

ENDÜSTRİ 4.0'DA KARANLIK FABRİKALAR: ÜRETİM, İŞGÜCÜ VE SOSYOEKONOMİK ETKİLER

Serkan ÇELİK

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Türkiye

serkancelik@nku.edu.tr

<https://orcid.org/0000-0002-5835-1300>

<i>Anf</i>	ÇELİK, S. (2026). ENDÜSTRİ 4.0'DA KARANLIK FABRİKALAR: ÜRETİM, İŞGÜCÜ VE SOSYOEKONOMİK ETKİLER. <i>İstanbul Aydın Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi</i> , 18(3), 399-443.
------------	--

ÖZ

Bu çalışma, karanlık fabrikalar olgusunu Endüstri 4.0 bağlamında iktisadi ve sosyal politika perspektifinden bütüncül bir yaklaşımla incelemeyi amaçlamaktadır. Sanayi devrimlerinin tarihsel evrimi içinde değerlendirilen bu üretim modeli, dijitalleşme, otomasyon ve yapay zekâ teknolojileri aracılığıyla üretim süreçlerinde insan emeğinin rolünü yeniden tanımlamaktadır. Çalışmada karanlık fabrikaların ekonomik etkileri üretim verimliliği, maliyet yapıları, sermaye yoğunlaşması ve küresel rekabet ekseninde; sosyal etkileri ise işgücü piyasalarının dönüşümü, nitelik temelli ayrışma, gelir dağılımı ve refah mekanizmaları bağlamında analiz edilmiştir. Bulgular, verimlilik artışına rağmen işgücü talebinde daralma ve eşitsizlik riskinin güçlendiğini ortaya koymaktadır. Bu çerçevede robot vergisi, evrensel temel gelir ve aktif işgücü politikaları öne çıkmaktadır. Sonuç olarak karanlık fabrikalar, üretim ilişkilerini, emek-sermaye dengesini ve sosyal politika araçlarını yeniden şekillendiren bir iktisadi paradigma olarak değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Karanlık Fabrikalar; Endüstri 4.0, Yapay Zekâ, Akıllı Fabrikalar, İşgücü Piyasası.*

DARK FACTORIES IN INDUSTRY 4.0: PRODUCTION, LABOR, AND SOCIOECONOMIC IMPLICATIONS

ABSTRACT

This study aims to examine the phenomenon of dark factories within the framework of Industry 4.0 from a comprehensive economic and social policy perspective. Positioned within the historical evolution of industrial revolutions, this production model redefines the role of human labor in manufacturing processes through digitalization, automation, and artificial intelligence technologies. The study analyzes the economic impacts of dark factories in terms of production efficiency, cost structures, capital intensification, and global competitiveness, while their social implications are examined in relation to labor market transformation, skill-based polarization, income distribution, and social welfare mechanisms. The findings indicate that despite increased productivity, labor demand declines and inequality risks intensify. In this context, policy instruments such as robot taxation, universal basic income, and active labor market policies gain prominence. In conclusion, dark factories are evaluated as an economic paradigm that reshapes production relations, the labor-capital balance, and social policy frameworks.

Keywords: *Dark Factories, Industry 4.0, Artificial Intelligence, Smart Factories, Labor Market.*

GİRİŞ

Sanayi devrimleri tarih boyunca üretim biçimlerini, ekonomik yapıları ve toplumsal ilişkileri köklü biçimde dönüştüren kırılma noktaları olarak değerlendirilmiştir. Buhar gücüyle başlayan mekanizasyon süreci, elektrik enerjisiyle kitlesel üretime, ardından bilgi teknolojileriyle otomasyona evrilmiş ve günümüzde dijitalleşme ekseninde yeni bir üretim paradigmasına ulaşmıştır. Bu dönüşümün en güncel aşaması olarak kabul edilen Endüstri 4.0, üretim sistemlerinin yalnızca otomatik değil aynı zamanda akıllı ve otonom hale geldiği bir dönemi temsil etmektedir (Yıldız, 2018; Lasi vd., 2014).

Endüstri 4.0 kavramı ilk kez 2011 yılında Hannover Fuarı'nda ortaya atılmış ve kısa sürede hem akademik literatürde hem de sanayi uygulamalarında yaygınlık kazanmıştır. Bu paradigma; nesnelerin interneti, büyük veri, bulut bilişim, yapay zekâ ve robotik teknolojilerin entegrasyonu ile üretim sistemlerinin dijitalleşmesini ifade etmektedir (Gedik, 2021; Hermann vd., 2016). Bu süreç yalnızca teknik bir dönüşüm değil, aynı zamanda ekonomik, sosyal ve kurumsal yapıların yeniden şekillenmesini beraberinde getiren çok boyutlu bir değişimi ifade etmektedir (Xu vd., 2018). Bu dönüşüm, özellikle iktisadi açıdan üretim maliyetleri, verimlilik düzeyleri ve küresel rekabet yapısı üzerinde belirleyici etkiler yaratmaktadır. Endüstri 4.0 ile birlikte ortaya çıkan karanlık fabrikalar, emek yoğun üretimden sermaye ve teknoloji yoğun üretim modeline geçişi hızlandırarak işgücü piyasalarının yapısını ve gelir dağılımını doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda karanlık fabrikalar yalnızca teknik bir üretim modeli değil, aynı zamanda iktisadi sistemin işleyişini dönüştüren bir olgu olarak ele alınmalıdır.

Bu dönüşümün en radikal çıktılarından biri ise “karanlık fabrikalar” olarak adlandırılan üretim modelidir. Karanlık fabrika kavramı, üretimin insan müdahalesi olmaksızın tamamen otomasyon sistemleri tarafından gerçekleştirildiği üretim ortamlarını tanımlamaktadır. Bu tür fabrikalarda ışığa, ısıtmaya veya insan odaklı ergonomik düzenlemelere ihtiyaç duyulmamakta; üretim süreçleri robotik sistemler ve algoritmalar aracılığıyla yürütülmektedir (Düzdar & Kolçak, 2024; Lee vd., 2015). Bu nedenle söz konusu üretim modeli “ışık kapalı üretim” (lights-out manufacturing) olarak da literatürde yer almaktadır.

Karanlık fabrikaların ortaya çıkışı, aslında Endüstri 4.0'ın teorik çerçevesinin pratikteki en ileri uygulaması olarak değerlendirilmektedir.

İlk olarak 1980’li yıllarda bir vizyon olarak ortaya atılan bu model, günümüzde siber-fiziksel sistemlerin gelişimi ile birlikte uygulanabilir hale gelmiştir. Siber-fiziksel sistemler, fiziksel üretim süreçleri ile dijital kontrol mekanizmalarını bütünleştirerek otonom üretim yapılarının temelini oluşturmakta ve bu yönüyle karanlık fabrikaların teknolojik altyapısını mümkün kılmaktadır (Lee vd., 2015; Öztemel & Gürsev, 2020).

Geleneksel üretim sistemlerinde insan emeği üretimin merkezinde yer alırken, karanlık fabrikalarda bu durum tersine dönmektedir. İnsan faktörü üretim sürecinden büyük ölçüde çekilmekte, daha çok denetim, planlama ve sistem yönetimi gibi üst düzey fonksiyonlara kaydırılmaktadır (Akben & Avşar, 2018). Bu durum, işgücü piyasalarının yapısını köklü biçimde değiştirme potansiyeline sahiptir. Özellikle düşük ve orta vasıflı işgücünün yerini otomasyon sistemlerine bırakması, teknolojik işsizlik tartışmalarını gündeme getirmektedir (Frey & Osborne, 2017).

Endüstri 4.0’ın üretim süreçlerine getirdiği dönüşüm yalnızca işgücü ile sınırlı değildir. Aynı zamanda maliyet yapıları, üretim esnekliği ve tedarik zinciri yönetimi de bu süreçten doğrudan etkilenmektedir. Karanlık fabrikalar, daha düşük hata oranı, yüksek verimlilik ve kesintisiz üretim gibi avantajlar sunarak işletmelerin rekabet gücünü artırmaktadır (Gökten, 2018; Schönsleben vd., 2017). Bu durum, küresel rekabet ortamında işletmeler için bu modele geçişi neredeyse zorunlu hale getirmektedir. Bununla birlikte, karanlık fabrikaların yaygınlaşması önemli sosyal ve politik sorunları da beraberinde getirmektedir. İşgücünün üretimden çekilmesi, gelir dağılımında bozulma, işsizlik oranlarında artış ve sosyal güvenlik sistemlerinin sürdürülebilirliği gibi konular tartışılmaya başlanmıştır. Özellikle robotların vergilendirilmesi gibi yeni politika araçları literatürde yer almaya başlamıştır (Civriz & Taşkın, 2022). Bunun yanında Autor (2015), teknolojik dönüşümlerin işgücü üzerindeki etkilerinin yalnızca iş kaybı ile sınırlı olmadığını, aynı zamanda yeni iş alanlarının da ortaya çıkabileceğini vurgulamaktadır.

Endüstri 4.0 ve karanlık fabrikalar arasındaki ilişki, akıllı fabrikalar kavramı üzerinden daha iyi anlaşılabilir. Akıllı fabrikalar, üretim süreçlerinin esnek, otonom ve veri odaklı bir şekilde yönetildiği sistemler olarak tanımlanırken, karanlık fabrikalar bu sistemlerin insan faktöründen tamamen arındırılmış versiyonunu temsil etmektedir (Şekkeli & Bakan, 2018). Bu bağlamda akıllı fabrikalar, karanlık fabrikalara geçiş sürecinde bir ara aşama olarak değerlendirilmektedir (Chen vd., 2018).

Literatürde karanlık fabrikalar üzerine yapılan çalışmaların önemli bir kısmı teknik ve operasyonel boyutlara odaklanmaktadır. Ancak bu dönüşümün sosyal politika, işgücü piyasaları ve ekonomik eşitsizlikler üzerindeki etkileri henüz yeterince derinlemesine incelenmemiştir. Bu durum, mevcut çalışmanın önemini ortaya koymaktadır. Özellikle disiplinlerarası bir yaklaşım ile teknik, ekonomik ve sosyal boyutların birlikte ele alınması gerekmektedir (Davies vd., 2017).

Bu çalışma, mevcut literatürde karanlık fabrikaların çoğunlukla otomasyon, verimlilik, akıllı üretim sistemleri ve teknik altyapı ekseninde ele alınmasına karşılık, söz konusu dönüşümün iktisadi yapı, işgücü piyasaları ve sosyal politika üzerindeki sonuçlarını aynı analitik çerçevede değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Literatürde karanlık fabrikalar üzerine yapılan çalışmaların önemli bir kısmı üretim teknolojileri, operasyonel verimlilik ve dijital entegrasyon boyutlarına yoğunlaşırken; emeğin yeniden konumlanması, gelir dağılımı, sermaye yoğunlaşması ve refah devleti mekanizmaları üzerindeki etkiler görece sınırlı biçimde tartışılmaktadır. Bu çalışma, söz konusu boşluğu üç düzeyde doldurmayı hedeflemektedir. İlk olarak, karanlık fabrika kavramını yalnızca teknik bir üretim modeli olarak değil, emek-sermaye ilişkilerini dönüştüren bir üretim paradigması olarak kavramsallaştırmaktadır. İkinci olarak, Endüstri 4.0 literatürü ile işgücü piyasası ve sosyal politika literatürünü birlikte ele alarak dağınık bulguları ortak bir iktisadi-sosyal analiz ekseninde birleştirmektedir. Üçüncü olarak ise, karanlık fabrikaların üretim verimliliği ve rekabet avantajı kadar eşitsizlik, işgücü kutuplaşması ve sosyal politika ihtiyacı bakımından da değerlendirilmesi gerektiğini savunmaktadır. Bu yönüyle çalışmanın özgün katkısı, teknoloji merkezli literatürde görece arka planda kalan bölüşüm, istihdam ve sosyal devlet boyutlarını analizin merkezine taşımasında yatmaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, karanlık fabrikalar olgusunu Endüstri 4.0 bağlamında bütüncül bir perspektifle analiz etmektir. Bu doğrultuda çalışmada şu temel araştırma sorularına yanıt aranacaktır:

- (i)Karanlık fabrikalar nasıl ortaya çıkmıştır ve Endüstri 4.0 ile ilişkisi nedir?
- (ii)Bu üretim modelinin sanayi devrimleri bağlamından nasıl konumlandırılabilir?
- (iii)Karanlık fabrikaların işgücü piyasaları üzerindeki etkileri nelerdir?
- (iv) Bu dönüşüm karşısında sosyal politika araçları nasıl şekillenmelidir?

Teorik Çerçeve

Bu çalışma, karanlık fabrikaları teknolojik ilerlemenin doğrusal ve nötr bir sonucu olarak değil; üretim ilişkileri, emek-sermaye dengesi ve bölüşüm mekanizmaları üzerinde etkide bulunan tarihsel bir dönüşüm alanı olarak ele almaktadır. Bu yaklaşım, teknolojik değişimin yalnızca verimlilik artışı üreten bir süreç olmadığını; aynı zamanda üretim sürecinde karar alma yetkisinin, emek kullanım biçimlerinin ve gelir paylaşımının yeniden örgütlenmesine yol açtığını varsaymaktadır. Bu nedenle çalışmanın teorik zemini, Endüstri 4.0'ın teknik boyutunu kabul etmekle birlikte, bu dönüşümün iktisadi ve toplumsal sonuçlarının ayrıca analiz edilmesi gerektiği görüşüne dayanmaktadır.

Bu çerçevede çalışmada üç kavramsal eksen birlikte kullanılmaktadır. Birinci eksen, karanlık fabrikaları Endüstri 4.0'ın ileri bir üretim aşaması olarak ele alan dijitalleşme ve akıllı üretim literatürüdür. İkinci eksen, otomasyonun emek talebi, beceri yapısı ve işgücü piyasası kutuplaşması üzerindeki etkilerini inceleyen işgücü piyasası literatürüdür. Üçüncü eksen ise, teknolojik dönüşümün gelir dağılımı, sosyal riskler ve refah devleti mekanizmaları üzerindeki sonuçlarını tartışan sosyal politika literatürüdür. Çalışma, bu üç eksenin birlikte değerlendirilerek karanlık fabrikaların yalnızca üretim organizasyonunda değil, bölüşüm rejimi ve sosyal politika mimarisinde de dönüştürücü sonuçlar yarattığını ileri sürmektedir.

Bu doğrultuda makalenin temel varsayımı, karanlık fabrikaların üretimde insan emeğinin tamamen ortadan kalkmasını değil, emeğin üretim süreci içindeki konumunun yeniden dağıtılmasını ifade ettiğidir. Fiziksel ve rutin emek kullanımının azalmasına karşılık; tasarım, veri analizi, yazılım, bakım, denetim ve sistem yönetimi gibi alanların öne çıkması, işgücünde nitelik temelli bir ayrışmayı güçlendirmektedir. Bu durum, verimlilik artışı ile eşitsizlik riski arasındaki gerilimi görünür hale getirmektedir. Dolayısıyla çalışma, karanlık fabrikaları yalnızca teknik etkinlik, maliyet düşüşü veya rekabet avantajı sağlayan bir model olarak değil; aynı zamanda emek-sermaye ilişkilerini, istihdam yapısını ve sosyal politika araçlarını yeniden düşünmeyi gerektiren yapısal bir dönüşüm olarak değerlendirmektedir.

