliliği ve atık sorunları açısından büyük bir sorun oluşturur. Bu nedenle, geri dönüşüm ve geri kazanım yöntemleriyle plastik ambalaj malzemelerinin tekrar kullanılabilir hale getirilmesi önemlidir (Wikina ve ark., 2010).

Mürekkep ve kimyasal yönetimi

Basım sanayide kullanılan geleneksel mürekkepler ve kimyasallar, çevreye ve insan sağlığına zararlı olabilen toksik maddeler içerebilir. Çevre dostu ve geri dönüştürülebilir mürekkep ve kimyasalların tercih edilmesi, toksik maddelerin miktarı azaltılarak çevresel risk ve etkilerin azalmasına yardımcı olur. Mürekkep ve kimyasal yönetimi, çevre dostu mürekkep ve kimyasalların kullanımını ve toksik maddelerin azaltılmasını hedefleyen bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım hem çevresel etkilerin azaltılmasına hem de sürdürülebilirlik ilkesine uygun bir şekilde faaliyet gösterilmesine katkıda bulunur (Larsen ve ark., 2009). Mürekkep ve kimyasal yönetimi, işletmelerin mürekkep ve kimyasalların kullanımını planlama, denetleme ve optimize etme sürecidir. Bu yönetim yaklaşımı, toksik madde kullanımı en aza indirmeyle birlikte atıkları azaltmayı ve çevresel etkileri en düşük seviyede tutmayı hedefler. Ayrıca, çevresel düzenleme ve standartlara uyum sağlamayı, sürdürülebilirlik ilkelerini göz önünde bulundurmayı amaçlar (Nandini ve ark., 2021).

Geri dönüştürülebilir mürekkeplerin tercih edilmesinin faydaları;

- **Çevresel etkilerin azaltılması:** Baskı sektöründe kullanılan mürekkep ve kimyasalların üretimi, kullanımı ve atılması, çevresel etkilere neden olabilir. Bu etkiler arasında su ve toprak kirliliği, hava kirliliği ve doğal kaynakların tükenmesi yer alır. Çevre dostu mürekkeplerin ve kimyasalların kullanılmasıyla, bu olumsuz etkilerin azaltılması sağlanır. Geri dönüştürülebilir mürekkeplerin tercih edilmesi, çevresel etkilerin azaltılmasına önemli bir katkı sağlar (Yılan ve ark., 2020).

- **Enerji tasarrufu ve karbon ayak izi azaltılması:** Geri dönüştürülebilir mürekkep ve kimyasalların tercih edilmesi, üretim sürecinde enerji tasarrufu sağlar ve karbon ayak izinin azaltılmasına yardımcı olur. Daha az enerji kullanımı ve atık oluşumuyla, çevresel olarak daha sürdürülebilir bir seçenek elde edilir (Omer, 2008).
- **İnsan sağlığının korunması:** Toksik maddelerin azaltılması, çalışanların ve tüketicilerin sağlığını korumada önemli bir faktördür. Çevre dostu mürekkep ve kimyasal kullanımında, potansiyel sağlık sorunlarına maruz kalma riski azalır ve çalışma ortamı daha güvenli hale gelir. İnsan ve eko toksisite etkileri açısından, baskı sırasında ve baskı sonra temizleme işlemlerinde kullanılan solventlerin emisyonlarının zararları giderilmesi hedeflenmektedir (Larsen ve ark., 2009).
- **Kaynakların korunması ve atık miktarının azaltılması:** Baskı tekniklerinde kullanılan geri dönüştürülebilir mürekkep ve kimyasallar, doğal kaynakların tükenmesi ve atık oluşumu önlenir veya azaltılır. Geri dönüştürülebilir malzemelerin yeniden kullanılması veya geri dönüştürülmesiyle, yeni mürekkep üretimi için gereken ham madde miktarı azalır ve enerji tasarrufu sağlanır (Nandini ve ark., 2021).

2.6.2.2. Enerji tasarrufu ve enerji verimliliği

Enerji temini ve kullanımıyla ilgili sorunlar küresel ısınmanın yanında ozon tabakasının delinmesi, hava kirliliği, orman tahribatı ve radyoaktif maddelerin emisyonu gibi çevresel sorunlarla da alakalıdır. Asgari düzeyde çevresel etki ile sürdürülebilir enerji geleceği elde edebilmek için bu konuların aynı anda dikkate alınması gerekmektedir. İnsanların çevreye zarar vermeye devamları halinde geleceğin olumsuz etkileneceğini gösteren pek çok kanıt bulunmaktadır. Enerji, çevre ve sürdürülebilir kalkınma arasında yakın bir bağ vardır. Sürdürülebilir kalkınmayı amaçlayan toplumlar, çevresel etkiye neden olmayan enerji kaynaklarını tercih etmelidirler (Dinçer ve Rosen 1998). Günümüzde sürdürülebilirlik ve çevre koruma, endüstriyel faaliyetlerin önemli bir parçası haline gelmiştir. Basım süreçlerinde enerji tasarrufu ve verimliliğini artırmak, kaynakların etkin kullanımını sağlar. Su kullanımını azaltmak için geri dönüşümlü su sistemleri tercih edilebilir. Basım sektörü de bu kapsamda enerji ve su verimliliği konularına odaklanarak, kaynakların etkin kullanımını sağlama amacıyla çeşitli yöntem ve tedbirler uygulanmaktadır (Lipiak ve Salwin, 2019).

Basım sürecinde en önemli unsurlardan biri baskı makineleridir. İyi izole edilmiş baskı makineleri, enerji tasarrufu sağlar. Bu makineler, ısı kaybını en aza indirerek enerji verimliliğini artırır. Isı kaybının azaltılması, daha az enerji tüketimi anlamına gelir ve böylece enerji maliyetlerini düşürür. İş başına karbondioksit (CO_2) emisyonlarının %60 - %90 oranı kapsadığından, daha az enerji tüketimiyle birlikte daha az CO_2 emisyonu da ortaya çıkar. Bu emisyonların %90'a kadar azaltabilecek yöntemler ile çevresel etkileri azaltmaya yardımcı olur. Basım atölyelerinde enerji verimli aydınlatma sistemleri kullanılması önemlidir. Ayrıca, enerji verimli ekipmanlar kullanmak da önemlidir. Yeni nesil baskı makineleri, daha az enerji tüketimiyle daha yüksek verimlilik sunar. Bu sayede, enerji maliyetlerinin düşürülmesi ve çevresel etkilerin azaltılması sağlanır (Amon-Tran ve ark., 2012).

2.6.2.3. Kaynak ve atık yönetimi

Basım süreçlerinde oluşan atıkların doğru bir şekilde yönetilmesi ve geri dönüşümü de enerji ve su verimliliği açısından önemlidir. Kâğıt, mürekkep ve diğer malzemelerin geri dönüşümü, doğal kaynakların korunmasına ve enerji tasarrufuna katkı sağlar. Baskı süreçlerinde oluşan atıkların (Tablo 2.8.) atık yönetimi süreçlerinin düzenli olarak gözden geçirilmesi ve iyileştirilmesi, atık miktarının azaltılmasına ve verimliliğin artırılmasına yardımcı olur (Nandini ve ark., 2021).

Tablo 2.8. Basım sanayisinde oluşan baskı atıkları (Nandini ve ark., 2021)

BASKI ATIKLARI				
Baskı Öncesi		**Baskı**		**Baskı Sonrası**
Kâğıt atıklar	Toner atıkları	Kâğıt atıklar	Su atıkları	Kâğıt atıklar
Film atıkları	Su atığı	Mürekkep atıklar	Kimyasal atıklar	Metal atıklar
Kalıp, klişe atıkları	Kimyasal atıklar	Kalıp, klişe atıkları		Tutkal atıklar

Basım sürecinde su, önemli bir kaynaktır ve kullanımının azaltılması büyük önem taşır. Bu nedenle, geri dönüşümlü su sistemleri tercih edilebilir. Bu sistemler, kullanılan suyun geri kazanılmasını ve tekrar kullanılmasını sağlar. Örneğin, baskı makinelerinde kullanılan su, uygun arıtma yöntemleriyle temizlenerek geri dönüşüme tabi tutulabilir. Böylece, su tüketimi azaltılarak su kaynaklarının korunması ve su maliyetlerinin düşürülmesi sağlanır. Süreç optimizasyonu yöntemiyle su kaynağının yanında diğer malzeme ve enerji tüketimi açısından verimli kaynak üretim hattı tasarlamak mümkün hale gelmektedir (Blunck ve Werthmann, 2017).

Basım süreçlerinde kaynakların etkin kullanımı, enerji ve su verimliliğini artırırken çevresel etkileri azaltır. İyi izole edilmiş baskı makineleri, geri dönüşümlü su sistemleri, enerji verimli aydınlatma ve ekipmanlar, atık yönetimi ve geri dönüşüm gibi uygulamalar, basım sektöründe sürdürülebilir hedefler için önemlidir. Bu yöntemlerin benimsenmesi hem çevresel açıdan hem de ekonomik açıdan avantaj ve basım sektörünün gelecekte daha sürdürülebilir şekilde faaliyet göstermesini sağlar (Amon-Tran ve ark., 2012).

2.6.2.4. Baskı sektöründe sürdürülebilir müşteri etkileşimi

Touchpoint Sustainability (TPS), genellikle işletmelerin ve markaların müşterileriyle etkileşimde bulundukları noktalarda sürdürülebilirlik ilkelerini uygulama anlamına gelir. Bu yaklaşım, müşteri ile marka veya işletme arasındaki her türlü temas veya etkileşim anını içerir. TPS, sürdürülebilirlik stratejilerini müşteri deneyimi ve işletme süreçleriyle entegre ederek, markaların ve işletmelerin çevresel, sosyal ve ekonomik sorumluluklarına odaklanmalarına yardımcı olur.

TPS'nin temel unsurları şunlar olabilir:

Ürün tasarımı ve malzeme seçimi: Sürdürülebilir malzemelerin kullanımı, geri dönüştürülebilir ambalajlar ve enerji verimliliği gibi unsurlar, ürün tasarımı ve malzeme seçiminde önemlidir.

Enerji ve kaynak verimliliği: İşletme süreçlerinde enerji ve kaynakların verimli kullanımıyla ilgili önlemler alınması.

Adil iş uygulamaları: Tedarik zinciri boyunca adil çalışma koşulları ve etik iş uygulamalarına odaklanılması.

Müşteri eğitimi ve bilinçlendirme: Müşterilere sürdürülebilirlikle ilgili konularda bilgi verilmesi ve farkındalık oluşturulması.

Toplumsal katkı: Sosyal sorumluluk projelerine katılım ve toplulukla etkileşimde bulunma.

Şeffaflık ve iletişim: İşletmelerin sürdürülebilirlik çabalarını açıkça iletişim kurarak paylaşmaları.

Bu unsurlar, işletmelerin müşteri etkileşimlerini sürdürülebilirlik perspektifiyle ele almalarını ve tüketicilerle daha bilinçli bir şekilde iletişim kurmalarını sağlar. Bu, marka sadakatini artırabilir ve sürdürülebilirlik ilkelerine duyarlı müşteri kitlesini çekebilir. TPS, işletmelerin sadece çevresel değil, aynı zamanda sosyal ve ekonomik sürdürülebilirlik konularında da etkili bir şekilde hareket etmelerine olanak tanır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma basım sanayinde faaliyet gösteren kurum ve kuruluşlara I4.0 teknolojilerinin, güçlü sürdürülebilirliğe geçiş ile döngüsel ekonominin önem ve kazanımlarını gösteren özgün bir çalışma olma niteliği taşımaktadır. Endüstri 4.0 nispeten yeni bir stratejik trend ve dijital teknolojilere sahip siber-fiziksel sistemlerden oluşan bir değerler bütünüdür. Basım sanayisinde Endüstri 4.0 teknolojilerinin benimsenmesi ile sürdürülebilir hedefler açısından ekonomik, çevresel ve sosyal kazanımlar üreten eko-verimlilik araçlarına ve döngüsel ekonomiye etkilerinin değerlendirilmesi, basım sanayisinde faaliyet gösteren sektör temsilcileri ile araştırmacılar arasında iş birliği yapılması ve güçlü sürdürülebilir stratejilere geçişin hızlandırılması amaçlanmaktadır.

Ayrıca bu araştırma ile baskı sektörü geneli için yapılan inceleme ve analizler aracılığıyla ekonomik, çevresel ve sosyal sürdürülebilirliğin sağlanmasında I4.0 teknolojilerin katkıda bulunma potansiyelinin önemini ortaya koyarak mevcut literatürü zenginleştirmesi, çalışmanın özgün değer hedefleri arasındadır.

Bu çalışmada kullanılan metodoloji yöntemi olarak, yayın sayısını, anket yapılan ülkeleri, dergileri, araştırma yöntemlerini, basım sektörü kurum ve kuruluşlarını değerlendirmek için I4.0 teknolojilerin, sürdürülebilir stratejik hedeflerin ve döngüsel ekonominin baskı sektöründe uygulanmasının işletmelerde oluşturacağı olumlu/olumsuz etkileri analiz etmek için sistematik literatür taraması tercih edilmiştir.

Mevcut durumda basım sanayisi, Endüstri 4.0 ve sürdürülebilirlik alanlarında ayrı ayrı yeterli düzeyde bilimsel çalışmalar yapıldığı düşünüldüğünde, hepsinin ayrıntılı bir şekilde incelenmesi yerine tüm boyutlarıyla görülmesini sağlayacak metodolojilerin kullanımı daha faydalı bir seçenektir. Bu yöntemlerden sistematik literatür taraması tercihinde bulunmak, araştırmacılara zaman ve emek tasarrufu sağlayarak söz konusu araştırmayla ilgili daha da bilgi edinilmesini sağlamaktadır (Yıldız, 2022).

3.1. Literatür Taraması

Bu araştırma, basım sanayisinde I4.0 teknolojilerinin sürdürülebilir üretime olan etkilerini ayrıntılı bir şekilde incelemek amacıyla, mevcut literatürün kapsamlı bir taramasını gerçekleştirmiştir. Endüstri 4.0 çerçevesindeki teknolojiler, sürdürülebilirlik

ve basım endüstrisi konularında yapılan önemli akademik çalışmalar, kitaplar ve bilimsel yayınlar, bu tarama süreci sonucunda belirlenmiştir.

Araştırmanın odak noktası olan “Endüstri 4.0”, “Basım Sanayisi”, “Sürdürülebilirlik”, “Basım Sanayisinde Endüstri 4.0” ve "Basım Sanayisinde Sürdürülebilirlik” anahtar kelimeleri kullanılarak derlenen akademik çalışmalar, bu alanda önemli bilgi ve perspektifler sunmaktadır. Endüstri 4.0'ın kapsamını anlamak için, sadece bilimsel akademik literatürle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda sektörel veri tabanlarından elde edilen bilgiler de dâhil edilmiştir. Bu sayede, Endüstri 4.0'ın yalnızca teorik bir kavram olmanın ötesinde, gerçek dünyada nasıl uygulandığı ve basım endüstrisinde sürdürülebilir üretime nasıl katkı sağladığı daha detaylı bir perspektifle ele alınmıştır.

Literatür taraması sırasında belirlenen kaynaklar, tezin temelini oluşturarak Endüstri 4.0 teknolojilerinin basım sanayisindeki sürdürülebilir üretime etkilerini sistematik bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımaktadır.

3.2. Doküman Analizi

Basım sanayisinde I4.0 teknolojileri ile güçlü sürdürülebilir hedeflere giden yol haritasını geliştirmek için, bilgilerin doğruluğuna ilişkin hataları en aza indirmeyi amaçlayan atıf yöntemi olarak sistematik literatür taraması ve analizi kullanılmıştır. Bu yöntem, geniş bilimsel araştırma veri tabanlarının kullanılması nedeniyle önemli makalelerin ve bilgilerin çalışmaya dâhil edilmesini sağlayarak elde edilecek sonuçları güçlendirmektedir. Bu analizlerin Endüstri 4.0'ın teknoloji portföyünün sürdürülebilir kalkınmanın ana hedeflerine ulaşılmasına nasıl sağlanacağın araştırılmasının gelecekteki araştırmaları da motive edeceği düşünülmektedir.

Endüstri 4.0'ın birçok sektörde bütüncül yaklaşım göz önünde bulundurularak geliştirildiği görülmektedir. Bu nedenle, sürdürülebilirlik ve Endüstri 4.0'ın ilgi alanlarındaki entegrasyonlarından elde edilen faydaların bağlantısı üzerine ayrı araştırmalara odaklanılmış olunacaktır. Kullanılacak bu metodolojiler sayesinde hazırlanan bu çalışmanın temel amacının mevcut durum analizinin yanında gelecek süreçlerde yapılacak olan araştırmalara da ayrıntılı ve özel yönergeler sağlanmış olacaktır.

3.2.1. Seçilen dokümanlar

Literatür taraması sonucunda belirlenen akademik makale ve dokümanlar, hazırlanan tez kapsamında temel referans kaynakları olarak seçilmiştir. Bu belgeler, endüstri 4.0'ın önde gelen teknoloji uygulamaları, sürdürülebilirlik stratejileri ve basım endüstrisi süreçleri üzerine odaklanarak, bu teknolojilerin basım sanayisinde sürdürülebilir üretime olan etkilerini daha kapsamlı bir şekilde anlamamıza olanak tanımaktadır.

Seçilen dokümanlar aracılığıyla, endüstri 4.0'ın basım endüstrisi içindeki teknolojik yeniliklerini, üretim süreçlerini ve sürdürülebilirlik hedeflerini nasıl şekillendirdiğini inceleyerek, bu etkilerin detaylı bir analizinin sunulması hedeflenmiştir. Teknoloji uygulamaları bağlamında, özellikle akıllı üretim sistemleri, Nesnelerin İnterneti, yapay zekâ, akıllı fabrika, büyük veri analitiği ve 3D baskı gibi endüstri 4.0'a özgü unsurları ele almaktadır. Aynı zamanda, sürdürülebilirlik stratejileri açısından incelenen kaynaklar, enerji verimliliği, atık azaltma ve çevresel etkilerin minimize edilmesi gibi konulara odaklanarak, basım endüstrisinde sürdürülebilir üretim hedeflerine nasıl katkı sağlandığını açıklamaktadır.

Teknoloji uygulamaları, sürdürülebilirlik stratejileri ve basım endüstrisi süreçleri üzerine odaklanan bu dokümanlar, tezin temelini oluşturarak I4.0 teknolojilerinin basım sanayisinde sürdürülebilir üretime olan etkilerini anlamak ve çok yönlü bir şekilde değerlendirilmesini sağlayacaktır.

3.2.2. İçerik analizi

Elde edilen doküman verileri, içerik analizi yöntemleri kullanılarak detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu analiz, I4.0 teknolojilerinin sürdürülebilir üretime olan etkilerini belirlemek ve önemli temaları tanımlamak amacını taşımaktadır.

Dokümanlardaki anahtar kelimeler, bulgular ve öneriler, içerik analizi sürecinde ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme, Endüstri 4.0'ın basım endüstrisi içindeki konumunu ve sürdürülebilir üretime olan katkılarını anlamamıza yardımcı olacak önemli bilgileri ortaya çıkarmayı hedeflemiştir. Anahtar kelimeler aracılığıyla belirlenen öncelikli konular, I4.0 teknolojilerinin nasıl uygulandığı, hangi süreçlere odaklandığı ve sürdürülebilirlik açısından nasıl bir katkı sağladığı gibi kilit unsurları içermektedir.

Analiz süreci, dokümanlardan çıkarılan verilerin düzenli bir şekilde sınıflandırılmasını ve bu verilerin tezin amaçlarına uygun şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. Bu sayede, tezin ana hipotezleri ve soruları çerçevesinde Endüstri 4.0 teknolojilerinin basım sanayisinde sürdürülebilir üretime olan etkileri daha derinlemesine anlaşılacaktır.

3.3. Veri Toplama

Veri toplama süreci, belirlenen anahtar kelimelerle yapılan arama sorguları ve bu sorgular sonucunda elde edilen makalelerin analizini içermektedir. Makaleler, ilgili konu başlıkları, metodoloji, bulgular ve öneriler gibi önemli bilgileri içeren bir özetle değerlendirilmektedir. Bu süreç, önde gelen akademik veri tabanları (IEEE Xplore, ScienceDirect) ve geniş kapsamlı arama motorları (Google Scholar) kullanılarak güvenilir literatürün tespitini amaçlamaktadır. "Basım Sanayisinde Endüstri 4.0 Teknolojilerinin Sürdürülebilir Üretime Etkileri" başlıklı tezin literatürdeki güncel bilgileri ve araştırma bulgularını sistematik bir şekilde derlemeyi hedeflemektedir. Toplanan veriler, içerik analizi yöntemleri ile incelenerek tez konusuna uygun temalar, bulgular ve önerilerin belirlenmesi ile tezin güçlü bir literatür temeli oluşturmasına katkı sağlaması amaçlanmıştır.

3.3.1. Endüstri 4.0 teknolojilerinin belirlenmesi

Endüstri 4.0 kapsamında gerçekleştirilen literatür taraması, endüstriyel süreçlerin dönüşümünde önemli rol oynayan teknolojik unsurları belirlemek amacıyla yapılmıştır. Bu bağlamda, çeşitli literatür kaynakları incelenerek, özellikle IoT, IoS, büyük veri analitiği, AI, robotik sistemler, dijital ikizler ve diğer ilgili teknolojik unsurlara odaklanılmıştır. Bu teknolojik unsurların literatürdeki incelemesi, Endüstri 4.0'ın temel yapı taşlarını ve bunların basım endüstrisinde sürdürülebilir üretime olan potansiyel etkilerini anlamak için temel bir adım oluşturmaktadır.