Bu çalışma, nitel araştırma yöntemlerinden biri olan amaçlı literatür incelemesine dayanmaktadır. Çalışma kapsamında karanlık fabrikalar, Endüstri 4.0, otomasyon, işgücü piyasası ve sosyal politika başlıklarında Web of Science, Scopus ve Google Akademik veri tabanlarında yer alan

ulusal ve uluslararası akademik çalışmalar taranmıştır. Literatür seçimi yapılırken üç ölçüt esas alınmıştır: (i) çalışmanın karanlık fabrikalar, akıllı üretim, otomasyon veya Endüstri 4.0 ile doğrudan ilişkili olması, (ii) işgücü, gelir dağılımı, emek-sermaye ilişkisi veya sosyal politika etkileri bakımından analitik katkı sunması, (iii) kavramsal ya da güncel tartışmalar açısından alan yazında referans niteliği taşıması. İncelenen çalışmalar, yalnızca tanımlayıcı biçimde özetlenmemiş; teknik/operasyonel literatür, işgücü piyasası literatürü ve sosyal politika literatürü şeklinde sınıflandırılarak karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmiştir. Böylece çalışma, literatürde dağınık halde bulunan tartışmaları ortak bir kavramsal çerçeve içinde bir araya getirmeyi amaçlamaktadır.

Bu çerçevede çalışma, yalnızca tanımlayıcı bir literatür özeti sunmamakta; farklı literatür kümeleri arasındaki kavramsal ayrımları ve ortaklaşan noktaları tartışmalı bir biçimde değerlendirmektedir. Özellikle Endüstri 4.0, karanlık fabrikalar, otomasyon, işgücü piyasası, teknolojik işsizlik ve sosyal politika başlıkları altında yer alan çalışmalar karşılaştırmalı olarak incelenmiş; teknik literatürde öne çıkan verimlilik ve rekabet argümanları ile sosyal bilimler literatüründe vurgulanan eşitsizlik, güvencesizlik ve refah devleti tartışmaları birlikte yorumlanmıştır. Böylece çalışma, mevcut literatürde dağınık biçimde yer alan bulguları ortak bir iktisadi-sosyal analiz ekseninde bütünleştirmektedir.

Son olarak, karanlık fabrikalar yalnızca teknolojik bir yenilik değil, aynı zamanda insanlık tarihinin üretim anlayışında radikal bir paradigma değişimini temsil etmektedir. Bu dönüşümün doğru anlaşılması hem ekonomik sürdürülebilirlik hem de sosyal adalet açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle karanlık fabrikaların sadece teknik bir fenomen olarak değil, çok boyutlu bir toplumsal dönüşüm olarak ele alınması gerekmektedir.

Çalışmada, söz konusu dönüşümü özellikle iktisadi etkileri çerçevesinde ele alarak üretim yapılarındaki değişimin işgücü piyasaları, gelir dağılımı ve sosyal politika araçları üzerindeki sonuçlarını analiz etmek amaçlanmaktadır. Bu yönüyle çalışma, teknolojik dönüşüm ile iktisadi yapı arasındaki ilişkiye katkı sunmayı hedeflemektedir.

Bu makalenin temel tezi, karanlık fabrikaların yalnızca üretim süreçlerinde verimlilik artışı sağlayan teknik bir yenilik olmadığı; aynı zamanda emek talebini yeniden biçimlendiren, sermaye yoğunlaşmasını güçlendiren

ve bu nedenle sosyal politika araçlarının kapsamını yeniden düşünmeyi zorunlu kılan yapısal bir dönüşüm olduğudur. Bu nedenle çalışma, karanlık fabrikaları teknolojik ilerlemenin kaçınılmaz bir sonucu olarak değil, iktisadi ve toplumsal sonuçları bakımından tartışılması gereken bir üretim paradigması olarak ele almaktadır. Dolayısıyla çalışma, karanlık fabrika tartışmasını teknik etkinlik ve verimlilik söyleminin ötesine taşıyarak, teknolojik dönüşümün bölüşümsel ve kurumsal sonuçlarını merkeze alan bir değerlendirme sunmaktadır.

SANAYİ DEVRİMLERİ VE ENDÜSTRİ 4.0'A GİDEN SÜREÇ

Sanayi devrimleri, üretim süreçlerinde meydana gelen köklü dönüşümler aracılığıyla ekonomik ve toplumsal yapıyı yeniden şekillendiren tarihsel kırılma noktaları olarak değerlendirilmektedir. Bu devrimler yalnızca teknolojik ilerlemelerle sınırlı kalmamış, aynı zamanda emek, sermaye ve üretim ilişkilerinin yeniden tanımlanmasına yol açmıştır. Bu bağlamda sanayi devrimleri, üretim tekniklerinin evriminden ziyade, bir bütün olarak üretim sistemlerinin dönüşümünü ifade etmektedir (Uzgören, 2023; Vandenberg, 2020).

Birinci Sanayi Devrimi, 18. yüzyılın sonlarında buhar gücünün üretim süreçlerine entegre edilmesiyle başlamıştır. Buhar makinesinin icadı, insan ve hayvan gücüne dayalı üretim sistemlerinin yerini mekanik üretime bırakmasına neden olmuştur. Bu dönemde özellikle tekstil ve demir-çelik sektörlerinde önemli gelişmeler yaşanmış, üretim ölçekleri genişlemiş ve üretim süreçleri daha sistematik hale gelmiştir (Uzgören, 2023). Bu süreç aynı zamanda kapitalist üretim ilişkilerinin kurumsallaşmasını hızlandırmış ve fabrikalaşma olgusunun ortaya çıkmasına zemin hazırlamıştır (Moll, 2021).

İkinci Sanayi Devrimi ise 19. yüzyılın sonlarında elektrik enerjisinin üretim süreçlerine dahil edilmesiyle ortaya çıkmıştır. Elektriğin kullanımı, seri üretim sistemlerinin gelişmesini sağlamış ve üretim maliyetlerini önemli ölçüde düşürmüştür. Bu dönemde Fordist üretim modeli ile birlikte standartlaşma ve kitlesel üretim anlayışı hâkim hale gelmiştir. Bu gelişmeler, üretim süreçlerinin daha verimli ve organize bir şekilde yürütülmesine olanak tanımıştır (Şekkeli & Bakan, 2018). Aynı zamanda bu dönem, iş bölümünün derinleştiği ve emek süreçlerinin daha katı bir şekilde yapılandırıldığı bir üretim rejimini temsil etmektedir (Schönsleben vd., 2017).

Üçüncü Sanayi Devrimi, 20. yüzyılın ikinci yarısında bilgi teknolojilerinin üretim süreçlerine entegre edilmesiyle başlamıştır. Bu dönemde bilgisayarlar, otomasyon sistemleri ve elektronik cihazlar üretim süreçlerinin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Özellikle programlanabilir mantık denetleyicileri (PLC) ve bilgisayar destekli üretim sistemleri, üretimde insan müdahalesini azaltmış ve üretim süreçlerinin daha hassas ve hızlı bir şekilde yürütülmesini sağlamıştır (Yıldız, 2018). Bu aşama, üretim sistemlerinin dijitalleşmeye geçişinin ilk adımı olarak değerlendirilmektedir (Lu, 2017).

Sanayi devrimlerinin her biri, üretim faktörleri arasındaki ilişkiyi yeniden tanımlamış ve emek-sermaye dengesini değiştirmiştir. Birinci ve ikinci sanayi devrimlerinde emek yoğun üretim yapısı hâkimken, üçüncü sanayi devriminde teknoloji yoğun üretim ön plana çıkmıştır. Bu dönüşüm, işgücünün niteliğinde de önemli değişimlere yol açmış, daha yüksek beceri gerektiren işlere olan talep artmıştır (Çakır, 2018). Bu bağlamda sanayi devrimleri, yalnızca üretim teknolojilerini değil, aynı zamanda işgücü piyasalarının yapısını da dönüştüren süreçler olarak ele alınmalıdır (Autor, 2015).

Sanayi devrimlerini yalnızca teknolojik yenilikler dizisi olarak okumak yetersizdir. Her sanayi devrimi, üretim araçlarındaki değişim kadar, emeğin denetimi, işbölümünün örgütlenmesi ve sermaye birikiminin biçimi bakımından da yeni bir rejim üretmiştir. Bu nedenle Endüstri 4.0'ın tarihsel önemi, sadece dijital teknolojilerin üretime entegrasyonunda değil, üretim sürecinin örgütlenme mantığını değiştirmesinde yatmaktadır. Karanlık fabrikalar tam da bu noktada, üretimin insan emeğinden görece bağımsızlaştırılmasının tarihsel olarak ulaştığı en ileri aşamayı temsil etmektedir.

Dördüncü Sanayi Devrimi olarak adlandırılan Endüstri 4.0 ise önceki devrimlerden farklı olarak fiziksel ve dijital sistemlerin entegrasyonunu esas almaktadır. Bu yeni üretim paradigması, siber-fiziksel sistemler, nesnelerin interneti, büyük veri analitiği ve yapay zekâ gibi teknolojilerin üretim süreçlerine entegre edilmesiyle şekillenmektedir (Gedik, 2021; Xu vd., 2018). Bu bağlamda Endüstri 4.0, üretim sistemlerinin yalnızca otomatik değil aynı zamanda akıllı ve otonom hale geldiği bir dönemi temsil etmektedir (Lasi vd., 2014).

Endüstri 4.0'ın en önemli özelliklerinden biri, üretim süreçlerinin merkezi olmayan bir yapıya kavuşmasıdır. Geleneksel üretim sistemlerinde karar alma süreçleri merkezi bir yapı tarafından yürütülürken, Endüstri 4.0 ile birlikte makineler ve sistemler kendi aralarında iletişim kurarak otonom kararlar alabilmektedir. Bu durum, üretim süreçlerinin daha esnek ve hızlı bir şekilde uyum sağlamasına olanak tanımaktadır (Öztemel & Gürsev, 2020; Hermann vd., 2016).

Bu yeni üretim paradigması, aynı zamanda veri odaklı bir yaklaşımı da beraberinde getirmektedir. Üretim süreçlerinden elde edilen büyük veri setleri, analiz edilerek üretim süreçlerinin optimize edilmesine katkı sağlamaktadır. Bu sayede üretim hataları minimize edilmekte, kaynak kullanımı daha verimli hale getirilmekte ve üretim maliyetleri düşürülmektedir (Vaddadi vd., 2020; Chen vd., 2018).

Endüstri 4.0'ın ortaya çıkışı, küresel rekabetin artması ve müşteri taleplerinin çeşitlenmesi ile doğrudan ilişkilidir. Günümüzde tüketiciler daha kişiselleştirilmiş ürünler talep etmekte ve bu durum üretim sistemlerinin daha esnek hale gelmesini zorunlu kılmaktadır. Endüstri 4.0 teknolojileri, bu taleplere hızlı ve etkin bir şekilde cevap verebilecek üretim sistemlerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır (Öztemel & Gürsev, 2020; Khan vd., 2021).

Sanayi devrimlerinin evrimi incelendiğinde, üretim süreçlerinin giderek daha az insan müdahalesi gerektiren bir yapıya doğru ilerlediği görülmektedir. Bu bağlamda Endüstri 4.0, insan faktörünün üretim sürecindeki rolünü yeniden tanımlamaktadır. İnsanlar üretim sürecinden tamamen çekilmemekle birlikte, daha çok denetim, analiz ve stratejik karar alma süreçlerinde yer almaktadır (Akben & Avcı, 2018; Oosthuizen, 2022). Bu dönüşümün bir sonucu olarak ortaya çıkan karanlık fabrikalar, sanayi devrimlerinin ulaştığı en ileri aşamayı temsil etmektedir. Karanlık fabrikalar, üretim süreçlerinin tamamen otomasyon sistemleri tarafından yürütüldüğü ve insan müdahalesinin minimum düzeye indirildiği üretim ortamlarıdır. Bu bağlamda karanlık fabrikalar, Endüstri 4.0'ın somut bir çıktısı olarak değerlendirilmektedir (Düzdar & Kolçak, 2024; Wang vd., 2025).

Bu bağlamda karanlık fabrikalar, yalnızca üretim teknolojisinin bir uzantısı değil, aynı zamanda üretim faktörlerinin göreceli ağırlıklarının yeniden dağıtıldığı bir iktisadi yapının göstergesidir. Emek yoğun üretimden

sermaye ve teknoloji yoğun üretime geçiş, işletmelerin maliyet yapısını dönüştürürken, makro düzeyde ücret payı, istihdam yapısı ve gelir dağılımı üzerinde belirleyici etkiler yaratmaktadır. Dolayısıyla Endüstri 4.0'ın tarihsel yeri, teknik modernizasyonun ötesinde, üretim ekonomisinin temel dinamiklerini yeniden yapılandırmasında aranmalıdır.

Endüstri 4.0'ın sanayi devrimleri içindeki yeri, yalnızca teknolojik gelişmelerle açıklanamaz. Bu devrim, aynı zamanda ekonomik ve toplumsal yapıları da derinden etkilemektedir. İşgücü piyasalarının dönüşümü, yeni iş modellerinin ortaya çıkması ve üretim süreçlerinin dijitalleşmesi, bu devrimin en önemli sonuçları arasında yer almaktadır (Çakır, 2018; Kolade & Owoseni, 2022). Sonuç olarak, sanayi devrimleri tarihsel bir süreç içerisinde birbirini tamamlayan ve geliştiren aşamalar olarak değerlendirilebilir. Endüstri 4.0 ise bu sürecin en güncel ve en kapsamlı aşamasını temsil etmektedir. Bu bağlamda karanlık fabrikalar, sanayi devrimlerinin evrimsel sürecinin bir sonucu olarak ortaya çıkmış ve üretim sistemlerinin geleceğine dair önemli ipuçları sunmaktadır.

ENDÜSTRİ 4.0 VE AKILLI FABRİKALAR

Bu bölüm, makalenin teorik çerçevesinde tanımlanan üçlü ayrımı izlemektedir. İlk olarak Endüstri 4.0 ve akıllı üretim literatürü üzerinden karanlık fabrikaların teknik ve kavramsal zemini açıklanacaktır. Ardından bu üretim modelinin ekonomik etkileri, işgücü piyasalarındaki dönüşüm ve sosyal politika sonuçları ele alınacaktır. Böylece çalışma, karanlık fabrikaları yalnızca mühendislik ve üretim organizasyonu açısından değil; aynı zamanda emek, bölüşüm ve devletin rolü bakımından da çok katmanlı bir dönüşüm alanı olarak değerlendirmektedir.

Endüstri 4.0 kavramı, yalnızca üretim süreçlerinin otomasyonu ile sınırlı olmayan, aynı zamanda fiziksel ve dijital sistemlerin bütünleşmesini ifade eden kapsamlı bir dönüşüm paradigmasıdır. Bu paradigma, üretim sistemlerinin akıllı, otonom ve birbirleriyle sürekli iletişim halinde olduğu bir yapıya evrilmesini öngörmektedir. Literatürde Endüstri 4.0, özellikle siber-fiziksel sistemler (cyber-physical systems–CPS), nesnelerin interneti (Internet of Things–IoT) ve büyük veri analitiği gibi teknolojilerin entegrasyonu ile açıklanmaktadır (Öztemel & Gürsev, 2018; Lee vd., 2015).

Endüstri 4.0'ın teorik çerçevesi uluslararası literatürde ilk kez sistematik biçimde Lasi ve arkadaşları (2014) tarafından ortaya konulmuş ve bu

kavram üretim sistemlerinin dijitalleşmesi, yatay ve dikey entegrasyon ile akıllı ağlar üzerinden tanımlanmıştır. Bu yaklaşım, üretim süreçlerinin yalnızca otomatikleşmesini değil, aynı zamanda veri odaklı ve birbirine bağlı sistemler haline gelmesini ifade etmektedir. Bu bağlamda Endüstri 4.0, üretimin dijital dönüşümünü temsil eden bir üst paradigma olarak değerlendirilmektedir (Lasi vd., 2014; Xu vd., 2018).

Hermann vd. (2016) tarafından geliştirilen Endüstri 4.0 tasarım prensipleri, bu dönüşümün temel yapı taşlarını açıklamaktadır. Bu prensipler arasında birlikte çalışabilirlik, sanallaştırma, merkeziyetsizlik, gerçek zamanlı veri işleme, hizmet odaklılık ve modülerlik yer almaktadır. Bu prensipler doğrultusunda üretim sistemleri daha esnek, uyarlanabilir ve dinamik hale gelmektedir (Hermann vd., 2016).

Akıllı fabrikalar, Endüstri 4.0'ın en somut ve uygulamaya dönük çıktılarından biri olarak kabul edilmektedir. Akıllı fabrika kavramı, üretim süreçlerinin sensörler, yazılımlar ve iletişim teknolojileri aracılığıyla sürekli izlenebildiği, analiz edilebildiği ve optimize edilebildiği üretim ortamlarını ifade etmektedir (Şekkeli & Bakan, 2018; Chen vd., 2018). Bu fabrikalarda makineler yalnızca üretim yapmakla kalmamakta, aynı zamanda veri üretmekte ve bu veriler üzerinden karar alma süreçlerine aktif biçimde katılmaktadır.

Bununla birlikte akıllı fabrikalar ile karanlık fabrikalar arasında kavramsal bir ayrım yapılması gerekmektedir. Akıllı fabrikalar, insan-makine etkileşiminin veri ve iletişim teknolojileri üzerinden optimize edildiği üretim sistemlerini ifade ederken, karanlık fabrikalar bu etkileşimin asgari düzeye indirildiği ve insan emeğinin üretim sürecinden büyük ölçüde çekildiği daha ileri bir aşamayı temsil etmektedir. Bu ayrım önemlidir; çünkü akıllı fabrika söylemi çoğu zaman teknik verimlilik artışı üzerinden olumlu bir çerçeve sunarken, karanlık fabrika modeli işgücü piyasaları ve sosyal politika bakımından daha ağır sonuçlar doğurabilecek yapısal bir dönüşümü işaret etmektedir.

Akıllı fabrikaların temelinde yer alan siber-fiziksel sistemler, fiziksel üretim süreçleri ile dijital kontrol sistemleri arasında sürekli bir veri akışı sağlamaktadır. Bu sistemler, üretim süreçlerini izleyebilmekte, analiz edebilmekte ve elde edilen verilere dayanarak otonom kararlar alabilmektedir (Lee vd., 2015). Bu durum, üretim süreçlerinin insan müdahalesine olan bağımlılığını azaltmakta ve sistemlerin kendi kendini

optimize edebilmesine olanak tanımaktadır.

Nesnelerin interneti (IoT), akıllı fabrikaların bir diğer kritik bileşenidir. IoT teknolojileri sayesinde üretim sisteminde yer alan tüm makineler, sensörler ve cihazlar birbirleriyle bağlantı kurarak veri alışverişinde bulunabilmektedir. Bu bağlantı sayesinde üretim süreçleri gerçek zamanlı olarak izlenebilmekte ve anlık müdahaleler ile süreç optimizasyonu sağlanabilmektedir (Vaddadi vd., 2020).

Büyük veri analitiği ve yapay zekâ teknolojileri, akıllı fabrikaların karar alma mekanizmalarının merkezinde yer almaktadır. Üretim süreçlerinden elde edilen büyük veri setleri, gelişmiş algoritmalar aracılığıyla analiz edilmekte ve bu analizler üretim süreçlerinin iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. Özellikle öngörücü bakım (predictive maintenance) uygulamaları, üretim kesintilerini azaltarak verimliliği artırmaktadır (Öztemel & Gürsev, 2018; Lu, 2017).

Akıllı fabrikaların bir diğer önemli özelliği, üretim sistemlerinin esnekliğidir. Geleneksel üretim sistemlerinde belirli ürünler için tasarlanmış sabit üretim hatları bulunurken, akıllı fabrikalarda üretim sistemleri farklı ürünlerin üretimine hızlı bir şekilde adapte olabilmektedir. Bu durum, kitlesel kişiselleştirme (mass customization) taleplerine cevap verilmesini mümkün kılmaktadır (Xu vd., 2018).

Dijital ikiz (digital twin), fiziksel bir makine, üretim hattı veya fabrikanın sensör verileriyle sürekli güncellenen sanal eşidir. Bu teknoloji, gerçek sistem üzerinde maliyetli ya da riskli müdahaleler yapılmadan önce üretim senaryolarının modellenmesini, arıza olasılıklarının sınanmasını ve performansın izlenmesini mümkün kılmaktadır. Dolayısıyla dijital ikiz, yalnızca üç boyutlu bir model değil; fiziksel sistem ile sanal temsil arasında çift yönlü ve gerçek zamanlı veri akışına dayanan dinamik bir karar destek mekanizmasıdır (Wichter vd., 2024; Mourtzis, 2023).

Endüstri 4.0 ile birlikte üretim sistemlerinde insan-makine etkileşimi de önemli bir dönüşüm geçirmektedir. Geleneksel üretim sistemlerinde insan operatörler üretim sürecinin merkezinde yer alırken, akıllı fabrikalarda bu rol giderek değişmektedir. İnsanlar daha çok sistemlerin denetimi, veri analizi ve stratejik karar alma süreçlerinde yer almaktadır (Akben & Avşar, 2018; Oosthuizen, 2022).

Uluslararası literatürde akıllı fabrikaların yalnızca teknik bir dönüşüm olmadığı, aynı zamanda yeni iş modellerinin ortaya çıkmasına da zemin hazırladığı vurgulanmaktadır. Özellikle veri odaklı üretim, platform ekonomileri ve dijital hizmet modelleri, Endüstri 4.0 ile birlikte önem kazanmaktadır (Khan vd., 2021; Haseeb vd., 2019). Bu nedenle akıllı üretim sistemlerini yalnızca yenilikçilik, esneklik ve rekabet üstünlüğü çerçevesinde değerlendirmek eksik kalmaktadır. Akıllı fabrikalar ve onların ileri biçimi olan karanlık fabrikalar, üretim sürecinde karar alma yetkisinin insan emeğinden algoritmik sistemlere aktarılması anlamına da gelmektedir. Bu durum, verimlilik artışı kadar üretim sürecinin toplumsal denetimi, emek gücünün pazarlık kapasitesi ve işin niteliği bakımından da eleştirel bir değerlendirmeyi gerekli kılmaktadır.

Akıllı fabrikaların gelişimi, aynı zamanda karanlık fabrika modelinin ortaya çıkmasına zemin hazırlamıştır. Akıllı fabrikalarda insan-makine işbirliği söz konusu iken, karanlık fabrikalarda bu işbirliği minimum seviyeye indirilmektedir. Bu bağlamda karanlık fabrikalar, akıllı fabrikaların ileri bir evresi olarak değerlendirilmektedir (Düzdar & Kolçak, 2024; Wang vd., 2025). Akıllı fabrikaların sunduğu avantajlar arasında yüksek verimlilik, düşük maliyet, esneklik ve kalite artışı yer almaktadır. Ancak bu dönüşüm bazı riskleri de beraberinde getirmektedir. Özellikle siber güvenlik tehditleri, veri gizliliği sorunları ve teknolojik bağımlılık gibi konular, bu yeni üretim paradigmalarının en önemli dezavantajları arasında yer almaktadır (Gedik, 2021; Davies vd., 2017).

Sonuç olarak Endüstri 4.0 ve akıllı fabrikalar, üretim sistemlerinin geleceğini şekillendiren temel unsurlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu dönüşüm, yalnızca üretim süreçlerini değil, aynı zamanda ekonomik yapıları, işgücü piyasalarını ve toplumsal ilişkileri de derinden etkilemektedir. Bu bağlamda akıllı fabrikalar, karanlık fabrikalara giden sürecin kritik bir aşamasını temsil etmektedir.

KARANLIK FABRİKALAR: KAVRAM, TARİHÇE VE GELİŞİM

Karanlık fabrikalar (dark factories veya lights-out manufacturing), üretim süreçlerinin insan müdahalesine ihtiyaç duymadan tamamen otomasyon sistemleri tarafından yürütüldüğü üretim organizasyonlarını ifade etmektedir. Bu kavram, üretim ortamında insan varlığının ortadan kalkmasına bağlı olarak fiziksel üretim koşullarının da radikal biçimde yeniden tasarlanmasını gerektirmektedir. Işıklandırma, ısıtma, iş güvenliği

ve ergonomi gibi insan odaklı gereksinimlerin üretim sistemi tasarımından büyük ölçüde çıkarılması, karanlık fabrikaları geleneksel üretim modellerinden ayıran temel özelliklerden biridir (Düzdar & Kolçak, 2024; Wang vd., 2025).

Karanlık fabrika kavramı her ne kadar Endüstri 4.0 ile özdeşleşmiş olsa da kökenleri otomasyonun erken dönemlerine kadar uzanmaktadır. 1980’li yıllarda üretim süreçlerinde otomasyonun yaygınlaşmasıyla birlikte insan müdahalesinin minimize edildiği üretim sistemleri teorik olarak tartışılmaya başlanmıştır. Ancak bu dönemde teknolojik altyapının sınırlı olması nedeniyle bu yaklaşım pratikte uygulanabilir bir model olmaktan uzaktı. Bu nedenle karanlık fabrikalar uzun süre bir gelecek vizyonu olarak değerlendirilmiştir.

Bu vizyonun somutlaşması, siber-fiziksel sistemlerin gelişimi ve dijitalleşme süreçlerinin hız kazanması ile mümkün olmuştur. Siber-fiziksel sistemler, fiziksel üretim süreçleri ile dijital kontrol ve analiz mekanizmalarını bütünleştirerek üretim süreçlerinin gerçek zamanlı olarak izlenmesini ve yönetilmesini sağlamaktadır (Lee vd., 2015). Bu sistemler, sensörler aracılığıyla veri toplamakta, bu verileri analiz etmekte ve elde edilen sonuçlara göre otonom kararlar alabilmektedir. Bu bağlamda siber-fiziksel sistemler, karanlık fabrikaların teknolojik temelini oluşturmaktadır (Öztemel & Gürsev, 2018).

Karanlık fabrikaların gelişiminde nesnelerin interneti (IoT) kritik bir rol oynamaktadır. IoT sayesinde üretim sisteminde yer alan makineler, robotlar ve diğer cihazlar birbirleriyle sürekli iletişim halinde bulunmaktadır. Bu iletişim ağı, üretim süreçlerinin kesintisiz bir şekilde izlenmesini ve optimize edilmesini mümkün kılmaktadır (Vaddadi vd., 2020). Bu durum, üretim süreçlerinde insan müdahalesine olan ihtiyacı büyük ölçüde ortadan kaldırmaktadır.

Uluslararası literatürde karanlık fabrikalar, yalnızca bir otomasyon düzeyi olarak değil, aynı zamanda üretim sistemlerinin veri temelli ve otonom hale geldiği yeni bir paradigma olarak ele alınmaktadır. Bu paradigma, üretim süreçlerinin algoritmalar tarafından yönetildiği ve karar alma mekanizmalarının makine öğrenmesi ve yapay zekâ sistemlerine dayandığı bir yapıyı ifade etmektedir (Xu vd., 2018). Bu bağlamda karanlık fabrikalar, Endüstri 4.0’ın ulaştığı en ileri aşama olarak değerlendirilmektedir. Bu noktada karanlık fabrikaların “insansız fabrika”

söylemiyle özdeşleştirilmesi analitik açıdan yanıltıcı olabilir. Çünkü üretim sürecinde doğrudan emek kullanımının azalması, emeğin bütünüyle ortadan kalktığı anlamına gelmemektedir; aksine emek, üretim hattından bakım, yazılım, veri analizi, tasarım ve denetim gibi alanlara kaymaktadır. Dolayısıyla karanlık fabrikalar, emeğin yok oluşundan ziyade, emek biçimlerinin yeniden dağıtıldığı ve işgücünün hiyerarşik olarak ayrıştığı bir üretim modelidir. Bu tespit, çalışmanın iktisadi ve sosyal politika eksenini güçlendiren temel kavramsal dayanaklardan biridir.

Karanlık fabrikaların temel özelliklerinden biri, otonom karar alma mekanizmalarının varlığıdır. Geleneksel otomasyon sistemlerinde makineler önceden tanımlanmış komutlara göre çalışırken, karanlık fabrikalarda sistemler çevresel verileri analiz ederek kendi kararlarını verebilmektedir. Bu durum, üretim süreçlerinin daha esnek, adaptif ve öğrenilebilir hale gelmesini sağlamaktadır (Hermann vd., 2016; Lee vd., 2017).

Bir diğer önemli özellik ise üretim süreçlerinin kesintisiz olarak yürütülebilmesidir. İnsan faktörünün ortadan kalkması, vardiya sistemlerine olan ihtiyacı ortadan kaldırmakta ve üretim süreçlerinin 7/24 devam etmesini mümkün kılmaktadır. Bu durum, üretim verimliliğinde önemli artışlara yol açmakta ve işletmelerin üretim kapasitesini maksimize etmektedir (Gökten, 2018; Schönsleben vd., 2017).

Karanlık fabrikalar aynı zamanda hata oranlarının minimize edildiği üretim ortamları sunmaktadır. İnsan kaynaklı hataların ortadan kalkması, üretim kalitesinin artmasına katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, yapay zekâ destekli kalite kontrol sistemleri sayesinde üretim süreçleri anlık olarak izlenebilmekte ve hatalar hızlı bir şekilde tespit edilerek düzeltilebilmektedir (Öztemel & Gürsev, 2018; Chen vd., 2018).

Daha önce tanımlanan dijital ikiz teknolojisi, karanlık fabrikalarda devreye alma, süreç optimizasyonu ve bakım planlamasının üretim durdurulmadan sınanmasını sağlamaktadır. Böylece sanal ortamda elde edilen sonuçlar fiziksel sisteme aktarılabilen ve otonom üretimin güvenilirliği artırılabilir (Wichter vd., 2024; Mourtzis, 2023).

Karanlık fabrikaların tarihsel gelişimi incelendiğinde, bu modelin sanayi devrimlerinin evrimsel bir sonucu olduğu görülmektedir. Birinci sanayi devriminde mekanizasyon, ikinci sanayi devriminde elektrifikasyon,

üçüncü sanayi devriminde otomasyon ön plana çıkarken; dördüncü sanayi devriminde otonom ve akıllı sistemler üretim sürecinin merkezine yerleşmiştir (Uzgören, 2023; Lasi vd., 2014). Bu bağlamda karanlık fabrikalar, bu evrimsel sürecin doğal bir çıktısıdır.

Ancak karanlık fabrikalar yalnızca teknolojik bir ilerleme olarak değerlendirilmemelidir. Bu model aynı zamanda üretim ilişkilerinin yeniden tanımlanmasını gerektiren bir dönüşümü ifade etmektedir. Üretim sürecinde insan faktörünün ortadan kalkması, emek-sermaye ilişkisini köklü biçimde değiştirmekte ve klasik üretim teorilerinin yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır (Akben & Avşar, 2018; Moll, 2021). Bu nedenle karanlık fabrikalar, teknolojik determinizm çerçevesinde kaçınılmaz bir ilerleme aşaması olarak değil, üretim ilişkilerini ve bölüşüm mekanizmalarını dönüştüren tarihsel bir eğilim olarak ele alınmalıdır. Çalışmanın teorik çerçevesi de bu noktada, teknolojik dönüşümün nötr olmadığı; aksine sermaye birikimi, emek süreçlerinin denetimi ve toplumsal eşitsizlikler üzerinde farklılaştırıcı etkiler yarattığı varsayımına dayanmaktadır. Böyle bir yaklaşım, karanlık fabrikalar literatürünü teknik yenilik söyleminden çıkararak iktisat politikası ve sosyal teori düzlemine taşımaktadır.