3.3.2. Basım sanayisine özgü verilerin toplanması

Çalışmamız kapsamında, basım endüstrisine ait mevcut süreçlere yönelik ayrıntılı bir literatür taraması gerçekleştirilmiş ve bu süreçlerle ilgili önemli üretim verileri ile performans metrikleri belirlenmiştir. Literatürdeki güncel çalışmalar ve endüstri raporları, basım endüstrisindeki üretim süreçleri hakkında detaylı bilgi sağlamak adına

incelenmiştir. Bu adım, I4.0 teknolojilerinin uygulanmasının potansiyel etkilerini değerlendirmek üzere temel referans noktalarını oluşturma amacı büyük öneme sahiptir.

Literatür haricinde İstanbul'da bulunan büyük ölçekteki matbaalara ve makine ithalatçılarına gidilip, matbaaların Endüstri 4.0 tecrübeleri, ithalatçılardan da gelecekteki makine ve teçhizatların hangi teknolojilerle piyasaya sunulacağı hakkında bilgiler derlenmiş ve tezde kullanılmıştır.

Literatürdeki kaynaklardan elde edilen bilgiler, basım endüstrisindeki genel üretim süreçleri, kullanılan teknolojiler, süreçlerdeki veri toplama yöntemleri ve performans metrikleri üzerine yapılmış çeşitli analizleri içermektedir. Bu bilgiler, I4.0 teknolojilerinin entegrasyonu öncesindeki durumu bize sunarak, bu teknolojilerin uygulanmasının getirebileceği yenilikleri ve iyileştirmelerin daha iyi anlaşılmasına olanak sağlamaktadır. Özellikle, literatürdeki kaynaklar aracılığıyla toplanan üretim veri ve performans metrikleri, Endüstri 4.0'ın uygulanmasının ardından ortaya çıkabilecek değişiklikleri belirleme ve bu değişikliklerin sürdürülebilir üretime olan etkilerini değerlendirme aşamasında kritik bir rol oynamaktadır. Bu veriler, literatür taramasının sağladığı temel referans noktaları olarak, araştırmanın analitik çerçevesini oluşturacaktır.

3.4. Metodolojik Çerçeve

Bu tez, literatürdeki bulguların sentezlenmesi ve analizi üzerine odaklanan bir metodoloji benimsemektedir. "Basım Sanayisinde Endüstri 4.0 Teknolojilerinin Sürdürülebilir Üretime Etkileri" başlıklı çalışma, I4.0 teknolojilerinin sürdürülebilir üretime olan etkilerini anlamak ve mevcut bilgileri sentezlemek amacıyla doküman analizi yöntemlerini temel metodoloji olarak benimsemektedir.

Bu metodoloji, literatürdeki I4.0 teknolojileri hakkındaki önemli makaleler, kitaplar ve bilimsel yayınları ayrıntılı bir şekilde incelemeyi içermektedir. Doküman analizi yöntemleri, bu kaynaklardan elde edilen verileri sistematik bir şekilde değerlendirmeyi ve sentezlemeyi amaçlamaktadır. Literatürdeki Endüstri 4.0 teknolojilerinin sürdürülebilir üretime etkilerine dair çeşitli bakış açılarını bir araya getirerek, mevcut bilgilerin kapsamlı bir şekilde analiz edilmesini sağlamaktadır.

Bu çerçevede, doküman analizi yöntemleri, belirlenen anahtar konular, bulgular ve öneriler üzerinde derinlemesine bir analiz yapma imkânı tanımaktadır. Literatürdeki bu

bilgilerin sentezi, Endüstri 4.0 teknolojilerinin basım endüstrisinde sürdürülebilir üretime olan potansiyel etkilerini daha bütünlük içinde anlamamıza katkı sağlamaktadır. Bu metodoloji, tezin temel bulgularını ortaya koymak ve bu bulguları kapsamlı bir şekilde analiz etmek için güçlü bir analitik çerçeve sunmaktadır.

3.5. Analiz Süreci

Literatürdeki dokümanlar, bu tez kapsamında tematik kodlama ve içerik analizi gibi analitik yöntemlerle sistematik bir şekilde incelenmiştir. Bu analitik süreç, Endüstri 4.0 teknolojilerinin basım sanayisinde sürdürülebilir üretime etkilerini anlamak adına ortaya çıkan önemli bulguları vurgulamayı amaçlamıştır.

Belirlenen tematik kodlama yöntemi, literatürdeki ana temaları ve kilit kavramları belirlemek üzere kullanılmıştır. Bu kapsamlı analiz, Endüstri 4.0 teknolojilerinin basım endüstrisinde sürdürülebilir üretime olan etkilerini daha ayrıntılı bir şekilde anlamamıza ve bu etkilerin çeşitli boyutlarını ortaya koymamıza yardımcı olmuştur.

İçerik analizi, belirlenen tematik kodlar aracılığıyla belirlenen literatür kaynaklarının detaylı bir değerlendirmesini sağlamıştır. Bu değerlendirme, Endüstri 4.0 teknolojilerinin basım endüstrisindeki uygulanabilirlik, avantajlar ve potansiyel zorluklar gibi konularda sağlam bir anlayış geliştirilmesine imkân tanımıştır.

Bu analitik yöntemler, tezin ana amacına ulaşmak ve I4.0 teknolojilerinin basım sanayisinde sürdürülebilir üretime olan etkilerini bilimsel bir temelde ele almak adına benimsenmiştir. Elde edilen bulgular, literatürdeki önemli perspektifleri sentezleyerek, bu teknolojilerin basım endüstrisindeki rolünü ve sürdürülebilir üretime olan katkılarını daha derinlemesine anlamamıza olanak sağlamaktadır.

4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

4.1. Tartışma

Bu araştırmanın amacı, ilk olarak baskı sektöründe Endüstri 4.0 uygulamalarının sürdürülebilir performansını teşhis etmektir. Bu bölümde, her bir alt problemi ele alarak elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde incelenecek ve bu sonuçlar, literatür taraması sürecinde belirlenen, araştırmanın temel amacına yakın çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılacaktır. Bu karşılaştırmalar, amacımıza hizmet eden alt problemlerin sonuçlarının mevcut bilgi birikimi içindeki yerini netleştirmemize yardımcı olacaktır.

Endüstri 4.0, müşteri ihtiyaçlarına günümüzden daha hızlı yanıt verme kapasitesini sağlayacağını belirten Rüßmann ve ark. (2015) gerçekleştirdikleri araştırmaya göre, üretim sürecinin esnekliğini, hızını, üretkenliğini ve kalitesini artırarak, yeni iş modellerini ve diğer inovasyonları benimsemek için sağlam bir temel oluşturmaktadır. Gün geçtikçe daha fazla endüstriyel üretici, tekliflerini iyileştirmek ve özelleştirmek amacıyla I4.0 teknolojilerine yatırım yapmakta, bunun da gelecekte kitlesel özelleştirmenin yeni bir seviyesini mümkün kılabileceği vurgulanmaktadır. Üreticilerin yanı sıra tedarikçiler de Endüstri 4.0 teknolojilerini benimserken altyapı ve gerekli işgücü eğitimini uyarlatılması için çalışmalı ve bu geçişin en iyi şekilde başarmak için hükümet, endüstri kuruluşları ve işletmeler gibi tüm paydaşların dâhil olduğu ortak bir çaba ile başarılacağı vurgulanmaktadır.

CBDDO (2022) tarafından hazırlanan araştırma raporunda yeşil teknolojilerin şirketler tarafından benimsenmesinin önemli engellerle karşı karşıya olduğu vurgulanmaktadır. Bu engeller arasında yüksek maliyetler, bilgi eksikliği, alternatif ham madde ve süreç teknolojilerinin yokluğu, performans etkileri konusundaki belirsizlik ve insan kaynakları ile kapasite eksikliği bulunmaktadır. Engellerin aşılması süreci, hükümet, özel sektör ve sivil toplum kuruluşları gibi çeşitli paydaşların katılımıyla karmaşıklaşmaktadır. Yeşil büyüme ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak, bu engellerin tespit edilmesi ve aşılması ile doğrudan ilişkilidir. Bu bağlamda, Tablo 4.1'de ayrıntılı aktarılan paydaşların motivasyon ve etki alanları, yeni teknolojilerin benimsenme sürecinde kritik bir rol oynadığı belirtilmiştir.

Tablo 4.1. Yeni teknolojilerin motivasyon ve etki alanları (Escap, 2012; akt. CBDDO, 2022)

Paydaşlar	Motivasyon	Etki Alanı
Devletler/Yönetim Düzeyi	• Gelişme hedefleri • Çevre hedefleri • Rekabet üstünlüğü • Güvenlik	• Vergilendirme • İthalat/İhracat • Yenilik politikaları • Eğitim ve kapasite geliştirme • Düzenleyici programlar • Kurumsal gelişim • Kredi ve yatırım
Özel Sektör İşletmeleri	• Kâr • Yatırım getirisi • Pazar payı • Rekabet üstünlüğü	• Anapara yatırımı • Teknoloji Ar&Ge/Ticarileştirme • Pazarlama • Beceriler/Kapasite geliştirme • Bilgi edinimi • Teknoloji transferi • Kredi verme politikaları • Teknoloji seçimi
Uluslararası Kalkınma Kurumları	• Temel ve uygulamalı bilgi • Araştırma • Eğitim • Bilgi transferi • Güvenilirlik algısı	• Araştırma ve geliştirme • Teknolojinin ticarileştirilmesi • Teknoloji transferi
Medya/Kamu Grupları	• Bilgi yayma • Eğitim • Farkındalık • Bilinçli kararlar	• Tanıtım ve reklamcılık • Eğitim programları • Toplum programları • Bilgi yayma
Bireysel Tüketiciler	• Hayatta kalma • Yaşam kalitesi • Bilgi • Makul fiyatlı çözümler	• Satın alma kararları • Bilgi seçimi • Öğrenme yolları • Bilginin uygulanması

Blunck ve Werthmann (2017) Endüstri 4.0 uygulamalarının, daha sürdürülebilir bir üretimi gerçekleştirme potansiyelini ve dördüncü sanayi devriminin döngüsel ekonomi oluşturma konusundaki fırsatları analiz etme amacıyla yapılan çalışmalarında, Endüstri 4.0'ın temiz üretim için sağlayabileceği sürdürülebilirlik potansiyeli ve dördüncü sanayi devrimiyle ortaya çıkan teknolojilerin ve değişimlerin kullanılarak döngüsel ekonominin uygulanma olasılığı veya kolaylığı üzerine odaklanmışlardır. Günümüz ekonomisinin, hâlâ doğrusal üretim ve tüketim modeline bağlı kalmış durumda olduğu; ancak çeşitli yıkıcı eğilimlerin etkisiyle bu model zayıfladığını belirtmişlerdir. Bu değişimleri göz önüne alarak, ileri bilgi teknolojilerinin gerekli özellikleri sağlayabildiği bir ortamda, Endüstri 4.0 döneminde ortaya çıkan teknolojiler, malzemelerin tedarik zinciri boyunca izlenmesi, ürün ve malzeme fraksiyonlarının tanımlanması ve kullanım sırasında ürün durumunun takibi gibi işlevler için kullanılabileceği vurgulanmıştır. Geleceğin zorlu çevresel, ekonomik ve sosyal sorunlarını aşmak için bütünlük taşıyan bir teknoloji ve veri anlayışıyla birlikte sistem düşünme becerilerine duyulan ihtiyaç giderek arttığı ve bu teknolojik ilerlemelerin, döngüsel ekonomi modeline geçişi hızlandırmak adına büyük fırsatlar sunduğu vurgulanmaktadır.