Uluslararası literatürde bazı çalışmalar, karanlık fabrikaların tamamen insan dışı üretim sistemleri olarak kısa vadede yaygınlaşmasının sınırlı olabileceğini ileri sürmektedir. Özellikle sistem tasarımı, bakım ve kriz yönetimi gibi alanlarda insan faktörüne hâlâ ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle bazı araştırmacılar, karanlık fabrikaları tamamen insansız sistemler yerine “insan-minimum üretim sistemleri” olarak tanımlamaktadır (Öztemel & Gürsev, 2020). Bununla birlikte yapay zekâ, makine öğrenmesi ve otonom sistemlerdeki gelişmeler, bu sınırlamaların zamanla ortadan kalkabileceğini göstermektedir. Özellikle öğrenen sistemlerin gelişimi, üretim süreçlerinin kendi kendini optimize edebilmesini mümkün kılmaktadır. Bu durum, karanlık fabrikaların gelecekte daha yaygın hale geleceğine işaret etmektedir (Wichter vd., 2024; Khan vd., 2021).

Sonuç olarak karanlık fabrikalar, yalnızca bir üretim modeli değil, aynı zamanda üretim süreçlerinin dijitalleşmesinin ulaştığı en ileri aşamayı temsil eden bir paradigma olarak değerlendirilmektedir. Bu modelin gelişimi, teknolojik ilerlemelerin yanı sıra ekonomik, sosyal ve politik dinamiklerle de yakından ilişkilidir. Bu nedenle karanlık fabrikaların

anlaşılması, yalnızca mühendislik perspektifiyle değil, aynı zamanda sosyal bilimler perspektifiyle de ele alınmasını gerektirmektedir.

KARANLIK FABRİKALARDA ÜRETİM SİSTEMLERİ

Karanlık fabrikalarda üretim sistemleri, geleneksel üretim modellerinden radikal biçimde farklılaşarak tamamen otonom, veri odaklı ve birbirine entegre sistemler üzerine kurulmaktadır. Bu üretim yapısı, insan müdahalesinin minimuma indirildiği, makinelerin kendi aralarında iletişim kurarak üretim süreçlerini yönettiği bir organizasyonu ifade etmektedir. Bu bağlamda karanlık fabrikalar, yalnızca otomasyonun ileri bir aşaması değil, aynı zamanda üretim sistemlerinin yeniden tasarlandığı bütüncül bir mimariyi temsil etmektedir (Lee vd., 2015; Wang vd., 2025).

Karanlık fabrika üretim sistemlerinin temelini siber-fiziksel sistemler (CPS) oluşturmaktadır. CPS, fiziksel üretim süreçleri ile dijital kontrol ve analiz sistemlerinin entegre edildiği yapılar olarak tanımlanmaktadır. Bu sistemler, sensörler aracılığıyla üretim ortamından veri toplamakta, bu verileri analiz etmekte ve elde edilen sonuçlara göre üretim süreçlerini otonom şekilde yönetmektedir (Lee vd., 2015; Öztemel & Gürsev, 2020). Bu bağlamda CPS, karanlık fabrikaların “sinir sistemi” olarak değerlendirilebilir. Bu üretim modelinde nesnelerin interneti (IoT), tüm üretim bileşenlerinin birbirine bağlanmasını sağlayan temel teknolojidir. IoT sayesinde üretim hattında yer alan makineler, robotlar, taşıma sistemleri ve depolama birimleri sürekli veri alışverişinde bulunarak üretim sürecinin bütünsel bir şekilde yönetilmesini sağlamaktadır (Vaddadi vd., 2020). Bu durum, üretim süreçlerinin yalnızca otomatik değil, aynı zamanda koordineli ve senkronize bir şekilde ilerlemesine olanak tanımaktadır.

Üretim sistemlerinin bu derece dijitalleşmesi, yalnızca teknik süreçleri değil, üretim maliyetlerinin bileşimini ve firma davranışlarını da dönüştürmektedir. Emek maliyetlerinin görece payı azalırken, başlangıç yatırım maliyetleri, yazılım altyapısı ve veri yönetimi kapasitesi firmalar arası rekabetin yeni belirleyicileri haline gelmektedir. Bu durum, karanlık fabrikaların neden yalnızca mühendislik meselesi olarak değil, aynı zamanda firma düzeyinde stratejik kararları ve sektör yapısını etkileyen bir iktisadi dönüşüm olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Karanlık fabrikalarda üretim sistemlerinin bir diğer önemli bileşeni büyük veri analitiği ve yapay zekâ teknolojileridir. Üretim süreçlerinden elde edilen büyük veri setleri, makine öğrenmesi algoritmaları aracılığıyla

analiz edilmekte ve bu analizler üretim süreçlerinin optimize edilmesinde kullanılmaktadır. Özellikle öngörücü bakım (predictive maintenance) uygulamaları sayesinde ekipman arızaları önceden tespit edilmekte ve üretim kesintileri minimize edilmektedir (Lu, 2017; Chen vd., 2018).

Bu sistemlerde karar alma mekanizmaları büyük ölçüde algoritmik yapılar tarafından yürütülmektedir. Geleneksel üretim sistemlerinde kararlar insan operatörler tarafından alınırken, karanlık fabrikalarda bu süreçler yapay zekâ destekli sistemler tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu durum, üretim süreçlerinin daha hızlı, daha doğru ve daha verimli bir şekilde yönetilmesini sağlamaktadır (Lee vd., 2017).

Karanlık fabrikalarda üretim sistemlerinin bir diğer önemli özelliği, merkeziyetsiz yapılarıdır. Geleneksel üretim sistemlerinde merkezi bir kontrol mekanizması bulunurken, karanlık fabrikalarda üretim birimleri kendi aralarında iletişim kurarak otonom kararlar alabilmektedir. Bu yaklaşım, sistemin esnekliğini artırmakta ve üretim süreçlerinin daha hızlı adapte olmasını sağlamaktadır (Hermann vd., 2016).

Karanlık fabrika üretim mimarisinde dijital ikiz, makinelerden gelen verileri bütünleştirerek üretim hattının güncel durumunu izleyen ve alternatif kararların sonuçlarını önceden sınavan bir koordinasyon katmanı olarak kullanılmaktadır. Bu kullanım, kavramın önceki bölümde verilen tanımının üretim sistemi düzeyindeki somut karşılığını oluşturmaktadır.

Karanlık fabrikalarda üretim süreçleri genellikle modüler ve esnek üretim sistemleri üzerine kuruludur. Bu sistemler, farklı ürünlerin üretimine hızlı bir şekilde adapte olabilmekte ve üretim hatlarının yeniden yapılandırılmasını mümkün kılmaktadır. Bu durum, kitlesel kişiselleştirme (mass customization) taleplerine cevap verilmesini sağlamaktadır (Xu vd., 2018).

Otonom robot sistemleri, karanlık fabrikaların üretim süreçlerinde merkezi bir rol oynamaktadır. Bu robotlar, yalnızca belirli görevleri yerine getiren mekanik sistemler olmaktan çıkmış, öğrenme ve adaptasyon yeteneğine sahip akıllı sistemler haline gelmiştir. Bu sayede üretim süreçleri daha esnek ve dinamik bir yapıya kavuşmaktadır (Chen vd., 2018).

Karanlık fabrikalarda üretim sistemleri, tedarik zinciri ile entegre bir şekilde çalışmaktadır. Bu entegrasyon sayesinde üretim süreçleri yalnızca

fabrika içi operasyonlarla sınırlı kalmamakta, aynı zamanda tedarikçiler ve dağıtım kanalları ile de senkronize bir şekilde yürütülmektedir. Bu durum, üretim süreçlerinin daha etkin ve verimli bir şekilde yönetilmesini sağlamaktadır (Khan vd., 2021). Bu üretim modelinde enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik de önemli bir yer tutmaktadır. Otonom sistemler, enerji kullanımını optimize ederek üretim süreçlerinin daha çevreci hale gelmesine katkı sağlamaktadır. Bu bağlamda karanlık fabrikalar, sürdürülebilir üretim modellerinin önemli bir bileşeni olarak değerlendirilmektedir (Fritzsche vd., 2018).

Bununla birlikte teknik entegrasyonun artması, üretim sistemlerini yalnızca daha verimli değil, aynı zamanda daha bağımlı ve kırılgan hale de getirebilir. Veri güvenliği, yazılım bağımlılığı, yüksek yatırım maliyetleri ve teknolojiye erişimdeki eşitsizlikler, karanlık fabrikaların yaygınlaşmasını sınırlayan önemli yapısal faktörlerdir. Bu nedenle karanlık fabrika modeli, her sektör ve her ülke için eşit derecede uygulanabilir bir çözüm olarak görülmemeli; sektör yapısı, sermaye kapasitesi ve işgücü niteliği dikkate alınarak değerlendirilmelidir.

Ancak bu sistemlerin uygulanması bazı teknik ve organizasyonel zorlukları da beraberinde getirmektedir. Özellikle sistem entegrasyonu, veri güvenliği, siber saldırılar ve yüksek yatırım maliyetleri, karanlık fabrikaların yaygınlaşmasının önündeki en önemli engeller arasında yer almaktadır (Davies vd., 2017). Bununla birlikte, teknolojik gelişmelerin hızla ilerlemesi bu zorlukların zamanla aşılabileceğini göstermektedir. Özellikle yapay zekâ ve veri analitiği alanındaki gelişmeler, üretim sistemlerinin daha otonom ve güvenilir hale gelmesine katkı sağlamaktadır (Haseeb vd., 2019). Sonuç olarak karanlık fabrikalarda üretim sistemleri, siber-fiziksel sistemler, IoT, yapay zekâ, büyük veri ve dijital ikiz teknolojilerinin entegrasyonu ile şekillenen, tamamen otonom ve veri odaklı bir üretim modelini temsil etmektedir. Bu sistemler, üretim süreçlerinin verimliliğini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda üretim paradigmasını köklü biçimde dönüştürmektedir.

EKONOMİK BOYUT: MALİYET, VERİMLİLİK VE REKABET

Karanlık fabrikalar, üretim sistemlerinde yalnızca teknolojik bir dönüşümü değil, aynı zamanda ekonomik yapıların yeniden şekillenmesini de beraberinde getirmektedir. Bu üretim modeli, maliyet yapılarından verimlilik dinamiklerine, rekabet stratejilerinden küresel değer zincirlerine

kadar geniş bir yelpazede etkiler yaratmaktadır. Bu bağlamda karanlık fabrikalar, Endüstri 4.0'ın ekonomik boyutunun en somut yansımalarından biri olarak değerlendirilmektedir (Xu vd., 2018; Haseeb vd., 2019).

Karanlık fabrikaların en belirgin ekonomik etkilerinden biri maliyet yapılarındaki dönüşümdür. Geleneksel üretim sistemlerinde işçilik maliyetleri toplam üretim maliyetlerinin önemli bir bölümünü oluştururken, karanlık fabrikalarda bu maliyet kalemi büyük ölçüde ortadan kalkmaktadır. Bunun yerine sermaye yoğun bir üretim yapısı ortaya çıkmakta ve sabit maliyetlerin payı artmaktadır (Gökten, 2018). Bu durum, üretim sistemlerinin maliyet yapısını köklü biçimde değiştirmektedir.

Burada kritik mesele, maliyetlerin sadece azalması değil, bileşiminin değişmesidir. Karanlık fabrikalarda değişken maliyetlerin bir kısmı azalırken, sabit sermaye yatırımlarının ve teknolojik bağımlılıkların payı artmaktadır. Bu durum, büyük ölçekli firmalara rekabet avantajı sağlayarak piyasa yoğunlaşmasını hızlandırabilir. Dolayısıyla verimlilik artışı ile piyasa gücünün merkezileşmesi arasındaki ilişki, karanlık fabrikaların ekonomik etkilerini değerlendirirken dikkate alınması gereken temel bir boyuttur.

Bu dönüşüm, faaliyet tabanlı maliyetleme yaklaşımlarının önemini artırmaktadır. Karanlık fabrikalarda üretim süreçlerinin dijitalleşmesi, maliyetlerin daha detaylı bir şekilde izlenmesine ve analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Bu sayede işletmeler, maliyet kontrolünü daha etkin bir şekilde gerçekleştirebilmekte ve stratejik kararlarını daha sağlıklı verilere dayandırabilmektedir (Gökten, 2018; Schönsleben vd., 2017).

Karanlık fabrikalar aynı zamanda üretim verimliliğinde önemli artışlar sağlamaktadır. İnsan faktörünün ortadan kalkması, üretim süreçlerinde hata oranlarını azaltmakta ve üretim sürekliliğini artırmaktadır. 7/24 kesintisiz üretim imkânı, işletmelerin üretim kapasitesini maksimize etmektedir. Bu durum, birim maliyetlerin düşmesine ve üretim verimliliğinin artmasına katkı sağlamaktadır (Chen vd., 2018; Wang vd., 2025).

Büyük veri analitiği ve yapay zekâ teknolojilerinin kullanımı, üretim süreçlerinin optimize edilmesini mümkün kılmaktadır. Bu teknolojiler sayesinde üretim süreçleri sürekli olarak izlenmekte ve iyileştirilmektedir. Özellikle öngörücü bakım uygulamaları, ekipman arızalarının önceden tespit edilmesini sağlayarak üretim kesintilerini minimize etmektedir (Lu,

2017). Bu durum, üretim süreçlerinin daha verimli ve sürdürülebilir hale gelmesine katkı sağlamaktadır.

Karanlık fabrikaların ekonomik boyutunda dikkat çeken bir diğer unsur, ölçek ekonomilerinin yeniden tanımlanmasıdır. Geleneksel üretim sistemlerinde büyük ölçekli üretim maliyet avantajı sağlarken, karanlık fabrikalarda esnek üretim sistemleri sayesinde küçük ölçekli üretim de ekonomik hale gelebilmektedir. Bu durum, kitlesel kişiselleştirme (mass customization) kavramının yaygınlaşmasını desteklemektedir (Xu vd., 2018).

Küresel rekabet açısından bakıldığında, karanlık fabrikalar işletmelere önemli avantajlar sağlamaktadır. Daha düşük maliyet, daha yüksek kalite ve daha hızlı üretim, işletmelerin uluslararası pazarlarda rekabet gücünü artırmaktadır. Bu durum, özellikle gelişmiş ülkelerde üretimin yeniden yerleşmesi (reshoring) eğilimini güçlendirmektedir (Chen vd., 2024).

Karanlık fabrikalar, aynı zamanda küresel değer zincirlerinin yapısını da değiştirmektedir. Dijitalleşme ve otomasyon sayesinde üretim süreçleri daha esnek hale gelmekte ve coğrafi bağımlılık azalmaktadır. Bu durum, üretimin daha stratejik bir şekilde konumlandırılmasına olanak tanımaktadır (Khan vd., 2021). Bununla birlikte, karanlık fabrikaların yaygınlaşması ekonomik eşitsizlikleri artırma potansiyeline de sahiptir. Sermaye yoğun üretim yapısı, büyük ölçekli işletmelerin avantajını artırırken, küçük ve orta ölçekli işletmelerin rekabet gücünü zayıflatabilmektedir. Bu durum, piyasa yapısında yoğunlaşmaya ve ekonomik güç dengesinin değişmesine yol açabilmektedir (Haseeb vd., 2019).