Araştırmanın sorularına verilen yanıtlara göre, Endüstri 4.0 unsurları sürdürülebilir üretim yöntemlerini benimseme potansiyeli Endüstri 4.0'ın değer sürücülerini ve zincirlerini yeniden düzenleme kapasitesi üzerinden örneklendirilmiştir. Ayrıca, gelişmekte olan iş modelleri, kuruluşları kaynak verimliliği açısından şekillendirmek için fırsatlar sunduğu ve dördüncü sanayi devrimi tarafından getirilen teknolojilerin ve değişikliklerin kullanılmasıyla, döngüsel ekonominin uygulanmasının bile daha kolay hale gelebileceğini göstermektedir. Genel olarak, akıllı ürünler ve I4.0 teknolojileri, önemli ekonomik, çevresel ve sosyal avantajlar sunarak döngüsel ekonomi çabalarına katkıda bulunduğu sonucuna varılan çalışmada, işletmelerin kullanılmayan atık akışlarını değerlendirmesi ve bu kaynakları zenginliğe dönüştürmesi, yeni bir büyüme ve kalkınma alanını başlatmak adına gerçek bir fırsat sunduğu da ortaya konmuştur. Bu ekonomik sistem, mevcut ekonominin kaynaklarla ilişkisini yeniden tanımlayarak, sosyal, çevresel ve ekonomik açıdan sürdürülebilir bir geleceği şekillendirmek için önemli bir adım olabilir.

Wikina ve ark. (2010)'na göre artan nüfus, toplam ekonomik hacim ve insan tüketim seviyeleri, kaynak kıtlığı, iklim değişikliği, ozon tabakasının incelmesi, arazi gerilemesi ve çevre kirliliğinin kötüleşmesi sorunlarına yol açmıştır. Basım ve ilgili endüstriler, yoğun enerji ve kaynak kullanımı nedeniyle çevre kirliliğinin başlıca kaynaklarından birini oluşturduğu, bu nedenle, daha yeşil, çevre dostu ve sürdürülebilir uygulamalara bağlı kalarak çevrenin korunmasına katkıda bulunabilmeleri için baskı ve ilgili endüstrilerdeki faaliyetlere ilişkin becerikli düşüncelerin benimsenmesine ihtiyacın olduğu vurgulanmıştır. Gerçekleştirdikleri çalışmada, bu sektörlerin benimseyebileceği, çevreye katkıda bulunan ve çevreyi koruyan sürdürülebilir iş uygulamalarına bağlı kalarak işletmelerini sağlam ekonomik temellere oturtacak stratejiler ele alınmaktadır. Baskı ve ilgili endüstrilerle ilgili becerikli düşünmenin merkezinin, işletmelerin sürdürülebilir iş uygulamalarını benimsemesi ve ekonomik faydalar elde etmek için yenilikçi yaklaşımlara odaklanması belirtilmekte ve bu durum, işletmelerin hayatta kalmasını sağlarken aynı zamanda tüm canlılar için daha iyi bir dünya yaratma çabasını içerdiği bildirilmektedir. Kaynaklı düşüncenin, basım ile ilgili endüstrilerin sürdürülebilir iş uygulamalarını benimsemek için yapabileceği yenilikçi potansiyelini vurgulanır ve bu da büyük ekonomik getiriler sağlayabilecektir.

Wikina ve ark. (2010) yaptıkları çalışmaya göre basım sanayisinde yeşil işletmelerin, başta üst yönetim olmak üzere tüm paydaşlar tarafından taahhüt edilmesi halinde başarılı olma olasılığının yüksektir. Sürdürülebilir dönüşümler bazı başlangıç maliyetlerini beraberinde getirse de, bu maliyetlerin zaman içinde çevreyi kirletmeye devam etmekten daha düşük olabileceği vurgulanmaktadır. Kâğıt, ambalaj, mürekkep kutularının geri dönüştürülmesi, elyafın geri kazanılması gibi işlemlerin ve bunların üretim amacıyla yeniden kullanılması, kaçınılmaz olarak tüm bunları atık olarak göndermekten ve çevreyi kirletmekten daha az maliyetli olacaktır. Yeşil uygulamalar aslında maliyet tasarrufu sağlayabilir, istihdam yaratabilir ve yerel toplulukları destekleyebilir. Sürdürülebilir uygulamalara bağlılık, işgücünün eğitilmesini gerektirir. Yönetim, atık azaltma ve çevre dostu uygulamalara dönüş konusundaki ciddiyetini çalışanlara göstermelidir. Bu çabaların bir sonucu olarak, kuruluşun kârlılığında bir artış yaşanabilir. Ayrıca, sürdürülebilir hedeflere olan bağlılık, müşteri memnuniyeti çabalarını artırabilir. Müşteriler, sürdürülebilir iş kararlarının nasıl alındığı konusunda rehberlik aldıklarında memnuniyet duyabilirler.

Amon-Tran ve ark., (2012) bir baskı tesisinde ofset makinesini optimize ederek çevre dostu bir baskı için karbon ayak izini en aza indirmeye yönelik yaklaşım çalışmalarında, optimizasyonun, matbaa atıklarını, baskı makinesi hazırlama süresini, karışık formların basımı sırasındaki sorunlarını, malzeme ve zaman maliyetlerini en aza indirilmesini, baskı kalitesini ve sorunsuz bir iş akışı sayesinde üretim istikrarının artmasını sağlanabileceğini ortaya koymuşlardır. Sürdürülebilir iş uygulamaları, yaşam döngüsü analizi ve çevresel ürün açıklamalarına yönelik artan talep, e-okuyucu üreticileri, dijital medya şirketleri ve basılı medya tedarikçileri üzerinde etkili olacağını ve basılı medyanın genellikle zararsız ve yenilenebilir malzemelere dayanmasına rağmen, çevresel zararların bir aracı olarak algılandığı belirtilmiştir. Bu durum, basılı medyanın daha sürdürülebilir olma ve esnek polimer dijital elektronik basımının bir aracı olma potansiyeline sahip olmasına rağmen ironik olduğu ve sürdürülebilirlik kavramının, çevresel kaygıların sektörü etkilediği bir dönemde hala belirsizliğini koruduğu ortaya konmuştur. Baskı fabrikalarının çevresel etkilerini azaltmak için atabileceği birçok adım olduğu, ancak gerçek anlamda çevresel koruma için bütüncül bir yaklaşım benimseyerek CO_2 emisyonlarını ve diğer önemli emisyonları azaltmanın mümkün olmasından bahsedilmiştir. Bu çalışma, 'Ekonomik düşün - ekolojik bas' ilkesi altında baskı

endüstrisini yeşil hale getirmek için çözümler aramaya odaklanırken, 'Co_2 Nötralize Baskı' konseptine de katkı sağlamaktadır. Matbaacıların çevresel konularda bilgi sahibi olmalarının önemi vurgulanırken, kâğıt, mürekkep, baskı kalıpları, temizlik maddeleri ve enerji gibi unsurların çevresel etkileri ortaya konmuştur. İlk aşama israfını azaltmak için güç ve baskı altı malzeme israfını %90'a kadar azaltabilecek yöntemler önerilmiştir. Bu unsurları azaltmak için gerekli yaklaşımlardan odak noktaları arasında, baskı altı malzemeleri, iş başına maliyet ve CO_2 emisyonları, tasarruf potansiyelinin büyük bir kısmını temsil ettiği (%60-90), bu rakamları düşürmek için baskı makinelerini optimize etmenin en etkili seçenek olduğu çalışmanın sonuçları olarak sunulmuştur.

İş akışı sistemleri, verimliliği ve kalite kontrolünü artırmak için geniş bir yelpazede uygulanması gerekliliğini ortaya koyan araştırmayı gerçekleştiren Szentgyörgyvölgyi (2016), pazar lideri şirketler tarafından geliştirilen dijital iş akış sistemleri bu yeni talebi karşıladığını vurgulamıştır. Bu sistemler işleri entegre eder ve ilgili birimlere iletir. Çalışmaya göre bu sistemleri uygulamak, baskı şirketlerinin pazar durumunu iyileştirmesinin yanında, birçok rutin ve hesaplama görevini otomatikleştirilebilir, idari işler basitleştirilebilir. Ayrıca birimler arasında bilgi akışı daha hızlı hale gelir, iş akışı sistemleri müşteri sadakatini de artırır. Tüm bu avantajlar ve fırsatlar, bu sistemleri tartışılması gereken bir gerçeklik haline getirmektedir. Araştırma çalışmasının amacı, baskı endüstrisinde uygulanan süreç tasarımı çözümlerine dikkat çekmek, dijital iş akışı sistemlerini tanıtmak ve analiz etmek, ilgili standartlar ve operasyonel arka plan hakkında bilgi sağlamaktır.

Aydemir ve ark. (2023) baskı ve ambalaj sektörünün sürdürülebilirliği çerçevesinde hammadde yönetimi, selüloz kaynakları, endüstriyel ormanlar, ekolojik ve yenilenebilir alternatif elyaf kaynakları inceledikleri kapsamlı çalışmada, baskı ve ambalaj sektöründe sürdürülebilirliği, gelecek nesillerin ihtiyaç ve beklentilerini karşılamak için çevreye ve kaynaklara karşı sorumluluğu yansıtan üretim ve uygulamalar olarak tanımlamaktadırlar. Basılı malzemelerin ve ambalajların geri dönüşümü ve bu geri dönüşümde kâğıt-mürekkep türlerinin ve ürün tasarımının etkileri tartışılmış ve kaynağında ayrıştırma ile işlemenin kâğıt geri dönüşümünün verimliliği, ekonomi ve çevre üzerindeki etkileri vurgulanmıştır. Gerçekleştirilen bu araştırmada baskı endüstrisinin sürdürülebilirliğini artırmak amacıyla sektör gereksinimlerini, üretim sürecinde yapılması gerekenleri ve çevresel etkileri değerlendirerek öneriler sunmaktadır. Sarf malzemeleri ve baskı

ekipmanları seçiminde ömür boyu çevresel etkiler dikkate alınmalı, fosil bazlı olmayan yenilenebilir baskı malzemeleri tercih edilmelidir. Kâğıt ve karton hammaddeleri sürdürülebilir yönetilen endüstriyel ormanlardan temin edilmeli ve alternatif doğal elyaf kaynakları kullanılmalıdır. Tarımsal gıda endüstrisi atıkları bile kâğıt hamuru üretiminde değerlendirilebilir. Matbaa şirketleri yeşil stratejiler geliştirmeli, fosil yakıt kullanımını azaltmalı ve temiz enerji yatırımları yapmalıdır. Sürdürülebilir değişiklikler, matbaacıların şirketlerini daha sürdürülebilir hale getirmeye karar vermesi ve geri dönüşüm programlarına, enerji tasarrufu ve az atık üretimine yönelik yatırımlar yapmasıyla mümkündür. Yalın ve verimli üretim teknikleri benimsenmeli, müşteriler de süreçlere dâhil edilerek çevre bilincini artırılması yönünde öneriler sunulmuştur.