Karanlık fabrikaların ekonomik etkileri yalnızca işletmelerle sınırlı değildir; aynı zamanda makroekonomik düzeyde de önemli sonuçlar doğurmaktadır. Üretim süreçlerinin otomasyonu, verimlilik artışı yoluyla ekonomik büyümeyi destekleyebilirken, işgücü talebindeki azalma gelir dağılımını olumsuz etkileyebilir. Bu durum, ekonomik büyüme ile refah arasındaki ilişkinin yeniden değerlendirilmesini gerektirmektedir (Autor, 2015). Bu bağlamda karanlık fabrikalar, üretim ekonomisinin temel varsayımlarını yeniden tartışmaya açmaktadır. Emek yoğun üretimden sermaye ve teknoloji yoğun üretime geçiş, klasik ekonomik modellerin sınırlarını zorlamakta ve yeni teorik yaklaşımların geliştirilmesini gerekli kılmaktadır (Moll, 2021).

Enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik açısından değerlendirildiğinde, karanlık fabrikalar önemli avantajlar sunmaktadır. Otonom sistemler, enerji kullanımını optimize ederek üretim süreçlerinin daha çevreci hale gelmesini sağlamaktadır. Bu durum, sürdürülebilir üretim modellerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (Fritzsche vd., 2018). Ancak bu sistemlerin yüksek başlangıç maliyetleri, özellikle gelişmekte olan ülkeler için önemli bir engel teşkil etmektedir. Karanlık fabrikaların kurulumu için gerekli olan teknolojik altyapı ve yatırım maliyetleri, bu dönüşümün yaygınlaşmasını sınırlayabilmektedir (Davies vd., 2017).

Sonuç olarak karanlık fabrikalar, üretim süreçlerinde maliyet yapılarından rekabet dinamiklerine kadar geniş kapsamlı ekonomik dönüşümler yaratmaktadır. Bu model, işletmeler için önemli avantajlar sunmakla birlikte, ekonomik eşitsizlikler ve piyasa yapısındaki değişimler gibi önemli riskleri de beraberinde getirmektedir. Bu nedenle karanlık fabrikaların ekonomik boyutunun çok yönlü bir perspektifle ele alınması gerekmektedir.

Bu çerçevede karanlık fabrikalar, yalnızca firma verimliliğini artıran bir yenilik değil, aynı zamanda kapitalist rekabetin yapısını dönüştüren bir mekanizma olarak değerlendirilebilir. Daha yüksek otomasyon düzeyine sahip firmalar ölçek, hız ve kalite bakımından avantaj sağlarken, daha düşük teknoloji kapasitesine sahip işletmelerin piyasa dışına itilme riski artmaktadır. Bu nedenle karanlık fabrikalar, üretim ekonomisinde verimlilik ile yoğunlaşma arasındaki gerilimi görünür kılan yeni bir aşamayı temsil etmektedir.

İŞGÜCÜ VE SOSYAL ETKİLER

Karanlık fabrikalar, yalnızca üretim süreçlerinin otomasyonunu ifade eden teknik bir dönüşüm değil, aynı zamanda kapitalist üretim ilişkilerinin yeniden yapılandığı tarihsel bir kırılma noktası olarak değerlendirilmektedir. Bu bağlamda söz konusu üretim modeli, emeğin üretim sürecindeki konumunu, değer üretim mekanizmalarını ve sermaye birikim süreçlerini köklü biçimde dönüştürmektedir. Endüstri 4.0 ile birlikte ortaya çıkan bu yeni üretim rejimi, klasik sanayi kapitalizminin ötesine geçen ve dijital kapitalizm olarak tanımlanabilecek bir yapıyı işaret etmektedir (Schwab, 2016; Xu vd., 2018).

Bu bölümde benimsenen yaklaşım, teknolojik dönüşümün emek üzerindeki etkilerini nötr ve kendiliğinden ilerleyen bir süreç olarak değil,

sermaye birikimi mantığı içinde şekillenen tarihsel bir yeniden yapılanma olarak değerlendirmektedir. Bu nedenle karanlık fabrikalar, sadece işlerin otomasyona devriyle açıklanamaz; aynı zamanda emeğin pazarlık gücünün zayıflaması, işin parçalanması ve nitelik temelli ayrışmanın derinleşmesi bağlamında okunmalıdır. Böyle bir çerçeve, karanlık fabrikaları yalnızca “geleceğin üretimi” olarak değil, emek rejiminin yeniden kuruluşu olarak analiz etmeyi mümkün kılmaktadır.

Marxist perspektiften bakıldığında, üretim araçlarının gelişimi ile üretim ilişkileri arasındaki çelişki tarihsel dönüşümlerin temel dinamiğini oluşturmaktadır. Marx’ın emek-değer teorisine göre, değer kaynağı insan emeğidir; ancak karanlık fabrikalarda üretim sürecinin büyük ölçüde emekten bağımsız hale gelmesi, bu teorik çerçevenin yeniden tartışılmasını gerektirmektedir. Üretim sürecinde emeğin rolünün azalması, artı-değer üretiminin nasıl gerçekleştiği sorusunu gündeme getirmektedir (Moll, 2021).

Bu bağlamda karanlık fabrikalar, emeğin üretim sürecinden dışlanması anlamına gelmemekte, aksine emeğin farklı bir biçimde yeniden konumlandırılmasını ifade etmektedir. Emeğin fiziksel üretim süreçlerinden çekilmesi, onun tamamen ortadan kalktığı anlamına gelmemekte; aksine emek, veri üretimi, sistem yönetimi ve algoritmik denetim gibi yeni alanlara kaymaktadır. Bu durum, emeğin niteliğinde köklü bir dönüşümü beraberinde getirmektedir (Oosthuizen, 2022).

Endüstri 4.0 ile birlikte ortaya çıkan bu dönüşüm, işgücü piyasasında kutuplaşma eğilimlerini güçlendirmektedir. Yüksek beceri gerektiren işlere olan talep artarken, düşük ve orta beceri gerektiren işler otomasyon tarafından ikame edilmektedir. Bu durum, işgücü piyasasında “orta sınıfın erozyonu” olarak tanımlanan bir süreci tetiklemektedir (Autor, 2015). Karanlık fabrikalar, bu sürecin en ileri aşamasını temsil etmektedir.

Frey ve Osborne (2017) tarafından yapılan ampirik çalışmalar, otomasyonun işgücü üzerindeki etkilerini nicel olarak ortaya koymaktadır. Araştırmaya göre mevcut mesleklerin önemli bir kısmı otomasyon riski altındadır ve bu risk özellikle rutin ve tekrarlayan işlerde yoğunlaşmaktadır. Karanlık fabrikaların yaygınlaşması, bu süreci hızlandırarak işgücü piyasasında yapısal işsizliğin artmasına yol açmaktadır. Bununla birlikte literatürde otomasyonun istihdam üzerindeki etkilerine ilişkin tek yönlü bir uzlaşma bulunmamaktadır. Bir yaklaşım teknolojik dönüşümün kitlesel işsizliğe

yol açacağını savunurken, diğer yaklaşım yeni meslekler ve yeni beceri alanları yaratılacağını ileri sürmektedir. Bu çalışma, iki yaklaşımı uzlaştıran bir pozisyon benimsemekte; karanlık fabrikaların toplam işin tamamen ortadan kalkmasından çok, işgücü piyasasında kutuplaşma, geçiş maliyetleri ve bölüşüm adaletsizliği yarattığını savunmaktadır.

Ancak teknolojik dönüşümlerin işgücü üzerindeki etkileri yalnızca olumsuz değildir. Autor (2015), teknolojinin bazı iş türlerini ortadan kaldırırken, aynı zamanda yeni iş alanları da yarattığını vurgulamaktadır. Bu bağlamda Endüstri 4.0, bir yandan iş kayıplarına yol açarken, diğer yandan yeni mesleklerin ortaya çıkmasına zemin hazırlamaktadır. Ancak bu yeni işlerin gerektirdiği beceriler ile mevcut işgücünün sahip olduğu beceriler arasındaki uyumsuzluk, önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır.

Karanlık fabrikalar, işgücü piyasasında yalnızca niceliksel değil, aynı zamanda niteliksel dönüşümlere de yol açmaktadır. Üretim sürecinde fiziksel emeğin yerini bilişsel emek almakta; veri analizi, yazılım geliştirme ve sistem yönetimi gibi alanlar ön plana çıkmaktadır. Bu durum, eğitim sistemlerinin de yeniden yapılandırılmasını gerektirmektedir (Çakır, 2018).

Bu dönüşüm, aynı zamanda işin doğasını da değiştirmektedir. Geleneksel üretim sistemlerinde iş, belirli bir mekâna ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilirken, dijitalleşme ile birlikte iş daha esnek ve mekândan bağımsız hale gelmektedir. Bu durum, çalışma ilişkilerinin yeniden tanımlanmasını gerektirmektedir (Kolade & Owoseni, 2022).

Karanlık fabrikaların yaygınlaşması, gelir dağılımı üzerinde de önemli etkiler yaratmaktadır. Sermaye sahipleri, üretim süreçlerinin otomasyonu sayesinde daha yüksek kâr elde ederken, emek gelirlerinin toplam gelir içindeki payı azalmaktadır. Bu durum, gelir eşitsizliğinin artmasına yol açmaktadır (Haseeb vd., 2019). Bu bağlamda sosyal politika araçlarının yeniden tasarlanması gerekmektedir. Özellikle robotların vergilendirilmesi, evrensel temel gelir uygulamaları ve aktif işgücü politikaları gibi araçlar literatürde tartışılmaya başlanmıştır (Civriz & Taşkın, 2022). Bu politikalar, teknolojik dönüşümün olumsuz sosyal etkilerini azaltmayı amaçlamaktadır.

Karanlık fabrikalar, aynı zamanda iş güvencesi kavramını da yeniden şekillendirmektedir. Otomasyonun artması, iş güvencesini zayıflatmakta ve

çalışanlar üzerinde belirsizlik yaratmaktadır. Bu durum, çalışma hayatında güvencesizliğin artmasına yol açmaktadır (Lingmont & Alexiou, 2020). Uluslararası literatürde Endüstri 4.0'ın işgücü üzerindeki etkileri iki temel yaklaşım çerçevesinde ele alınmaktadır. Birinci yaklaşım, teknolojik dönüşümün işsizliği artıracağını savunurken; ikinci yaklaşım, bu dönüşümün yeni iş alanları yaratacağını ileri sürmektedir. Karanlık fabrikalar, bu iki yaklaşım arasındaki tartışmanın merkezinde yer almaktadır (Grenčíková vd., 2020). Bu bağlamda karanlık fabrikalar, yalnızca üretim sistemlerinin değil, aynı zamanda toplumsal yapının da dönüşümünü ifade etmektedir. İşgücü piyasalarının yeniden şekillenmesi, gelir dağılımındaki değişimler ve sosyal politika ihtiyaçları, bu dönüşümün en önemli sonuçları arasında yer almaktadır.

Sonuç olarak karanlık fabrikalar, emeğin üretim sürecindeki rolünü köklü biçimde dönüştüren ve kapitalist üretim ilişkilerini yeniden tanımlayan bir paradigma olarak değerlendirilmektedir. Bu dönüşüm, yalnızca ekonomik değil, aynı zamanda sosyal ve politik boyutları olan çok yönlü bir süreçtir. Bu nedenle karanlık fabrikaların işgücü üzerindeki etkilerinin çok boyutlu bir perspektifle ele alınması gerekmektedir.

SOSYAL POLİTİKA VE DEVLETİN ROLÜ

Karanlık fabrikalar ve Endüstri 4.0 süreci, yalnızca üretim sistemlerini değil, aynı zamanda devletin ekonomi içindeki rolünü ve sosyal politika araçlarını da köklü biçimde yeniden tanımlamaktadır. Bu dönüşüm, refah devleti modelinin sürdürülebilirliği, gelir dağılımı mekanizmaları ve sosyal güvenlik sistemlerinin geleceği açısından yeni tartışma alanları yaratmaktadır. Bu bağlamda karanlık fabrikalar, teknolojik bir paradigma olmanın ötesinde, devlet-toplum ilişkilerini yeniden şekillendiren bir dönüşüm sürecini ifade etmektedir (Vandenberg, 2020; Kolade & Owoseni, 2022).

Karanlık fabrikalar bağlamında sosyal politika tartışmasının merkezinde, üretimden elde edilen kazançların toplumsal olarak nasıl bölüşüleceği sorusu yer almaktadır. Eğer teknolojik dönüşüm verimlilik artışı yaratırken istihdamı daraltıyor ve ücret gelirlerinin toplam gelir içindeki payını azaltıyorsa, devletin rolü yalnızca uyum politikaları geliştirmek değil, aynı zamanda bölüşüm rejimini yeniden düzenlemek haline gelir. Bu nedenle sosyal politika, karanlık fabrikaların ikincil bir sonucu değil, bizzat merkezi tartışma alanlarından biridir.

Endüstri 4.0 ile birlikte üretim süreçlerinde otomasyonun artması, emek gelirlerinin toplam gelir içindeki payının azalmasına yol açmaktadır. Bu durum, klasik refah devleti modelinin finansman temellerini zayıflatmaktadır. Çünkü mevcut sosyal güvenlik sistemleri büyük ölçüde ücretli emek üzerinden alınan vergilere dayanmaktadır. Karanlık fabrikaların yaygınlaşmasıyla birlikte işgücü talebinin azalması, bu sistemlerin sürdürülebilirliğini sorgulanır hale getirmektedir (Haseeb vd., 2019).

Bu bağlamda literatürde öne çıkan en önemli tartışmalardan biri “robot vergisi” (robot tax) önerisidir. Robotların üretim süreçlerinde insan emeğinin yerini alması durumunda, bu teknolojilerin vergilendirilmesi gerektiği ileri sürülmektedir. Bu yaklaşım hem gelir kaybını telafi etmeyi hem de teknolojik işsizliğin sosyal etkilerini azaltmayı amaçlamaktadır (Civriz & Taşkın, 2022). Ancak robot vergisinin uygulanabilirliği ve ekonomik etkileri konusunda literatürde önemli görüş ayrılıkları bulunmaktadır.

Ancak robot vergisi tek başına yeterli bir çözüm olarak görülemez. Çünkü mesele yalnızca kaybedilen vergi gelirlerinin telafisi değil, aynı zamanda teknolojik dönüşümün yarattığı eşitsizliklerin hangi politika bileşimiyle yönetileceğidir. Bu nedenle yeniden beceri kazandırma programları, aktif işgücü politikaları, gelir desteği mekanizmaları ve eğitim yatırımları birlikte düşünülmelidir. Sosyal politika araçlarının başarısı, karanlık fabrikaların ekonomik faydalarını toplumsal meşruiyetle buluşturabilme kapasitesine bağlıdır.

Robot vergisine yönelik eleştiriler, bu tür bir politikanın inovasyonu yavaşlatabileceği ve teknolojik gelişmeleri engelleyebileceği yönündedir. Özellikle sermaye üzerindeki vergi yükünün artması, firmaların yatırım kararlarını olumsuz etkileyebilir ve rekabet gücünü zayıflatabilir. Bu nedenle bazı araştırmacılar, robot vergisinin uzun vadede ekonomik büyümeyi olumsuz etkileyebileceğini savunmaktadır (Schönsleben vd., 2017). Buna karşılık alternatif bir yaklaşım olarak evrensel temel gelir (universal basic income) önerisi ön plana çıkmaktadır. Bu yaklaşım, bireylere koşulsuz ve düzenli bir gelir sağlanmasını öngörmektedir. Karanlık fabrikalar ile birlikte işgücü talebinin azalması durumunda, bu tür bir politika refahın korunması açısından önemli bir araç olarak değerlendirilmektedir (Autor, 2015).

Evrensel temel gelir uygulamalarına yönelik tartışmalar, bu politikanın hem ekonomik hem de sosyal etkileri üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu yaklaşımın savunucuları, temel gelirin yoksulluğu azaltacağını ve bireylerin daha yaratıcı ve üretken faaliyetlere yönelmesini sağlayacağını ileri sürmektedir. Ancak eleştirmenler, bu tür bir politikanın maliyetinin yüksek olacağını ve çalışma motivasyonunu azaltabileceğini savunmaktadır (Kolade & Owoseni, 2022).

Karanlık fabrikalar, aynı zamanda eğitim ve işgücü politikalarının yeniden yapılandırılmasını gerektirmektedir. Geleneksel eğitim sistemleri, Endüstri 4.0'ın gerektirdiği becerileri kazandırmakta yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle yaşam boyu öğrenme (lifelong learning) ve sürekli beceri geliştirme politikaları önem kazanmaktadır (Oosthuizen, 2022).

Bu dönüşüm süreci, devletin ekonomik düzenleyici rolünü de yeniden tanımlamaktadır. Devlet, yalnızca piyasayı düzenleyen bir aktör olmaktan çıkmakta, aynı zamanda teknolojik dönüşümü yönlendiren ve sosyal etkilerini dengeleyen bir aktör haline gelmektedir. Bu bağlamda sanayi politikaları, dijital dönüşüm stratejileri ve inovasyon politikaları daha önemli hale gelmektedir (Kagermann vd., 2013).

Karanlık fabrikaların yaygınlaşması, aynı zamanda küresel eşitsizlikleri de derinleştirme potansiyeline sahiptir. Gelişmiş ülkeler teknolojik altyapı ve sermaye birikimi açısından avantajlı konumda bulunurken, gelişmekte olan ülkeler bu dönüşüme uyum sağlamakta zorlanabilmektedir. Bu durum, küresel ekonomik sistemde yeni eşitsizliklerin ortaya çıkmasına yol açabilir (Khan vd., 2021). Bu bağlamda sosyal politika araçlarının yalnızca ulusal düzeyde değil, aynı zamanda uluslararası düzeyde de yeniden ele alınması gerekmektedir. Küresel işgücü piyasalarının dönüşümü, uluslararası işbirliği ve koordinasyonu zorunlu kılmaktadır.

Karanlık fabrikalar, aynı zamanda sosyal adalet kavramının yeniden tartışılmasını gerektirmektedir. Üretim süreçlerinde insan emeğinin azalması, bireylerin ekonomik sistem içindeki rolünü sorgulanır hale getirmektedir. Bu durum, emeğin değeri, gelir dağılımı ve toplumsal refah gibi kavramların yeniden tanımlanmasını gerektirmektedir (Moll, 2021). Bu dönüşüm sürecinde devletin rolü, yalnızca ekonomik düzenleme ile sınırlı kalmamakta, aynı zamanda toplumsal uyumu sağlamak ve sosyal riskleri yönetmek açısından da kritik hale gelmektedir. Bu bağlamda sosyal politika, teknolojik dönüşümün ayrılmaz bir parçası olarak

değerlendirilmelidir. Sonuç olarak karanlık fabrikalar ve Endüstri 4.0 süreci, refah devleti modelinin yeniden yapılandırılmasını gerektiren çok boyutlu bir dönüşümü ifade etmektedir. Bu süreçte devletin rolü, teknolojik gelişmeleri teşvik etmek ile sosyal adaleti sağlamak arasında denge kurmak olmalıdır. Bu dengenin sağlanması, sürdürülebilir bir ekonomik ve toplumsal yapı için kritik öneme sahiptir.

Bu bağlamda devletin rolü, teknolojik dönüşüme dışsal bir düzenleyici olmaktan çok, dönüşümün toplumsal sonuçlarını yöneten ve bölüşüm çatışmalarını dengeleyen kurumsal bir aktör olarak yeniden düşünülmelidir. Karanlık fabrikalar çağında sosyal politika, yalnızca koruyucu bir araç değil; ekonomik dönüşümün sürdürülebilirliğini sağlayan kurucu bir mekanizma niteliği taşımaktadır.

Dünyada ve Türkiye’de Karanlık Fabrika Uygulamaları

Karanlık fabrikalar, Endüstri 4.0’ın en ileri üretim modeli olarak dünya genelinde özellikle gelişmiş sanayi ülkelerinde uygulama alanı bulmaya başlamıştır. Bu model, yüksek teknoloji altyapısı, sermaye yoğun üretim yapısı ve gelişmiş dijital ekosistem gerektirdiği için, öncelikle Almanya, Japonya, ABD ve Güney Kore gibi ülkelerde yaygınlaşmaktadır. Bu ülkeler, hem teknolojik inovasyon kapasitesi hem de sanayi politikaları açısından bu dönüşüme öncülük etmektedir (Kagermann vd., 2013; Xu vd., 2018).

Almanya, Endüstri 4.0 kavramının doğduğu ülke olarak karanlık fabrika uygulamalarında öncü bir konuma sahiptir. Alman sanayi politikaları, üretim süreçlerinin dijitalleşmesini teşvik etmekte ve akıllı fabrikaların yaygınlaşmasını desteklemektedir. Özellikle otomotiv ve makine sektörlerinde, üretim süreçlerinin büyük ölçüde otomasyon sistemleri ile yürütüldüğü tesisler dikkat çekmektedir. Bu bağlamda Almanya, karanlık fabrikaların sistematik bir şekilde uygulanabildiği örneklerden biridir (Kagermann vd., 2013).

Japonya ise robot teknolojilerindeki üstünlüğü sayesinde karanlık fabrika uygulamalarında önemli bir avantaja sahiptir. Japon firmaları, üretim süreçlerinde robot kullanımını uzun yıllardır benimsemekte ve bu alanda sürekli inovasyon gerçekleştirmektedir. Bu durum, Japonya’nın karanlık fabrika modeline geçiş sürecini hızlandırmaktadır. Özellikle elektronik ve otomotiv sektörlerinde, yüksek otomasyon seviyesine sahip üretim tesisleri dikkat çekmektedir (Schwab, 2016).

Amerika Birleşik Devletleri, dijital teknolojiler ve yazılım altyapısı açısından güçlü bir konuma sahip olması nedeniyle karanlık fabrikaların gelişiminde önemli bir rol oynamaktadır. ABD’de özellikle büyük teknoloji şirketleri, yapay zekâ ve veri analitiği teknolojilerini üretim süreçlerine entegre ederek otonom üretim sistemleri geliştirmektedir. Bu durum, üretim süreçlerinin daha verimli ve esnek hale gelmesine katkı sağlamaktadır (Chen vd., 2018).

Güney Kore ve Çin gibi Asya ülkeleri de karanlık fabrika uygulamalarında hızlı bir gelişim göstermektedir. Bu ülkeler, devlet destekli sanayi politikaları ve yüksek teknoloji yatırımları sayesinde üretim süreçlerini hızla dijitalleştirmektedir. Özellikle Çin’in “Made in China 2025” stratejisi, üretim süreçlerinin otomasyonunu ve dijitalleşmesini hedeflemekte ve bu bağlamda karanlık fabrika uygulamalarını teşvik etmektedir (Khan vd., 2021).

Uluslararası literatürde karanlık fabrika uygulamalarının özellikle yüksek teknoloji gerektiren sektörlerde yoğunlaştığı görülmektedir. Otomotiv, elektronik, yarı iletken ve ilaç sanayi gibi sektörler, bu modelin en yaygın uygulama alanlarını oluşturmaktadır. Bu sektörlerde üretim süreçlerinin karmaşıklığı ve hassasiyeti, otomasyon sistemlerinin kullanımını zorunlu hale getirmektedir (Wang vd., 2025).

Karanlık fabrikaların küresel ölçekte yaygınlaşması, üretim coğrafyasını da yeniden şekillendirmektedir. Otomasyonun artması, düşük işçilik maliyetinin önemini azaltmakta ve üretimin gelişmiş ülkelere geri dönmesine (reshoring) neden olmaktadır. Bu durum, küresel değer zincirlerinin yapısını değiştirmekte ve üretim süreçlerinin yeniden konumlandırılmasına yol açmaktadır (Chen vd., 2024).

Türkiye açısından değerlendirildiğinde, karanlık fabrika uygulamalarının henüz sınırlı olduğu görülmektedir. Türkiye’de sanayi yapısı büyük ölçüde emek yoğun üretim modellerine dayanmaktadır ve Endüstri 4.0 dönüşümü henüz başlangıç aşamasındadır. Bu durum, karanlık fabrika modelinin yaygınlaşmasını sınırlayan temel faktörlerden biridir (Akben & Avşar, 2018).

Türkiye’de Endüstri 4.0’a yönelik farkındalık artmakla birlikte, bu dönüşümün uygulamaya geçirilmesinde çeşitli zorluklar bulunmaktadır. Teknolojik altyapının yetersizliği, yüksek yatırım maliyetleri ve nitelikli

işgücü eksikliği, bu sürecin önündeki en önemli engeller arasında yer almaktadır (Yıldız, 2018). Bununla birlikte Türkiye’de bazı büyük ölçekli işletmeler, üretim süreçlerini dijitalleştirmeye ve otomasyon sistemlerini entegre etmeye başlamıştır. Özellikle otomotiv ve beyaz eşya sektörlerinde faaliyet gösteren firmalar, akıllı fabrika uygulamalarına yönelmekte ve karanlık fabrika modeline geçiş için altyapı oluşturmaktadır. Türkiye’nin bu dönüşüme uyum sağlayabilmesi için sanayi politikalarının yeniden yapılandırılması gerekmektedir. Özellikle Ar-Ge yatırımlarının artırılması, dijital altyapının güçlendirilmesi ve nitelikli işgücünün yetiştirilmesi bu süreçte kritik öneme sahiptir (Uzgören, 2023).

Ayrıca eğitim sisteminin Endüstri 4.0’ın gerektirdiği becerilere uygun şekilde yeniden düzenlenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda mühendislik, veri analitiği ve yazılım alanlarında eğitim programlarının geliştirilmesi önem kazanmaktadır (Çakır, 2018).

Karanlık fabrikalar açısından Türkiye’nin en önemli avantajlarından biri genç ve dinamik işgücüdür. Ancak bu avantajın sürdürülebilir bir rekabet gücüne dönüşebilmesi için işgücünün dijital becerilerle donatılması gerekmektedir. Türkiye açısından bakıldığında temel mesele, karanlık fabrika modelinin teknik olarak mümkün olup olmamasından önce, bu dönüşümün hangi sektörlerde, hangi sermaye yapısı altında ve hangi işgücü kompozisyonu ile gerçekleşebileceğidir. Türkiye’de sanayi yapısının önemli bir kısmı hâlen orta teknoloji ve emek yoğun üretime dayandığı için, karanlık fabrikalara geçişin homojen ve hızlı olacağı varsayımı gerçekçi değildir. Bu nedenle Türkiye tartışmasında yalnızca teknoloji yatırımları değil, sektörel farklılıklar, KOBİ yapısı ve işgücünün beceri uyumu da birlikte değerlendirilmelidir.

Sonuç olarak karanlık fabrika uygulamaları, dünya genelinde hızla yaygınlaşmakta ve üretim sistemlerinin geleceğini şekillendirmektedir. Türkiye ise bu dönüşüm sürecinde henüz başlangıç aşamasında olmakla birlikte, doğru politikalar ve yatırımlar ile bu alanda önemli bir potansiyele sahiptir. Bu bağlamda Türkiye’nin Endüstri 4.0 ve karanlık fabrikalar sürecine uyum sağlayabilmesi, hem ekonomik büyüme hem de küresel rekabet açısından kritik öneme sahiptir. Bu durum, Türkiye’de karanlık fabrikalar tartışmasının salt teknolojik modernizasyon söylemine indirgenemeyeceğini göstermektedir. Asıl mesele, dijital dönüşümün hangi toplumsal maliyetlerle ilerleyeceği ve bu maliyetlerin nasıl yönetileceğidir. Bu nedenle Türkiye açısından karanlık fabrikalar, bir teknoloji transferi

meselesi olduğu kadar, aynı zamanda sanayi politikası, eğitim politikası ve işgücü piyasası yönetimi sorunudur.

KARANLIK FABRİKALAR KARŞISINDA BÜTÜNLEŞİK SOSYAL POLİTİKA ÇERÇEVESİ

Karanlık fabrikaların yaygınlaşması karşısında sosyal politika araçlarının tekil ve birbirinden kopuk müdahaleler biçiminde tasarlanması yeterli değildir. Teknolojik dönüşüm, aynı anda istihdam kaybı, beceri uyumsuzluğu, ücret payının gerilemesi, sosyal güvenlik prim tabanının daralması, bölgesel eşitsizlik ve çalışma yaşamında algoritmik denetim gibi birbiriyle bağlantılı riskler üretmektedir. Bu nedenle uygun politika yaklaşımı; koruyucu gelir desteğini, yeniden istihdama geçişi, yaşam boyu öğrenmeyi, vergi tabanının yeniden düzenlenmesini ve çalışanların dijital dönüşüm kararlarına katılımını aynı kurumsal mimari içinde birleştirmelidir. Böyle bir çerçevede amaç teknolojiyi yavaşlatmak değil, verimlilik kazançlarının toplumsal maliyetlerini görünür kılmak ve bu kazançların daha dengeli paylaşılmasını sağlamaktır. Bu yaklaşım, insan kaynaklarının tamamen işlevsizleşmediğini; seçme, geliştirme, yeniden yerleştirme ve değişim yönetimi işlevlerinin farklılaşarak sürdüğünü vurgulayan çalışmalarla da uyumludur (Yılmaz, 2021).

Robot Vergisi ve Vergi Tabanının Yeniden Dengelenmesi

Robot vergisi, üretimde kullanılan her robotun mekanik olarak ayrı bir vergi nesnesine dönüştürülmesinden ibaret görülmemelidir. Robotun tanımı, otomasyon düzeyinin ölçülmesi ve yatırımın verimlilik etkisinin ayrıştırılması uygulamada güç olduğundan, daha işlevsel bir yaklaşım otomasyon nedeniyle azalan emek vergileri ile artan sermaye gelirleri arasındaki dengesizliği gidermeye yönelmelidir. Hızlandırılmış amortismanların sınırlandırılması, aşırı otomasyon rantlarının vergilendirilmesi, kurum kazançları ve sermaye gelirleri üzerindeki etkin vergi oranlarının güçlendirilmesi ya da otomasyon yoğun yatırımlardan geçiş katkısı alınması bu kapsamda değerlendirilebilir. Elde edilen gelirlerin genel bütçede erimesi yerine, işini kaybedenlerin gelir desteğine, mesleki dönüşüm hesaplarına, KOBİ'lerin kapsayıcı dijitalleşmesine ve bölgesel istihdam programlarına tahsis edilmesi verginin sosyal meşruiyetini artıracaktır. Bununla birlikte verginin yeniliği caydırmaması için yatırımın çalışanı tamamlayıcı mı yoksa doğrudan ikame edici mi olduğu, sektörün uluslararası rekabet koşulları ve firmanın çalışan başına eğitim harcaması dikkate alınmalıdır.

Evrensel Temel Gelir, Asgari Gelir Güvencesi ve Tamamlayıcılık İlkesi

Evrensel temel gelir ya da asgari vatandaşlık geliri, robot vergisinin alternatifi değil; farklı işlev gören tamamlayıcı bir araçtır. Robot vergisi ve sermaye temelli diğer gelirler finansman tarafını güçlendirirken, temel gelir otomasyon kaynaklı kazanç ve istihdam dalgalanmalarına karşı bireylerin gelir tabanını korumaktadır. Ancak tek başına koşulsuz nakit transferi, beceri kaybını, mesleki dışlanmayı veya nitelikli işe erişim sorununu çözmemektedir. Bu nedenle temel gelir, mevcut sosyal sigorta haklarını ikame etmek yerine onları taban gelir düzeyinde tamamlamalı; engellilik, bakım yükümlülüğü, konut ve çocuk yoksulluğu gibi farklı ihtiyaçlara yönelik hedefli yardımlar korunmalıdır. Mali sürdürülebilirlik açısından kademeli uygulama, negatif gelir vergisi, geri ödenebilir vergi kredisi veya otomasyondan yoğun etkilenen bölgelerde garanti edilmiş gelir pilotları değerlendirilebilir. Böylece gelir güvencesi ile çalışma teşviki arasında daha dengeli bir yapı kurulabilir.