Baskı iş akışının çeşitli aşamalarında çevre dostu olmayan baskı faaliyetlerinin belirlenmesi için gerçekleştirdikleri anket çalışması gerçekleştiren Nandini ve ark., (2021), baskı endüstrisindeki çevre dostu olmayan faaliyetlerin çevreyi etkileyen parametreleri incelemişlerdir. Baskı endüstrisinde yayılan tehlikeli maddelerin nicel olarak tanımlanmasının sonuçları analiz edilerek, araştırmanın ana odağı olan, çevre dostu olmayan faaliyetleri bulmak ve çevreyi daha iyi hale getirmek için öneriler sunulmuştur. Bu çalışmada, iki farklı basımevinde çevre dostu faaliyetlerde dalgalanmaların yaşandığı bir durum görülmektedir. Örneğin, şirket çevresel açıdan sürdürülebilir kâğıt kullanımını artırmak ve karbondioksit emisyonlarını azaltmak için mücadele ederken, üretimde kullanılan tehlikeli kimyasalların miktarında ciddi artışlar olmaktadır. Bundan dolayı şirketlerin çevresel sürdürülebilirlik durumlarını bir bütün olarak görmeleri gerektiği önerilmiştir.

Kluczek ve ark., (2023) baskı ve ambalaj şirketleri için iş modeli tasarımı için sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin Endüstri 4.0 ile uyumlu hale getirilmesine yönelik gerçekleştirdikleri çalışma, SKH'lerin ve I4.0 bileşenlerinin baskı ve ambalaj şirketleri iş stratejisine nasıl dâhil edilebileceğini ve uygulanabileceğini göstermektedir. Yapılan bu çalışma, baskı ve ambalaj sektöründeki şirketler için belirlenmiş SKH'leri, özel olarak seçilmiş I4.0 teknolojileriyle entegre ederek dijital bir iş modeli oluşturmayı amaçlamaktadır. Yapılan literatür taraması, nicel anketler ve nitel görüşmeler sonuçlarına göre, baskı ve ambalaj şirketlerinin genellikle I4.0 bileşenlerini benimseyerek SKH'lerini güçlendirdikleri ortaya çıkarmaktadır. Oluşturulan iş modeli, I4.0'ın geliştirilmesine katkıda bulunarak dijital bir dönüşümle sürdürülebilirliği desteklediği görülmüştür. Aynı

zamanda, dijitalleşmeyi benimsemek için geleneksel iş modellerinin revize edilmesinin önemini vurgulayarak, bu yaklaşımın diğer sektörlerdeki şirketlere adapte edilebileceği ve kâr merkezlerini güçlendirebileceği belirtilmektedir. Çalışmanın sınırlamalarına rağmen, elde edilen bulguların genel geçerliği, bu iş modelinin çeşitli endüstrilere uyarlanabilir bir rehber olabileceğini de göstermektedir.

Gladysz ve Ark., (2021) Polonya'daki 11 baskı firmasında gerçekleştirdikleri anket çalışması, I4.0 teknolojileri ile sürdürülebilirlik kavramları arasındaki bağlantıları incelemeyi hedeflemişlerdir. Yapılan nitel görüşmeler, gelişmiş teknolojilerin sürdürülebilirlik üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu ve dijitalleşmeye geçiş yapan şirketlerin sürdürülebilir işlere daha çabuk adapte olduğunu göstermiştir. Elde edilen sonuçlar, I4.0 teknolojilerinin sürdürülebilirlik üzerindeki olumlu etkilerini vurgulayarak, bu alandaki ilişkilerin ön teşhisine katkıda bulunmuştur. Farkındalık düzeyinin şirket büyüklüğüyle ilişkili olduğu ve dijital dönüşümün hızının sürdürülebilir işlere olan olumlu etkiyi artırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

4.2. Sonuçlar

Endüstri 4.0 ve sahip olduğu teknolojilere sürekli artan talebe karşılık, üretim değerlerinin ve sürdürülebilirliğin çevresel, ekonomik ve sosyal boyutlarının tümüyle dâhil edildiği kavramsal ve uygulanabilirlik perspektiflerinin değerlendirildiği çalışmalara yönelik literatürde birtakım boşlukların olduğu görülmektedir. Bu araştırma literatürde Endüstri 4.0, sürdürülebilirlik ve kalkınma hedefleri, döngüsel ekonomi ve bu kavramların basım sanayisi ile bağıntıları üzerine içerik analizi yapılarak ele alınan ilk araştırmalardan biri olduğu kabul edilebilir. Bu tezde gerçekleştirilen sistematik literatür taraması, mevcut eğilimleri ve gelecek perspektiflerini belirleyerek teknolojileri, süreç entegrasyonunu ve sürdürülebilir sonuçları entegre eden sürdürülebilir bir Endüstri 4.0 çerçevesi önermektedir. Bu çerçeve, baskı endüstrisinde I4.0 teknolojilerinin benimsenmesine yönelik stratejik bir yaklaşım ihtiyacını vurgulayarak uygulayıcılar ve akademisyenler için bir rehber görevi görmektedir.

Genel olarak sürdürülebilir kalkınmayı, gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama kabiliyetinden ödün vermeden bugünün ihtiyaçlarını karşılama olarak tanımlayabiliriz. Sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak ve yasal düzenlemeleri karşılamak için dijital teknolojiye doğru dönüşüm eğilimi birçok sektörde görülmektedir. Basım sektörü,

süreçlerin iş akışlarını otomatikleştirmek için dijitalleşme yoluyla sürdürülebilirlik performansını giderek daha fazla artırmaktadır. Endüstri 4.0 teknolojilerinin basım sanayisine entegrasyonu, sürdürülebilir üretimi destekleyen çeşitli etkiler yaratmaktadır. Verimlilik artışı, kaynak tasarrufu, ürün kalitesinin iyileştirilmesi, esnek üretim ve daha iyi lojistik yönetimi gibi faktörler, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için önemli bir rol oynamaktadır.

Endüstri 4.0 teknolojileri, baskı endüstrisinde sürdürülebilir üretim için önemli fırsatlar sunmaktadır. Ancak, bu fırsatların tam anlamıyla değerlendirilebilmesi için şirketlerin sorumlu ve çevreye duyarlı uygulamaları benimsemesi gereklidir. Sürdürülebilirliği temel bir değer olarak benimsemek ve çevresel ayak izlerini en aza indirmek için operasyonlarda çeşitli önlemler almak önemlidir. I4.0 teknolojilerinin baskı endüstrisinde sürdürülebilir üretime etkilerini inceleyen literatür taraması, akıllı üretim ve malzeme yönetimi, veri analitiği ve karar destek sistemleri, insan-makine iş birliği ve işgücü eğitimi, kaynak, enerji ve atık yönetimi, dijital dönüşümün sürdürülebilir üretimdeki rolü gibi ana temalar etrafında toplanmaktadır.

Bu tez, Endüstri 4.0'ın basım sanayisinde dijital dönüşümü nasıl desteklediğini vurgulamaktadır. İlgili literatürde belirtilen örnekler, dijitalleşmenin üretim süreçlerinde verimliliği artırdığını ve enerji kullanımını optimize ettiğini göstermektedir. Literatürdeki çeşitli kaynaklar, Endüstri 4.0 teknolojilerinin malzeme yönetimi süreçlerini nasıl iyileştirdiğine dair önemli bulgular içermektedir. Akıllı üretim sayesinde, malzeme kullanımı daha etkili hale getirilmesi ve atık azaltılması sağlanmıştır. Çalışmanın literatür taraması, Endüstri 4.0'ın veri analitiği ve karar destek sistemleri aracılığıyla sürdürülebilir üretime sağladığı katkıyı vurgulamaktadır. Bu teknolojiler, üretim süreçlerinin daha iyi izlenmesini, öngörülemeyen durumların önceden tespit edilmesini ve kararların daha bilgi temelli alınmasını sağlamıştır. Sonuçlar, Endüstri 4.0'ın insan-makine iş birliği ve işgücü eğitimi açısından sürdürülebilirlik üzerine olumlu etkiler sağladığını ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, Endüstri 4.0 teknolojilerinin atıkların en aza indirilmesine, enerji tasarrufuna ve malzeme israfını azaltan yeni malzemelerin geliştirilmesine katkıda bulunduğu gösterilmiştir. Ayrıca, Endüstri 4.0'ın benimsenmesinin, sürdürülebilir kurumsal performansı olumlu yönde etkileyen yalın üretim uygulamalarını mümkün kıldığı ve sürdürülebilir üretimi desteklemede önemli bir rol oynadığı belirlenmiştir. Bu

teknolojilerin üretim süreçlerine entegrasyonu sonucunda basım endüstrisinde verimli, esnek ve sürdürülebilir üretim sistemleri oluşturmada çeşitli etkiler yaratmaktadır. Bu etkiler:

- **Verimlilik ve üretkenlik artışı:** Endüstri 4.0 teknolojileri, özellikle otomasyon ve dijitalleşme, baskı endüstrisinde süreçlerin daha hızlı, hassas ve verimli bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlayarak üretkenliği artırır. Operasyonel verimliliği artıran Endüstri 4.0 çözümleri, tekrarlayan görevleri otomatikleştirir ve insan hatasını minimize ederek genel üretkenliği artırır, aynı zamanda kaynak tüketimini azaltarak sürdürülebilirliği destekler. Dijitalleşmenin gelmesiyle birlikte baskı makineleri daha da hızlı baskı yapar hale gelmiş, kalite kontroller baskı sonrasında değil, baskı sırasında otomatik olarak yapıldığından bir makinede günlük basılan farklı ürün baskısı miktarı artmıştır.
- **Azaltılmış kaynak, atık ve enerji verimliliği:** Endüstri 4.0 teknolojileri, üretim süreçlerinde enerji ve malzeme tüketimini optimize ederek kaynak tasarrufunu artırır. Baskıda dijitalleşmiş ve otomatikleştirilmiş sistemler, malzeme israfını azaltırken enerji verimliliğini artırır ve sürdürülebilir kaynak kullanımına olanak tanır.
- **Artırılmış ürün kalitesi:** Üretim süreçlerindeki otomasyon, hata ve kalite kontrol sistemleri, üretimdeki kusurları tespit ederek geri bildirim sağlar, bu da hatalı üretimi azaltır ve kalite standartlarını karşılar. Bu süreç sonucunda daha az kaynak tüketen ve yüksek kaliteli ürünler elde edilir, bu da sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sağlar.
- **Esnek ve özelleştirilmiş üretim:** Hızlı ve esnek üretim süreçleri, atıl kapasiteyi azaltır ve kaynakları daha sürdürülebilir bir şekilde kullanmayı sağlar. Akıllı üretim sistemleri, üretim hatlarının hızlı ve kolay bir şekilde değiştirilmesine olanak tanır. Bu da müşteri taleplerine hızlı yanıt verebilme yeteneğini artırır. Ayrıca, dijital teknolojiler özelleştirme ve kişiselleştirme seçeneklerini artırarak seri üretimden, hedefli üretime geçişi destekler.