Aktif İşgücü Politikaları ve Yaşam Boyu Beceri Güvencesi

Aktif işgücü politikalarının geleneksel kısa süreli kurs anlayışından çıkarılarak öngörüye dayalı bir beceri güvence sistemine dönüştürülmesi gerekmektedir. Karanlık fabrikalara geçiş kararı alınmadan önce iş ve görev analizleri yapılmalı, hangi görevlerin ortadan kalkacağı, hangilerinin dönüşeceği ve hangi yeni yetkinliklerin ortaya çıkacağı belirlenmelidir. Çalışanlara taşınabilir bireysel öğrenme hesapları, ücretli eğitim izni, mikro yeterlilikler, işbaşı dönüşüm programları ve önceki öğrenmenin tanınması sağlanmalıdır. Eğitim içeriği yalnızca yazılım ve veri analitiğiyle sınırlandırılmamalı; bakım, siber güvenlik, robot koordinasyonu, süreç güvenliği, etik ve problem çözme yetkinliklerini de kapsamalıdır. Programların başarısı kursa katılan kişi sayısıyla değil, altı ve on iki ay sonraki istihdam, ücret ve iş kalitesi sonuçlarıyla ölçülmelidir. İşverenlerin eğitim maliyetine katılması, otomasyon yatırımı yapan firmalar için yeniden beceri kazandırma planının teşviklerden yararlanma koşulu hâline getirilmesi ve sendikaların program tasarımına dâhil edilmesi geçişin adil niteliğini güçlendirecektir. Genç kuşakların Endüstri 4.0'a ilişkin fırsat ve tehdit algıları, eğitim programlarının teknik beceri yanında beklenti, güven ve etik boyutlarını da içermesi gerektiğini göstermektedir (Bińczycki vd., 2022).

Sosyal Yatırım Politikaları

Sosyal yatırım yaklaşımı, sosyal harcamaları yalnızca ortaya çıkan zararı

telafi eden pasif giderler olarak değil, bireylerin değişen üretim yapısına uyum kapasitesini artıran uzun vadeli yatırımlar olarak ele almaktadır. Karanlık fabrikalar bağlamında erken çocukluk eğitimi, nitelikli temel eğitim, dijital okuryazarlık, mesleki yönlendirme, bakım hizmetleri ve yetişkin eğitimi birbirini tamamlayan bir yatırım zinciri oluşturmaktadır. Özellikle bakım hizmetlerinin kamusal olarak desteklenmesi, kadınların yeniden eğitim ve istihdam programlarına katılımını kolaylaştırmaktadır. Dezavantajlı bölgelerde geniş bant altyapısı, teknik eğitim merkezleri ve yerel yenilik ağlarının kurulması ise dijital dönüşümün yalnızca büyük kentlerde ve büyük firmalarda yoğunlaşmasını önleyebilir. Sosyal yatırım politikalarının temel farkı, işsizlik gerçekleştikten sonra müdahale etmek yerine risk altındaki grupları önceden belirlemesi ve istihdam edilebilirliği yaşam döngüsü boyunca desteklemesidir.

Sosyal Güvenliğin Yeni Çalışma Biçimlerine Uyarlanması

Otomasyonla birlikte çalışanların işveren, sektör ve statü değiştirme sıklığı artabileceğinden sosyal hakların tek bir iş sözleşmesine bağlı olması koruma boşlukları yaratmaktadır. Bu nedenle emeklilik, sağlık, işsizlik sigortası ve eğitim haklarının kişiyle birlikte taşınabildiği portatif sosyal hak sistemleri geliştirilmelidir. Prim gelirlerindeki olası daralmayı karşılamak üzere sosyal güvenliğin yalnızca ücret bordrosuna dayanan finansman yapısı çeşitlendirilmeli; sermaye gelirleri, kurum kazançları ve genel vergi gelirleri daha güçlü biçimde devreye sokulmalıdır. Teknolojik işsizlik sigortası, klasik işsizlik ödeneğinden farklı olarak yalnızca gelir kaybını telafi etmemeli; ücret sigortası, taşınma desteği, danışmanlık ve yeniden eğitim bileşenlerini içeren bir geçiş paketi sunmalıdır.

Algoritmik Yönetim, Çalışan Katılımı ve İş Kalitesi

Karanlık fabrikalarda insan sayısının azalması, çalışan haklarının önemini azaltmamaktadır. Aksine kalan çalışanların performansı, vardiyası ve güvenliği algoritmik sistemlerce değerlendirildiğinde şeffaflık, açıklanabilirlik ve itiraz hakkı daha kritik hâle gelmektedir. İşletmeler otomasyon kararlarının istihdam, sağlık ve güvenlik üzerindeki etkilerini değerlendiren teknolojik etki raporları hazırlamalı; çalışan temsilcileri yeni sistemlerin seçimi, uygulanması ve denetlenmesi süreçlerine katılmalıdır. İnsan tarafından nihai inceleme, veri minimizasyonu, ayrımcılık denetimi ve iş yoğunluğunun sınırlandırılması asgari yönetim ilkeleri olmalıdır. Böylece sosyal politika yalnızca işini kaybedenleri koruyan bir alan olmaktan çıkarak, dijital üretim içinde çalışmaya devam edenlerin iş

kalitesini ve kolektif söz hakkını da güvence altına alacaktır. Görsel yönetim ve gerçek zamanlı gösterge sistemleri, insan denetiminin sürdüğü alanlarda kararların anlaşılabilirliğini güçlendirebilmektedir (Fenza vd., 2021).

ALMANYA VE JAPONYA: ÜLKE DENEYİMLERİ VE POLİTİKA DERSLERİ

Almanya’da Industrie 4.0 yaklaşımı, üretim teknolojilerinin geliştirilmesini tek başına firmalara bırakmayan; kamu, sanayi birlikleri, araştırma kuruluşları ve sosyal tarafları ortak platformlarda buluşturan koordinasyon modeliyle öne çıkmaktadır. Plattform Industrie 4.0, standartlar, veri güvenliği, KOBİ’lerin dijital dönüşümü ve çalışma yaşamının geleceği gibi başlıkları birlikte ele almaktadır. Mesleki eğitimin ikili yapısı ve işletme konseylerinin işyeri kararlarındaki rolü, teknolojik dönüşümün beceri politikaları ve çalışan katılımıyla ilişkilendirilmesine imkân vermektedir. Almanya örneğinden çıkarılabilecek temel ders, otomasyon politikasının yalnızca yatırım teşviklerinden oluşmaması; mesleki eğitim, ortak standartlar, KOBİ desteği ve sosyal diyaloga tamamlanması gerektiğidir.

Japonya’da ise robotlaşma ve akıllı üretim, yaşlanan nüfus ve işgücü açığıyla birlikte ele alınmaktadır. Society 5.0 yaklaşımı, siber ve fiziksel alanın bütünleşmesini ekonomik büyüme ile toplumsal sorunların çözümünü bağdaştıran insan merkezli bir hedef içinde tanımlamaktadır. Bu çerçevede robotlar yalnızca fabrikalarda emeği ikame eden makineler değil; sağlık, yaşlı bakımı, lojistik ve afet yönetimi gibi alanlarda kapasite açığını gideren araçlar olarak da değerlendirilmektedir. Bununla birlikte insan merkezlilik iddiasının gerçekleşebilmesi, çalışanların yeniden beceri kazanmasına, küçük işletmelerin teknolojiye erişimine ve otomasyonun yarattığı verimlilik kazançlarının ücretler ile hizmet kalitesine yansıtılmasına bağlıdır. Japonya örneği, demografik koşulların otomasyonun istihdam etkisini değiştirebildiğini ve aynı teknolojinin işgücü fazlası bulunan ülkelerle işgücü açığı yaşayan ülkelerde farklı sosyal politika bileşimleri gerektirdiğini göstermektedir.

İki ülke deneyimi birlikte değerlendirildiğinde üç sonuç öne çıkmaktadır. Birincisi, başarılı dijital dönüşüm stratejileri teknoloji, beceri ve sosyal koruma politikalarını aynı anda yürütmektedir. İkincisi, sosyal tarafların ve yerel kurumların katılımı, dönüşüm maliyetlerinin tek yönlü biçimde çalışanlara yüklenmesini sınırlandırmaktadır. Üçüncüsü, ülke

politikalarının doğrudan kopyalanması yerine demografik yapı, işletme ölçeği, eğitim sistemi ve sosyal güvenlik kapasitesi dikkate alınmalıdır. Türkiye bakımından mesleki eğitim ile sanayi politikası arasındaki bağın güçlendirilmesi, KOBİ'ler için ortak dijital altyapı merkezlerinin kurulması, otomasyon teşviklerinin istihdam ve eğitim taahhütlerine bağlanması ve sosyal diyalog mekanizmalarının kurumsallaştırılması öncelikli politika alanlarıdır.

TARTIŞMA

Bu çalışmanın genel değerlendirmesi, karanlık fabrikaların ne salt teknolojik ilerleme ne de yalnızca istihdam tehdidi olarak tek boyutlu biçimde okunabileceğidir. Asıl mesele, bu üretim modelinin verimlilik artışı ile toplumsal bölüşüm arasındaki dengeyi nasıl etkilediğidir. Bu nedenle çalışma, karanlık fabrikaları teknoloji merkezli iyimserlik ile teknolojik felaketçilik arasında üçüncü bir zeminde konumlandırmakta; onları üretim, bölüşüm ve sosyal politika ilişkilerini aynı anda dönüştüren bir ekonomi-politik süreç olarak değerlendirmektedir.

Karanlık fabrikalar, Endüstri 4.0'ın ulaştığı en ileri üretim aşaması olarak yalnızca teknolojik bir yeniliği değil, aynı zamanda üretim sistemlerinin, ekonomik yapıların ve toplumsal ilişkilerin yeniden tanımlandığı bir dönüşüm sürecini ifade etmektedir. Bu bağlamda karanlık fabrikalar, sanayi devrimlerinin evrimsel sürecinin bir sonucu olmakla birlikte, önceki dönüşümlerden niteliksel olarak farklılaşan bir paradigma değişimini temsil etmektedir (Lasi vd., 2014; Xu vd., 2018).

Bu çalışmada ortaya konulan bulgular, karanlık fabrikaların üretim süreçlerinde verimlilik, maliyet avantajı ve esneklik gibi önemli faydalar sağladığını göstermektedir. Özellikle siber-fiziksel sistemler, yapay zekâ ve büyük veri analitiği gibi teknolojilerin entegrasyonu, üretim süreçlerinin daha hızlı, daha doğru ve daha verimli bir şekilde yürütülmesine olanak tanımaktadır (Lee vd., 2015; Chen vd., 2018). Bu durum, işletmelerin küresel rekabet gücünü artırmakta ve üretim sistemlerinin geleceğini şekillendirmektedir.

Ancak bu dönüşümün yalnızca teknik ve ekonomik boyutları üzerinden değerlendirilmesi, karanlık fabrikaların yarattığı toplumsal etkilerin göz ardı edilmesine yol açabilir. Özellikle işgücü piyasaları üzerindeki etkiler, bu dönüşümün en kritik boyutlarından birini oluşturmaktadır. Karanlık fabrikalar, insan emeğinin üretim sürecindeki rolünü azaltarak işgücü

talebini dönüştürmekte ve işsizlik, gelir eşitsizliği ve sosyal dışlanma gibi sorunları beraberinde getirmektedir (Frey & Osborne, 2017).

Bu bağlamda karanlık fabrikalar, Marxist üretim teorileri açısından da yeniden değerlendirilmelidir. Marx'ın emek-değer teorisi, değerın kaynağını insan emeğı olarak tanımlarken, karanlık fabrikalarda üretim sürecinin büyük ölçüde emekten bağımsız hale gelmesi bu teorik çerçevenin sınırlarını zorlamaktadır. Bu durum, değerin üretim sürecinde teknoloji ve veri gibi yeni unsurların rolünün artmasına işaret etmektedir (Moll, 2021).

Öte yandan, karanlık fabrikaların emeğı tamamen ortadan kaldırmadığı, aksine emeğın niteliğini dönüştürdüğü de görülmektedir. Üretim süreçlerinde fiziksel emeğın yerini bilişsel emek almakta ve yeni beceriler ön plana çıkmaktadır. Bu durum, işgücü piyasasında nitelik temelli bir ayrışmaya yol açmakta ve eğitim sistemlerinin yeniden yapılandırılmasını zorunlu kılmaktadır (Oosthuizen, 2022).

Karanlık fabrikaların ekonomik boyutu incelendiğinde, bu modelin maliyet avantajı ve verimlilik artışı sağladığı açıkça görülmektedir. Ancak bu avantajlar, aynı zamanda ekonomik eşitsizliklerin artmasına da yol açabilmektedir. Sermaye yoğun üretim yapısı, büyük ölçekli işletmelerin avantajını artırırken, küçük ve orta ölçekli işletmelerin rekabet gücünü zayıflatabilmektedir (Haseeb vd., 2019). Bu bağlamda devletin rolü kritik hale gelmektedir. Karanlık fabrikaların yarattığı sosyal ve ekonomik etkilerin yönetilebilmesi için sosyal politika araçlarının yeniden tasarlanması gerekmektedir. Robot vergisi, evrensel temel gelir ve aktif işgücü politikaları gibi araçlar, bu dönüşümün olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla literatürde önerilmektedir (Civriz & Taşkın, 2022; Autor, 2015).

Ancak bu politikaların uygulanabilirliği ve etkinliği konusunda literatürde önemli tartışmalar bulunmaktadır. Özellikle robot vergisinin inovasyonu yavaşlatabileceğı ve ekonomik büyümeyi olumsuz etkileyebileceğı yönündeki görüşler, bu politikanın sınırlılıklarını ortaya koymaktadır. Benzer şekilde evrensel temel gelir uygulamalarının maliyetleri ve uzun vadeli etkileri de tartışma konusudur (Kolade & Owoseni, 2022).

Karanlık fabrikalar, aynı zamanda küresel üretim sistemlerinin yeniden yapılandırılmasına da yol açmaktadır. Otomasyonun artması, düşük işçilik maliyetinin önemini azaltmakta ve üretimin gelişmiş ülkelere geri dönmesine neden olmaktadır. Bu durum, küresel değer zincirlerinin yapısını

değiştirmekte ve geliştirmekte olan ülkeler için yeni riskler yaratmaktadır (Chen vd., 2024).

Türkiye açısından değerlendirildiğinde, karanlık fabrika modelinin henüz başlangıç aşamasında olduğu görülmektedir. Ancak bu durum, aynı zamanda Türkiye için önemli bir fırsat alanı yaratmaktadır. Doğru sanayi politikaları ve yatırımlar ile Türkiye'nin bu dönüşüm sürecine uyum sağlaması mümkündür (Yıldız, 2018).

Bu çalışmanın genel değerlendirmesi, karanlık fabrikaların hem önemli fırsatlar hem de ciddi riskler barındırdığını ortaya koymaktadır. Bu model, üretim süreçlerinin verimliliğini artırmakta ve ekonomik büyümeyi desteklemektedir. Ancak aynı zamanda işgücü piyasaları, gelir dağılımı ve refah üzerinde olumsuz etkiler yaratma potansiyeline sahiptir.