- **İyileştirilmiş lojistik zinciri yönetimi:** Tedarik zinciri genelinde gelişmiş görünürlük ve bağlantı sağlayarak süreçlerin daha iyi koordinasyonunu ve optimizasyonunu sağlar. Gerçek zamanlı veri paylaşımı ve analitik, darboğazları belirlemeye, lojistiği optimize etmeye ve ulaşımla ilgili emisyonları azaltmaya yardımcı olur.

Bu araştırmadan elde edilen bulgular ışığında, sektör paydaşlarının Endüstri 4.0 teknolojilerinin sürdürülebilir üretimi teşvik etme potansiyelini dikkate almaları önerilmektedir. Basım endüstrisi bu teknolojileri benimseyerek yalnızca operasyonel verimliliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşma yolunda ve daha sürdürülebilir bir geleceğe de katkıda bulunmada önemli bir adım olarak değerlendirilebilir. Basım sanayisinde verimlilik artışı, kaynak tasarrufu, ürün kalitesinin iyileştirilmesi, esnek üretim ve daha iyi lojistik yönetimi gibi sürdürülebilir üretim faktörlerine yönelik Endüstri 4.0'ın potansiyeli vurgulanmakta olup, gelecekteki araştırmalara ve sektöre yönelik stratejilere rehberlik edebilecektir. Ayrıca bu araştırmanın sonuçları baskı endüstrisinin ötesine uzanarak, dördüncü sanayi devriminin sunduğu zorluklar ve fırsatlarla mücadele ederken, farklı üretim sektörleri için de öngörüler sunmaktadır.

KAYNAKLAR

Acar Büyükpehlivan, G., Oktav, M. (2021). Ofset baskı sistemine ait temel terimler ve değerlendirilmesi. Avrasya Terim Dergisi, 9(2), 63-68.

Agostini, L., Filippini, R. (2019). Organizational and managerial challenges in the path toward Industry 4.0. European Journal of Innovation Management, 22 (3), 406-421.

Ahmed, E., Yaqoob, I., Hashem, I. A. T., Khan, I., Ahmed, A. I. A., Imran, M., Vasilakos, A. V. (2017). The role of big data analytics in internet of things. Computer Networks, 129, 459–471.

Akgül, A. (2011). Serigrafi baskı Yöntemi kullanılan porselen çıkartma baskısında optimum dokuma sıklığı, sıcaklık ve renk değerlerinin tespiti. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 77-81.

Albers, A., Bartosz G., Tobias P., Viktoria B., Tobias S. (2016). Procedure for defining the system of objectives in the initial phase of an Industry 4.0 Project focusing on intelligent quality control systems. Procedia CIRP, 52, 262-267.

Alur, R. (2015) Principles of cyber-physical systems. MIT press.

Amon -Tran, I., Anayath, R., Pai, A., Kamath, N., Shenoy, S., Harikrishnan, A. (2012). An approach to minimize carbon footprint for an environmentally friendly printing by optimizing an offset machine in a printing facility. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 37, 514-527.

Anderl, R. (2014). Industry 4.0 – Advanced Engineering of smart products and smart production. Technological Innovations in the Product Development, 19th International Seminar on High Technology, October 9th, 2014, Piracicaba, Brazil.

Arvindhan, M. (2021). Possibilities of Industrial trends and business benefits with Industry 4.0 technology: A Survey. Artificial Intelligence for a Sustainable Industry 4.0. Springer, Cham.

Awasthi, A. K., Cheela, V. R. S., D'Adamo, I., Iacovidou, E., Islam, M. R., Johnson, M., Miller, T. R., Parajuly, K., Parchomenko, A., Radhakrishan, L., Zhao, M., Zhang, C., Li, J. (2021). Zero waste approach towards a sustainable waste management. Resources. Environment and Sustainability, 3, 100014.

Aydemir, C., Özakhun, C. (2014). Matbaa Malzeme Bilimi, Marmara Üniversitesi Yayınevi, İstanbul.

Aydemir, C., Özsoy, S. (2020). Environmental impact of printing inks and printing process. Journal of Graphic Engineering and Design, 11, 11-17.

Aydemir, C., Yenidoğan, S., Tutak, D. (2023). Sustainability In the print and packaging industry. Cellulose Chemistry and Technology, 57 (5-6), 565-577.

Azarian, M. Yu, H., Solvang, W.D. (2021). A Simulation-based approach for improving the performance of a manufacturing system. 2021 IEEE / SICE International Symposium on System Integration (SII), Iwaki, Fukushima, 2021, Japan, 543-547.

Bagdadee, A.H., Zhang, L., Remus, M. S.H., (2020). A Brief Review of the IoT-Based Energy Management System in the Smart Industry., vol 1056. Springer, Singapore.

Bai, C., Dallasega, P., Orzes, G., Sarkis, J. (2020). Industry 4.0 technologies assessment: A Sustainability Perspective, International Journal of Production Economics, 229, 2020, 107776,

Bajic, B., Rikalovic, A., Suzic, N., Piuri, V. (2021). Industry 4.0 implementation challenges and opportunities: A Managerial Perspective. IEEE Systems Journal, 15 (1), 546-559,

Bakkari, M., Khatory, A. (2017). Industry 4.0: Strategy for more sustainable industrial development in SMEs. In Proceedings of the IEOM 7th International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 2017 April, Rabat, Morocco

Bal, H. Ç., Erkan, Ç. (2009). Industry 4.0 and competitiveness. Procedia Computer Science, 158, 625-631.

Baydemir, T., (2022). Doğrudan hava yakalama teknolojisi. TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi, 04.2022, 14-25

Beier G, Ullrich A, Niehoff S, Reißig M, Habich M. (2020). Industry 4.0: how it is defined from a sociotechnical perspective and how much sustainability it includes – A literature review. Journal of Cleaner Production, 259, 120856.

Bekmezci, M. (2015). Companies' profitable way of fulfilling duties towards humanity and environment by sustainable innovation. Procedia - Social and Behavioral Sciences 181, 228-240

Berawi, M. A. (2019). The role of Industry 4.0 in achieving Sustainable Development Goals. International Journal of Technology, 10(4), 644-647.

Blansch, K. L, (1995). Offset printing companies and the environment. Business Strategy and the Environment, 4, 220-228.

Blunck, E., Werthmann, H. (2017). Industry 4.0 - An opportunity to realize sustainable manufacturing and its potential for a circular economy. In DIEM: Dubrovnik International Economic Meeting (3 (1), 644-666.

Blunden, B. W., Birkenshaw, J. W. (1988). The Printing Processes. In The Printing Ink Manual (10-68). Boston, MA: Springer US.

BM, The Global Goals, 2015. http://www.globalgoals.org/ (Erişim; Aralık. 15, 2023).

Bocken, N. M. P., Short, S. W., Rana, P., Evans, S. (2014). A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes. Journal Of Cleaner Production, 65, 42-56.

Bordel, B., Alcarria, R., Robles, T., Martín, D. (2017). Cyber–physical systems: extending pervasive sensing from control theory to the internet of things. Pervasive and Mobile Computing, 40, 156–184.

Buxmann, P., Hess T., Ruggaber, R. (2009). Internet of services. Business & Information Systems Engineering, 1(5), 341.

Cardoso, J., Voigt, K., Winkler, M. (2009). Service engineering for the internet of services. In Enterprise Information Systems: 10th International Conference, ICEIS 2008, Barcelona, Spain, Revised Selected Papers 10 (15-27). June 12-16, 2008, Springer Berlin Heidelberg.

Cavaleri, S., Shabana, K. (2018). Rethinking sustainability strategies. Journal of Strategy and Management, 11(1), 2-17.

CBDDO, (2022). Yeşil Teknolojiler. Cumhurbaşkanlığı Dijital Dönüşüm Ofisi, Ankara.

CDTI (2017). The digital talent gap: are companies doing enough? Capgemini and LinkedIn, Paris, Erişim 20 Ocak 2024, https://www.capgemini.com/resources/digital-talent-gap.

Change, I. C. (2014). Impacts, adaptation and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental Panel on Climate Change, 1132. Cambridge University Press: Cambridge, UK,

Chiarini, A. (2021). Industry 4.0 technologies in the manufacturing sector: Are we sure they are all relevant for environmental performance?. Business Strategy and the Environment, 30(7), 3194-3207.

Chopra, K., Gupta, K., Lambora, A. (2019). Future internet: The internet of things-A literature review. 2019 International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing, 14-16 February 2019, Faridabad, India, 135-139.

Conti, M., Dehghantanha, A., Franke, K., Watson, S. (2017). Internet of things security and forensics: Challenges and opportunities. Future Generation Computer Systems, 78, 1-3.

Çalış Duman, M., Akdemir, B. (2021). A study to determine the effects of industry 4.0 technology components on organizational performance. Technological Forecasting and Social Change, 167, 120615.

Çirkin, E., Özdağoğlu, A. (2021). Endüstri 4.0 bünyesindeki otonom robotların sürdürülebilirlik perspektifleri açısından değerlendirilmesi. Erciyes Akademi, 35 (4), 1534-1553.

De Ron, A.J. (1998). Sustainable production: The ultimate result of a continuous improvement. International Journal of Production Economics, 56, 99-110.

Dempsey, N., Bramley, G., Power, S., Brown, C. (2011). The social dimension of sustainable development: Defining urban social sustainability. Sustainable Development, 19(5), 289-300.

Derya, H. (2018). Endüstri devrimleri ve endüstri 4.0. GÜ İslahiye İİBF Uluslararası E-Dergi, 2(2), 1-20.

Despotovic, D., Cvetanovic, S., Nedic, V., Despotovic, M. (2016). Economic, social and environmental dimension of sustainable competitiveness of European countries. Journal of Environmental Planning and Management, 59(9), 1656-1678.

Digilina, O. B., Teslenko, I. B., Abdullaev, N. V. (2019). Industry 4.0: contents, problems and perspectives. In Perspectives on the use of New Information and Communication Technology (ICT) in the Modern Economy (32-38). Springer International Publishing.

Dincer, I., Rosen, M.A. (1998). A worldwide perspective on energy. Environment and Sustainable Development, 22, 1305-1321.

Duan, L., Da Xu, L. (2021). Data analytics in industry 4.0: A survey. Information Systems Frontiers, 1-17.

Egger, S. (2006). Determining a sustainable city model. Environmental Modelling & Software, 21(9), 1235-1246.

Engin, E., Akgöz, B. (2013). Sürdürülebilir Kalkınma ve kurumsal sürdürülebilirlik çerçevesinde kurumsal sosyal sorumluluk kavramının değerlendirilmesi. Selçuk iletişim, 8(1), 85-94.

Femminella, M., Pergolesi, M., Reali, G. (2016). Performance evaluation of edge cloud computing system for big data applications. 2016 5th IEEE International Conference on Cloud Networking (Cloudnet), 170-175.