Bu bağlamda karanlık fabrikaların sürdürülebilir bir şekilde uygulanabilmesi için dengeli bir yaklaşım benimsenmelidir. Teknolojik gelişmelerin teşvik edilmesi ile sosyal adaletin sağlanması arasında bir denge kurulması gerekmektedir. Bu denge hem ekonomik hem de toplumsal sürdürülebilirlik açısından kritik öneme sahiptir.

Bu yönüyle çalışma, karanlık fabrikalar literatürüne iki temel katkı sunmaktadır. Birincisi, teknik literatürde öne çıkan akıllı üretim ve otomasyon tartışmalarını iktisadi bölüşüm ve işgücü piyasası sonuçlarıyla ilişkilendirmektedir. İkincisi ise, sosyal politika literatüründe çoğu zaman soyut düzeyde yürütülen teknolojik işsizlik ve refah devleti tartışmalarını, karanlık fabrika modeli üzerinden somut bir üretim rejimi bağlamında yeniden çerçevelemektedir.

Sonuç olarak karanlık fabrikalar, yalnızca üretim sistemlerinin değil, aynı zamanda ekonomik ve toplumsal yapıların dönüşümünü ifade eden çok boyutlu bir paradigma olarak değerlendirilmelidir. Bu dönüşümün doğru yönetilmesi, geleceğin üretim sistemlerinin şekillenmesinde belirleyici olacaktır.

SONUÇ

Bu çalışmanın temel bulgusu, karanlık fabrikaların yalnızca üretim süreçlerinde otomasyon düzeyini artıran teknik bir yenilik olarak değil, emek-sermaye ilişkilerini, işgücü piyasalarının yapısını ve sosyal politika araçlarını yeniden şekillendiren çok boyutlu bir dönüşüm olarak

değerlendirilmesi gerektiğidir. Bu sonuç, literatürde baskın olan teknik verimlilik ve akıllı üretim odaklı yaklaşımların önemli olmakla birlikte yetersiz kaldığını; karanlık fabrika tartışmasının bölüşüm, istihdam ve sosyal devlet boyutlarıyla birlikte ele alınmasının gerekli olduğunu göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, karanlık fabrikalar literatüründe çoğu zaman birbirinden ayrı ilerleyen teknik dönüşüm, işgücü piyasası ve sosyal politika tartışmalarını ortak bir analitik zeminde birleştirmeye çalışmaktadır.

Bu çalışma kapsamında karanlık fabrikalar, Endüstri 4.0 bağlamında çok boyutlu bir perspektifle ele alınmış; tarihsel gelişim, teknolojik altyapı, ekonomik etkiler, işgücü dönüşümü ve sosyal politika boyutları bütüncül bir şekilde analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, karanlık fabrikaların yalnızca üretim teknolojilerinde bir ilerleme değil, aynı zamanda üretim ilişkilerinin, işgücü piyasalarının ve devlet politikalarının yeniden şekillendiği kapsamlı bir dönüşüm sürecini ifade ettiğini ortaya koymaktadır.

Sanayi devrimlerinin tarihsel gelişimi incelendiğinde, her devrimin üretim faktörleri arasındaki ilişkiyi yeniden tanımladığı görülmektedir. Bu bağlamda Endüstri 4.0, fiziksel ve dijital sistemlerin entegrasyonu ile üretim süreçlerini yeniden yapılandırırken, karanlık fabrikalar bu dönüşümün en ileri aşamasını temsil etmektedir. Bu üretim modeli, siber-fiziksel sistemler, yapay zekâ, büyük veri ve nesnelerin interneti gibi teknolojilerin entegrasyonu ile tamamen otonom üretim sistemlerinin ortaya çıkmasını mümkün kılmaktadır (Lee vd., 2015; Xu vd., 2018).

Ekonomik açıdan değerlendirildiğinde, karanlık fabrikalar işletmelere önemli avantajlar sağlamaktadır. Üretim maliyetlerinin düşmesi, verimliliğin artması ve üretim süreçlerinin esnek hale gelmesi, işletmelerin rekabet gücünü artırmaktadır. Bununla birlikte, sermaye yoğun üretim yapısının yaygınlaşması, ekonomik eşitsizliklerin artmasına ve piyasa yapısında yoğunlaşmaya yol açabilmektedir (Haseeb vd., 2019).

İşgücü perspektifinden bakıldığında, karanlık fabrikaların en önemli etkisi, emek yapısının dönüşümüdür. Fiziksel emeğin üretim sürecindeki rolü azalırken, bilişsel ve teknik becerilere dayalı işlere olan talep artmaktadır. Bu durum, işgücü piyasasında nitelik temelli bir ayrışmaya yol açmakta ve eğitim sistemlerinin yeniden yapılandırılmasını zorunlu kılmaktadır (Frey & Osborne, 2017; Autor, 2015).

Sosyal politika açısından değerlendirildiğinde ise karanlık fabrikalar, refah devleti modelinin sürdürülebilirliğini sorgulanır hale getirmektedir. İşgücü talebindeki azalma, sosyal güvenlik sistemlerinin finansmanını zorlaştırmakta ve yeni politika araçlarının geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Robot vergisi ve evrensel temel gelir gibi politikalar, bu dönüşümün sosyal etkilerini dengelemek amacıyla literatürde öne çıkan öneriler arasında yer almaktadır (Civriz & Taşkın, 2022).

Bu çalışma, karanlık fabrikaların hem önemli fırsatlar hem de ciddi riskler barındırdığını ortaya koymaktadır. Bu nedenle bu dönüşüm sürecinin yönetilmesi, yalnızca teknolojik gelişmelere bırakılmamalı, aynı zamanda sosyal ve ekonomik politikalarla desteklenmelidir.

Bu bağlamda aşağıdaki öneriler geliştirilebilir:

- **Sanayi Politikaları:** Devletler, Endüstri 4.0 dönüşümünü destekleyen stratejik sanayi politikaları geliştirmeli ve dijital altyapı yatırımlarını artırmalıdır.
- **Eğitim Politikaları:** İşgücünün dijital becerilerle donatılması için eğitim sistemleri yeniden yapılandırılmalı ve yaşam boyu öğrenme programları yaygınlaştırılmalıdır.
- **Sosyal Politika Araçları:** Teknolojik işsizliğin etkilerini azaltmak için aktif işgücü politikaları, yeniden beceri kazandırma programları ve sosyal destek mekanizmaları güçlendirilmelidir.
- **Vergi Politikaları:** Robot vergisi ve alternatif vergi modelleri tartışılmalı ve bu politikaların ekonomik etkileri dikkatle değerlendirilmelidir.
- **KOBİ Destekleri:** Küçük ve orta ölçekli işletmelerin dijital dönüşüme uyum sağlayabilmesi için finansal ve teknik destek mekanizmaları geliştirilmelidir.
- **Uluslararası İş birliği:** Küresel ölçekte ortaya çıkan eşitsizliklerin azaltılması için uluslararası düzeyde işbirliği ve koordinasyon artırılmalıdır.

Sonuç olarak karanlık fabrikalar, üretim sistemlerinin geleceğini şekillendiren önemli bir paradigma olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu dönüşümün doğru yönetilmesi hem ekonomik verimlilik hem de sosyal adalet açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle karanlık fabrikalar, yalnızca mühendislik ve teknoloji perspektifiyle değil, aynı zamanda ekonomi, sosyoloji ve kamu politikası perspektifleriyle birlikte ele alınmalıdır.

Son tahlilde karanlık fabrikalar, yalnızca üretim teknolojilerindeki ilerlemenin değil, çağdaş kapitalizmin üretim ve bölüşüm mantığında meydana gelen dönüşümün de görünür hale geldiği bir örnektir. Bu nedenle mesele, karanlık fabrikaların yaygınlaşıp yaygınlaşmayacağı değil; bu dönüşümün işgücü, eşitsizlik ve refah üzerindeki etkilerinin hangi kurumsal düzenlemelerle yönetileceğidir. Çalışmanın ulaştığı temel sonuç, karanlık fabrikaların geleceğinin teknik kapasite kadar, sosyal politika kapasitesi tarafından da belirleneceğidir.

KAYNAKÇA

- Akben, İ., & Avşar, İ. İ. (2018). Endüstri 4.0 ve karanlık üretim: Genel bir bakış. *Türk Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi*, 3(1), 26-37
- Aljuaid, A. A., Masood, S. A., & Tipu, J. A. (2024). Integrating Industry 4.0 for sustainable localized manufacturing to support Saudi vision 2030: an assessment of the Saudi arabian automotive industry model *Sustainability*, 16(12), 5096. <https://doi.org/10.3390/su16125096>
- Autor, D. H. (2015). Why are there still so many jobs? The history and future of workplace automation. *Journal of Economic Perspectives*, 29(3), 3–30. <https://doi.org/10.1257/jep.29.3.3>
- Bińczycki, B., vd. (2022). Industry 4.0: A chance or a threat for gen z? the perspective of economics students. *Sustainability*, 14(14), 8925. <https://doi.org/10.3390/su14148925>
- Chen, B., Wan, J., Shu, L., Li, P., Mukherjee, M., & Yin, B. (2018). Smart factory of Industry 4.0: Key technologies, application case, and challenges. *IEEE Access*, 6, 6505–6519. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2783682>
- Chen, C., Frey, C. B.. (2024). Robots and reshoring: Automation and local labor markets in Europe. *Industrial and Corporate Change*. 33(6) <https://doi.org/10.1093/icc/dtae012>
- Civriz, M., & Taşkın, M. A. (2022). Endüstri 4.0 ile artan robot istihdamı ve robotların vergilendirilmesi. *Vergi Raporu*, (279), 120 – 138.
- Çakır, N. N. (2018). Endüstri 4.0 ve çalışmanın geleceği. *Ejovoc (Electronic Journal of Vocational Colleges)*, 8(2), 97-105.

Davies, R., Coole, T., & Smith, A. (2017). Review of socio-technical considerations to ensure successful implementation of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 1288–1295. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.256>

Düzdar, İ., & Kolçak, S. (2024). Karanlık üretim faktörlerinin tesis planlama açısından değerlendirilmesi. *OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 7(3), 994-1009. <https://doi.org/10.47495/okufbed.1251321>

Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action. (2024). Industrie 4.0: Smart and digital production. Berlin: BMWK.

Fenza, G., Loia, V., & Nota, G. (2021). Patterns for Visual Management in Industry 4.0. *Sensors*, 21(19), 6440. <https://doi.org/10.3390/s21196440>

Frey, C. B., & Osborne, M. A. (2017). The future of employment: How susceptible are jobs to computerisation? *Technological Forecasting and Social Change*, 114, 254–280. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.08.019>

Fritzsche, K., Niehoff, S., & Beier, G. (2018). Industry 4.0 and climate change —exploring the science-policy gap. *Sustainability*, 10(12), 4511. <https://doi.org/10.3390/su10124511>

Gedik, Y. (2021). Endüstri 4.0 teknolojilerinin ve endüstri 4.0'ın üretim ve tedarik zinciri kapsamındaki etkileri: teorik bir çerçeve. *Journal of Emerging Economies and Policy*, 6(1), 248-264.

Government of Japan, Cabinet Office. (2021). Society 5.0 and the Sixth Science, Technology and Innovation Basic Plan. Cabinet Office.

Gökten, P. O. (2018). Karanlıkta üretim: Yeni çağda maliyetin kapsamı. *Muhasebe Bilim Dünyası Dergisi*, 20(4), 880-897. <https://doi.org/10.31460/mbdd.460897>

Grenčíková, A., Kordoš, M., & Sokol, J. (2020). The impact of Industry 4.0 on jobs creation. creation within the small and medium-sized enterprises and family businesses in Slovakia. *Administrative Sciences*, 10(3), 71. <https://doi.org/10.3390/admsci10030071>

Haseeb, M., Hussain, H. I., Ślusarczyk, B., & Jermisittiparsert, K. (2019). Industry 4.0: A Solution towards Technology Challenges of Sustainable Business Performance. *Social Sciences*, 8(5), 154. <https://doi.org/10.3390/socsci8050154>

- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Design principles for Industrie 4.0 scenarios. *HICSS Proceedings*, 3928-3937. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing INDUSTRIE 4.0*.
- Khan, I. S., Ahmad, M. O., & Majava, J. (2021). Industry 4.0 and sustainable development. : A Systematic Mapping of Triple Bottom Line, Circular Economy and Sustainable Business Models Perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 297, Article 126655. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126655>
- Kolade, O., & Owoseni, A. (2022). Employment 5.0 and future work. *Technology in Society*, 71, 102086. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.102086>
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 6(4), 239–242. <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015). Cyber-physical systems architecture. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- Lee, J., Jin, C., & Bagheri, B. (2017). Cyber physical systems for predictive production. *Production Engineering*, 11(2), 155–165. <https://doi.org/10.1007/s11740-017-0729-4>
- Lingmont, D. N. J., & Alexiou, C. (2020). The contingent effect of job automating technology awareness on perceived job insecurity: Exploring the moderating role of organizational culture. *Technological Forecasting and Social Change*, 161, 120302. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120302>
- Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A Survey on Technologies, Applications and Open Research Issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 6, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>
- Moll, I. (2021). The myth of the Fourth Industrial Revolution. *Theoria*, 68(167), 1–38. <https://doi.org/10.3167/th.2021.6816701>

Mourtzis, D. (2023). Digital twin in industrial metaverse. *Frontiers in Manufacturing Technology*, 3. <https://doi.org/10.3389/fmtec.2023.1155735>

OECD. (2023). OECD Employment Outlook 2023: Artificial Intelligence and the Labour Market. OECD Publishing.

Oosthuizen, R. M. (2022). The Fourth industrial revolution – Smart technology, artificial intelligence, robotics and algorithms: industrial psychologists in future workplaces. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 5, 913168. <https://doi.org/10.3389/frai.2022.913168>

Öztemel, E., ve Gürsev, S. (2020). Literature Review of Industry 4.0 and Related Technologies. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(1), 127-182. <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8>

Schönsleben, P., Fontana F., Duchi., A. (2017). What benefits do initiatives such as industry 4.0 offer for production locations in high-wage countries? *Procedia CIRP*, 63, 179–183. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.356>

Schwab, K. (2016). *The Fourth Industrial Revolution*. World Economic Forum.

Şekkeli, Z. H., & Bakan, İ. (2018). Akıllı fabrikalar. *Journal of Life Economics*, 5(4), 203-220. <https://doi.org/10.15637/jlecon.270>

Uzgören, E. (2023). Sanayide yeni üretim yöntemi: Karanlık fabrikalar. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Sanayi Politikaları ve Kalkınma Merkezi*.

Vaddadi, B., Ghadimi, P., & Ciarapica, F. E. (2020). Internet of Things and data-driven production management in Industry 4.0: *A systematic perspective*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.

Wang, R., Tong Y., Zhuang C., (2025). Lights-out factories: Review and prospect. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2025;239(14):1983-1993. <https://doi.org/10.1177/09544054241305826>

Xu, L. D., Xu, E. L., & Li, L. (2018). Industry 4.0: State of the art. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2941–2962. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>

Yıldız, A. (2018). Endüstri 4.0 ve akıllı fabrikalar. *Sakarya University Journal of Science*, 22(2), 546-556. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.321957>

Yılmaz, C. (2021). Endüstri 4.0'ın Karanlık Fabrikalarında İnsan Kaynaklarının Rolü: İşlevsiz Bir Sınıf Mı?. *International Journal of Innovative Approaches in Social Sciences*, 5(4), 236-247. <https://doi.org/10.29329/ijiasos.2021.419.3>