Ferauge, P. (2012). A Conceptual framework of corporate social responsibility. Global Journal of Business Research, 6(5), 85-96.

Fettermann, D., Cavalcante, C., Almeida, T., Tortorella, G. (2018). How does Industry 4.0 contribute to operations management? Journal of Industrial and Production Engineering, 35, 255 - 268.

Fırat, O. Z., Fırat, S. Ü. (2017). Endüstri 4.0 yolculuğunda trendler ve robotlar. İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi, 46(2), 211-223.

Fischer, S. (2014). Challenges of the Internet of Services. Cognitive Technologies, 39, 15-27.

Frey, C.B., Osborne, M. A. (2017). The future of employment: How susceptible are jobs to computerization? Technological Forecasting and Social Change, 114, 254-280.

Gabriel, M., Pessl, E. (2016). Industry 4.0 and sustainability impacts: Critical discussion of sustainability aspects with a special focus on future of work and ecological consequences. ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara International Journal of Engineering, 14(2), 131-136.

Gago, C. F., Moyano, F., Lopez, J. (2017). Modelling trust dynamics in the Internet of Things. Information Sciences, 396, 72–82.

García, S. G., García, M. G. (2019). Industry 4.0 implications in production and maintenance management: An overview. Procedia Manufacturing, 41, 415-422.

Garetti, M., Taisch, M. (2012). Sustainable manufacturing: Trends and research challenges. Production Planning & Control, 23 (2-3), 83-104.

Gencan Acar, S., Yılmaz, M. (2013). Matbaa İşletmeleri için bir malzeme ihtiyaç planlama yazılımı geliştirme ve uygulanması. Bilişim Teknolojileri Dergisi, 6(1), 23-32.

Gençoğlu, E., Şimşeker, O., Özdemir, L. (2009). Flekso baskı sistemi. Dupont, İstanbul,

Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. Journal of Cleaner Production, 252, 119869.

Ghobakhloo, M., Fathi, M. (2021). Industry 4.0 and opportunities for energy sustainability. Journal of Cleaner Production, 295, 126427.

Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N., Gorini, R. (2019). The role of renewable energy in the global energy transformation. Energy Strategy Reviews, 24, 38-50.

Gladwin, T. N., Kennelly, J. J., Krause, T. S. (1995). Shifting paradigms for sustainable development: Implications for management theory and research. Academy of Management Review, 3, 874-907

Gladysz, B., Krystosiak, K., Ejsmont, K., Kluczek, A., Buczacki, A. (2021). Sustainable printing 4.0 - Insights from a polish survey. Sustainability, 13, 10916.

Gosain, A., Rao, S., Basuray, D. (2006). Climate change impact assessment on hydrology of indian river basins. Current Science, 90 (3), 346-353.

Grau, G., Cen, J., Kang, H., Kitsomboonloha, R., Scheideler, W. J., Subramanian, V. (2016). Gravure-printed electronics: Recent progress in tooling development, understanding of printing physics and realization of printed devices. Flexible and Printed Electronics, 1(2), 023002.

Haque, U. (2011). Yeni kapitalist manifesto. Pınar Şiraz (çev.), İstanbul: Mess Yayınları.

He, M. (2019). Research on the status quo and development of digital printing technology. In Journal of Physics: Conference Series, 1168 (2), 022037.

Hermann, M., Pentek, T., Otto, B. (2016). Design principles for industrie 4.0 scenarios. In2016 49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS) 3928-3937, IEEE Computer Society Washington, DC, USA.

Hoekstra, A.Y. (2013). The water footprint of modern consumer society. Routledge, London, UK (2013)

Hofmann, E., Rüsch, M. (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. Computers in Industry, 89, 23-34.

Hofstrand, E.H. (2006) Flexographic post-printing of corrugated board. Doktora Tezi, Karlstads University, Karlstad, Sweden, 40-42

Hopkins M. (2003). The planetary bargain: Corporate social responsibility matters. Earthscan

Hsieh, Y., Wei, M., Wong, X. (2019). How conventional printers lead into customized web-to-print. Advances in Graphic Communication, Printing and Packaging: Proceedings of 2018 9th China Academic Conference on Printing and Packaging (436-446). Springer Singapore.

Hu, Y., Wen, Z., Lee, J. C., Luo, E. (2017). Assessing resource productivity for industrial parks using adjusted raw material consumption (ARMC). Resources, Conservation and Recycling, 124, 42-49.

Hussain, C. M., Paulraj, M. S., Nuzhat, S. (2021). Source reduction and waste minimization. Elsevier, 1, 1-22

Iacovidou, E., J., Millward-Hopkins, J., Busch, P., Purnell, C. A., Velis, J. N., Hahladakis, Zwirner, O., Brown, A. (2017). A pathway to circular economy: Developing a conceptual

framework for complex value assessment of resources recovered from waste. Journal of Cleaner Production, 168, 1279-1288.

Jacobs, N., Hossain-McKenzie, S., Vugrin, E. (2018). Measurement and analysis of cyber resilience for control systems: an illustrative example. 2018 Resilience Week, 38-46.

Janczar, C., (2024). Digital transformation in the packaging industry: Increasing efficiency, reducing costs and driving sustainability, ESKO 2024 Packaging Trends, (2024) 6-8, https://brands.esko.com/2024-packaging-trends/ (06.01.2024).

Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Suman, R. (2022). Artificial intelligence applications for industry 4.0: A literature-based study. Journal of Industrial Integration and Management, 7(01), 83-111.

Javed, B., Iqbal, M., Abbas, H. (2017). Internet of things (IoT) design considerations for developers and manufacturers. 2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), 834-839.

Jayal, A. D., Badurdeen, F., Dillon, O. W., Jawahir, I. S. (2010). Sustainable manufacturing: Modeling and optimization challenges at the product, process and system levels. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2 (3), 144-152.

Jeschke, S., Brecher, C., Meisen, T., Özdemir, D., Eschert, T. (2017). Industrial internet of things and cyber manufacturing systems. In Industrial Internet of Things (3-19). Springer, Cham

Jovane, F., Koren, Y., Boer, C. R. (2003). Present and future of flexible automation: Towards new paradigms. CIRP Annals, 52(2), 543-560.

Kagermann, H., Wahlster, H., Helbig, J. (2013). Securing the future of German manufacturing industry: Recommendations for implementing the strategic initiative. Acatech – National Academy of Science and Engineering, 1-82, 678

Kamaludin, N., Mulyanti, B. (2020). Cyber physical system in the industry. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (830, 3, 032062). IOP Publishing.

Kasa, H., Arslan, G. (2020). Endüstri 4.0 kapsamında teorik bir analiz: Türkiye örneği. Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi, 19 (76), 1810-1826.

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., Van Woerden, F. (2018). What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050. World Bank Publications, Washington

Khan, M., Wu, X., Xu, X., Dou, W. (2017). Big data challenges and opportunities in the hype of Industry 4.0. IEEE International Conference on Communications (ICC), 1-6.

Kinderyte, L. (2011). Sustainability assessment of enterprises in printing industry. Environmental Research, Engineering and Management, 58(4), 59-64.

Kipphan H., (2001). Handbook of print media technologies and production methods. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Klonoff, D. (2017). Fog Computing and edge computing architectures for processing data from diabetes devices connected to the medical internet of things. Journal of Diabetes Science and Technology, 11, 647 - 652.

Kluczek, A., Gladysz, B., Buczacki, A., Krystosiak, K., Ejsmont, K., Palmer, E. (2023). Aligning sustainable development goals with Industry 4.0 for the design of business model for printing and packaging companies. Packaging Technology and Science, 36(4), 307-325.

Krajnc, D., Glavič, P. (2003). Indicators of sustainable production. Clean Technologies and Environmental Policy, 5, 279-288.

Kurt, M.B. (2012). Flekso baskı sisteminde kullanılan baskı altı malzemelerinin ve kalıbın basan yüzey yüksekliğinin, kaliteye etkisinin tespit edilmesi. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 3-17, 83-85

Larsen, H. F., Hansen, M. S., Hauschild, M. (2009). Life cycle assessment of offset printed matter with EDIP97: How important are emissions of chemicals? Journal of Cleaner Production, 17, 2, 115-128,

Lee, B. (2002). Gravure multi-copy printing. Encyclopedia of Imaging Science and Technology.

Lee, C., Moon, F. (1989). Laminated piezopolymer plates for torsion and bending sensors and actuators. Journal of the Acoustical Society of America, 85, 2432-2439.

Li, J., Dai, J., Issakhov, A., Almojil, S. F., Souri, A. (2021). Towards decision support systems for energy management in the smart industry and Internet of Things. Computers & Industrial Engineering, 161, 107671.

Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E., Ramos, L.F. (2017). Past, present and future of industry 4.0 - A systematic literature review and research agenda proposal. International Journal of Production Research, 55:12, 3609-3629.

Lipiak, J., Salwin, M. (2019). The improvement of sustainability with reference to the printing industry–case study. In Advances in Manufacturing II: Volume 3-Quality Engineering and Management (254-266). Springer International Publishing.

Liu Z., Zhang M., Bhandari B., Wang Y. (2017). 3D Printing: Printing precision and application in food sector. Trends In Food Science & Technology, 69 (A), 83-94.

Liu, C., Xu, X. (2017). Cyber-physical machine tool–the era of machine tool 4.0. Procedia Cirp, 63, 70-75.

Longoni, A., Cagliano, R. (2018). Sustainable innovativeness and the triple bottom line: The role of organizational time perspective. Journal of Business Ethics, 151, 1097-1120.

Lovelace R.W., Thom K., Abdullahi A.A. (2014). Paper and print technology. In: Saleem Hashmi (editor-in-chief). Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Oxford: Elsevier; 2016. pp. 1-8.

MacArthur, E., Waughray, D. (2016). Intelligent Assets: Unlocking the circular economy potential. Ellen MacArthur Foundation: Cowes, UK.

Mahanta, P. K., Rafizul, I. M. (2019). Human health risk assessment due to the presence of heavy metalsin soil of waste disposal site at Khulna in Bangladesh. Journal of Engineering, 10(1), 01-12.

Malhi, G. S., Kaur, M., Kaushik, P. (2021). Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. Sustainability, 13(3), 1318.

Maresova, P., Soukal, I., Svobodova, L., Hedvicakova, M., Javanmardi, E., Selamat, A., Krejcar, O. (2018). Consequences of industry 4.0 in business and economics. Economies, 6(3), 46.

Masurel, E. (2007). Why SMEs invest in environmental measures: Sustainability evidence from small and medium-sized printing firms. Business Strategy and the Environment, 16 (3), 190-201.

Mathy, S., Menanteau P., Criqui, P. (2018). After the paris agreement: Measuring the global decarbonization wedges from national energy scenarios. Ecol Econ 150, 273-289.

McMichael, A.J., Butler, C.D., Folke, C. (2003). New visions for addressing sustainability. Science, 302(5652), 1919-1920.

Moeuf, A., Pellerin, R., Lamouri, S., Tamayo-Giraldo, S., Barbaray, R. (2018). The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. International journal of production research, 56(3), 1118-1136.

Mois, G., Sanislav, T., Folea, S. (2016). A Cyber-physical system for environmental monitoring. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 65, 1463-1471.

Morrar, R., Arman, H., Mousa, S. (2017). The Fourth industrial revolution (Industry 4.0): A Social innovation perspective. Technology Innovation Management Review, 7, 12-20.

Munoz, D. J., Montenegro, J. A., Pinto, M., Fuentes, L. (2019). Energy-aware environments for the development of green applications for cyber–physical systems. Future Generation Computer Systems, 91, 536-554.

Müller, M., Jürgens, J., Redaèlli, M., Klingberg, K., Hautz, W. E., Stock, S. (2018). Impact of the communication and patient hand-off tool SBAR on patient safety: a systematic review. BMJ Open, 8(8), e022202.

Nandini, N., Hema, P., Miruthubashini, T., Viveka, R. (2021). Survey for identifying non-eco-friendly printing activities in various stages of printing workflow. International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology, 6 (1), 168-175

Ochoa, S. F., Fortino, G., Di Fatta, G. (2017). Cyber-physical systems, internet of things and big data. Future Generation Computer Systems, 75, 82–84.

Oliff, H., Liu, Y. (2017). Towards industry 4.0 utilizing data-mining techniques: a case study on quality improvement. Procedia CIRP, 63, 167-172.

Oliveira, V., Sousa, V., Vaz, J.M., Dias-Ferreira, C. (2018). Model for the separate collection of packaging waste in Portuguese low-performing recycling regions. Journal of Environmental Management, 216, 13-24.

Omer, A. M. (2008). Energy, environment and sustainable development. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12 (9), 2265-2300,

Özenir, İ., & NAKIBOĞLU, G. (2019). Sürdürülebilir üretimde Endüstri 4.0'ın yeri. Business & Management Studies: An International Journal, 7(5), 2248-2281.

Öztemel, E., Gursev, S. (2018). Literature review of Industry 4.0 and related technologies. Journal of Intelligent Manufacturing, 31, 127-182.

Öztürk, D., Özgüven, A. (2022). Katı Atık depo alanlarında bulunan atıklardan biyogaz enerjisi üretme potansiyelinin değerlendirilmesi; Van ili örneği. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 26(1), 160-170.

Padher, P., Rohokale, V. (2018). A Cyber-physical system for environmental monitoring. International Journal of Sensor Networks and Data Communications, 08, 1-4.

Pereira, A.C., Romero, F. (2017). A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept. Procedia Manufacturing, 13, 1206-1214.

Polat, H. H. (2018). Endüstriyel baskı teknikleri ve dijital baskı. The Journal of Academic Social Science, 81, 639-646.

Prause, G. (2015). Sustainable business models and structures for industry 4.0. Journal of Security and Sustainability Issues, 2(5), 1-11.

Qin, J., Liu, Y., Grosvenor, R. (2016). A categorical framework of manufacturing for Industry 4.0 and beyond. Procedia CIRP, 52, 173-178.

Radermacher, K. (2016). Environmental and safety issues of polymers and polymeric material in the printing industry. Printing on Polymers: Fundamentals and Applications; Elsevier Science Publishing Co. Inc.: Amsterdam, The Netherlands, 397-415.

Rauch, E., Dallasega, P., Matt, D. T. (2017). Critical factors for introducing lean product development to small and medium sized enterprises in Italy. Procedia CIRP, 60, 362-367.

Reis, J. Z., Gonçalves, R. F. (2018). The role of internet of services (ios) on Industry 4.0 through the service oriented architecture (soa). In Advances in Production Management Systems. Smart Manufacturing for Industry 4.0: IFIP WG 5.7 International Conference, August 26-30, 2018, Seoul, Korea,

Richardson, M. (2011). Design for reuse: Integrating upcycling into industrial design practice. Paper presented at the International Conference on Remanufacturing 2011 in Glasgow. 1-13.

Rikalovic, A., Suzic, N., Bajic, B.,Piuri, V. (2022). Industry 4.0 implementation challenges and opportunities: A technological perspective. IEEE Systems Journal, 16 (2), 2797-2810

Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., Harnisch, M. (2015). Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. Boston consulting group, 9(1), 54-89.

Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., Shen, L. (2018). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. International Journal of Production Research, 57, 1-19.

Saha, H., Saha, N., Ghosh, R., Roychoudhury, S. (2016). Recent trends in implementation of Internet of Things - A review. 2016 IEEE 7th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON), Vancouver, BC, Canada, 2016, 1-6,

Sarvajayakesavalu, S., Charoensudjai, P. (2021). Environmental Issues and Sustainable Development. IntechOpen, BoD - Books on Demand.

Schneider, P. (2018). Managerial challenges of Industry 4.0: An empirically backed research agenda for a nascent field. Review of Managerial Science, 12, 803-848.

Sharma, S., Basu, S., Shetti, N., Kamali, M., Walvekar, P., Aminabhavi, T. (2020). Waste-to-energy nexus: A sustainable development. Environmental Pollution, 267, 115501.

Shi, Z., Xie, Y., Xue, W., Chen, Y., Fu, L., Xu, X. (2020). Smart factory in Industry 4.0. Systems Research and Behavioral Science, 37, 607-617.

Siemens (2017). Endüstri 4.0 yolunda el kitapçığı.

Stock, T., Seliger, G. (2016). Opportunities of sustainable manufacturing in Industry 4.0. Procedia CIRP, 40, 536-541.

Stojmenovic, I., Zhang, F. (2015). Inaugural issue of 'cyber-physical systems'. Cyber-Physical Systems, 1(1), 1-4.

Strandhagen, J. W., Alfnes, E., Strandhagen, J. O., Vallandingham, L. R. (2017). The fit of Industry 4.0 applications in manufacturing logistics: a multiple case study. Advances in Manufacturing, 5(4), 344-358.

Stubbs, W., Cocklin, C. (2008). Conceptualizing a "sustainability business model". Organization & environment, 21(2), 103-127.

Sunesti, Y. (2011). Media and Modernity: The role of the printing press in the modernization of western society. Komunika: Jurnal Dakwah dan Komunikasi, 5(2), 291-301.

Szentgyörgyvölgyi, R. (2016). Gravure Printing, Editor(s): Izdebska, j., Thomas, S., Printing on Polymers, William Andrew Publishing, 199-215,

Şekkeli, Z. H., Bakan, İ. (2018). Akıllı Fabrikalar. Journal of Life Economics, 5(4), 203-220.

Şimşeker, O. (2007a). Matbaa sektöründe kullanılan temel baskı sistemleri ve kullanım alanları, II. Uluslararası Matbaa Teknolojileri Sempozyumu, Ekim 2007, Ankara

Şimşeker, O. (2007b). Dijital ofset baskı yöntemi ile konvansiyonel ofset baskı yönteminin karşılaştırılması, II. Uluslararası Matbaa Teknolojileri Sempozyumu, Ekim 2007, Ankara

Şimşeker, O. (2007c). Flekso baskı sistemi kalıp hazırlama yöntemleri. II. Uluslararası Matbaa Teknolojileri Sempozyumu, Ekim 2007, Ankara

Terziyan, V., Gryshko, S., Golovianko, M. (2018). Patented intelligence: Cloning human decision models for Industry 4.0. Journal of Manufacturing Systems, 48, 204-217.

Thomas, C. (1992). The United nations conference on environment and development (UNCED) of 1992 in Context, Environmental Politics, 1:4, 250-261.

Toker, K. (2018). Endüstri 4.0 ve sürdürülebilirliğe etkileri. İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi İşletme İktisadı Enstitüsü Yönetim Dergisi, 29(84), 51-64.

Tokody, D. (2018). Digitising the European industry - Holonic systems approach. Procedia Manufacturing, 22, 1015-1022.

Tseng, M. L., Chiu, A. S., Liu, G., Jantaralolica, T. (2020). Circular economy enables sustainable consumption and production in multi-level supply chain system. Resources, Conservation and Recycling, 154, 104601.

Tseng, M. L., Tan, R. R., Chiu, A. S., Chien, C. F., Kuo, T. C. (2018). Circular economy meets industry 4.0: Can big data drive industrial symbiosis? Resources, conservation and recycling, 131, 146-147.

Tunçel, O. (2019). Dijital Çağda Baskı Teknolojileri. Sanat ve Tasarım Dergisi, 23, 361-377.

Ulusal Çevre ve Kalkınma Programı (2004) Dünya Sürdürülebilir Kalkınma Zirvesi Johennesburg Uygulama Planı, Ankara Kardelen Ofset

Ünal, H. (2007). Dijital ofset baskı yöntemi ile konvansiyonel ofset baskı yönteminin karşılaştırılması, II. Uluslararası Matbaa Teknolojileri Sempozyumu, Ekim 2007, Ankara

Villalba-Diez, J., Schmidt, D., Gevers, R., Ordieres-Meré, J., Buchwitz, M., Wellbrock, W. (2019). Deep learning for industrial computer vision quality control in the printing industry 4.0. Sensors, 19(18), 3987.

Wagner, H. J., Engesser, R., Ermes, K., Geraths, C., Timmer, J., & Weber, W. (2019). Synthetic biology-inspired design of signal-amplifying materials systems. Materials Today, 22, 25-34.

Wagner, T. (2016). Industry 4.0 as enabler for sustainable lifestyles. Unconference 2016–Insights Workstudio, 4, 1-7.

Wan, J., Cai, H., Zhou, K. (2015). Industrie 4.0: enabling technologies. Proceedings of 2015 International Conference on Intelligent Computing and Internet Of Things, 17-18 January 2015, Harbin, China

Wang, D. (2018). Building value in a world of technological change: Data analytics and industry 4.0. IEEE Engineering Management Review, 46(1), 32-33.

Wikina, S., Thompson, C., Blackwell, E. (2010). Resourceful thinking about printing and related industries: economic considerations and environmental sustainability. The Journal of Technology Studies, 36, 55-62.

Wirba, A. V. (2023). Corporate social responsibility (CSR): The Role of government in promoting CSR. Journal of the Knowledge Economy, 1-27.

World Bank. (2003). World development report 2004: making services work for poor people. The World Bank.

World Economic Forum, (2024). Circular transformation of ındustries: The role of partnerships. World Economic Forum White Papers reports. Published: 17 January 2024

World Meteorological Organization. International Meteorological Vocabulary, 2nd ed.; WMO: Geneva, Switzerland, 1992. [Google Scholar]

Yılan, G., Özcan, A., Çağlar, T. (2020). Sustainable cardboard label production. 10th International Symposium Graphic Engineering and Design, Nov 12-14, 2020, Novi Sad, Serbia.

Yıldız, A. (2018). Endüstri 4.0 ve akıllı fabrikalar. Sakarya University Journal of Science, 22(2), 546-556.

Yıldız, A. (2022). Bir araştırma metodolojisi olarak sistematik literatür taramasına genel bakış. Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 22(2), 367-386.

Zhu, Q., Sangiovanni-Vincentelli, A. (2018). Codesign methodologies and tools for cyber-physical systems. Proceedings of the IEEE, 106(9), 1484-1500.