JMOH

Journal of Management and Organization History

Yönetim ve Örgüt Tarihi Dergisi

Received / Geliş Tarihi: 29.11.2025
Accepted / Kabul Tarihi: 16.12.2025
Published / Yayın Tarihi: 29.12.2025
Review Article / Derleme Makale
Doi: 10.5281/zenodo.18061395

SANAYİDE TARIM TOPLUMUNDAN YAPAY ZEKÂ ÇAĞINA DÖNÜŞÜMÜN TARİHÇESİ

THE HISTORY OF INDUSTRIAL TRANSFORMATION FROM AGRICULTURAL SOCIETY TO THE AGE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Öğr. Gör. Dr. Ülkü TUTAR
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi
ORCID: 0009-0008-1079-0399, ulkututar@cumhuriyet.edu.tr

ABSTRACT

Industrial revolutions represent critical turning points in the technological and socio-economic evolution of humanity. The First Industrial Revolution (Industry 1.0), which began with steam power, marked the start of the industrial era; the Second Industrial Revolution (Industry 2.0) was scaled through electricity and mass production; the Third Industrial Revolution (Industry 3.0) entered the process of digitalization with computers and automation. With the Fourth Industrial Revolution (Industry 4.0), the era of smart factories was opened through Cyber-Physical Systems (CPS) and big data analytics, positioning artificial intelligence as a central tool in process optimization and bringing automation and data-centered operations to the forefront. The final stage, Industry 5.0, adopts a more human-centered approach with the principles of human-machine collaboration, personalization, and sustainable production. Artificial intelligence plays a key role in this transformation through decision support systems, predictive analytics, and autonomous processes. Through the metaverse, Industry 5.0 offers immersive environments that facilitate collaboration among humans, machines, and robots by means of augmented virtual reality, digital twins, and simulations. This study chronologically examines the transition of social production from muscle power based on agriculture to today's Industry 5.0, which relies on artificial intelligence and cognitive systems.

Keywords: Industrial Revolutions, Artificial Intelligence, Industry 4.0, Industry 5.0, Cyber-Physical Systems.

ÖZET

Sanayi devrimleri, insanlığın teknolojik ve sosyo-ekonomik evriminde kritik dönüm noktalarını temsil etmektedir. Birinci Sanayi Devrimi'nin (Endüstri 1.0) buhar gücüyle başlayan endüstri dönemi, İkinci Sanayi Devrimi'nde (Endüstri 2.0) elektrik ve seri üretimle ölçeklenmiş, Üçüncü Sanayi Devrimi'nde (Endüstri 3.0) bilgisayar ve otomasyonla dijitalleşme sürecine girmiştir. Dördüncü Sanayi Devrimi (Endüstri 4.0) ile de Siber-Fiziksel Sistemler (SFS) ve büyük veri analitiği ile akıllı fabrikalar çağına kapı açarak yapay zekâyı süreç optimizasyonunda merkezi bir araç olarak konumlandırmış, otomasyon ve veri merkezli operasyonları ön plana çıkarmıştır. Son aşama olan Endüstri 5.0 ise, insan-makine işbirliği, kişiselleştirme ve sürdürülebilir üretim ilkeleriyle daha insan merkezli bir yaklaşımı benimsemektedir. Yapay zekâ, karar destek sistemleri, tahmine dayalı analitik ve otonom süreçlerle bu dönüşümde kilit rol oynamaktadır. Endüstri 5.0 metaverse ile artırılmış sanal gerçeklik, dijital ikizler ve simülasyonlar aracılığıyla insan, makine ve robotlar arasında işbirliğini kolaylaştıran sürükleyici ortamlar sunmaktadır. Bu çalışma, toplumsal üretimin tarıma dayalı kas gücünden, günümüzün yapay zekâ ve kognitif sistemlerine dayalı Endüstri 5.0 paradigmasına geçiş sürecini kronolojik olarak incelemektedir.

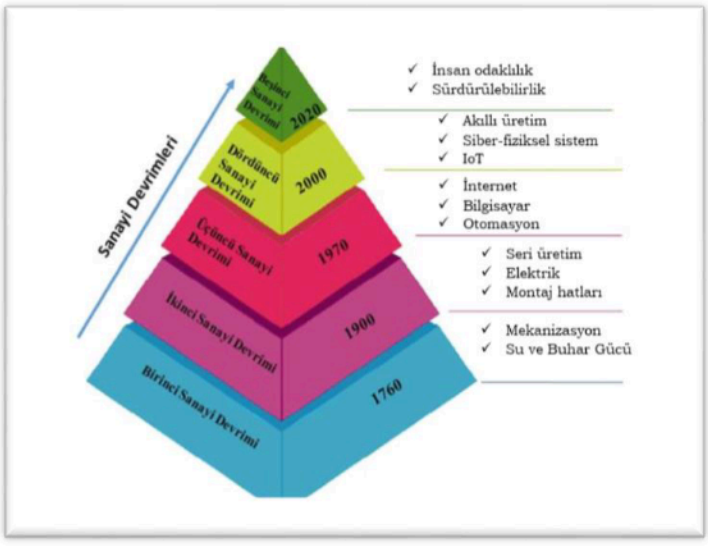
Anahtar Kelimeler: Sanayi Devrimleri, Yapay Zekâ, Endüstri 4.0, Endüstri 5.0, Siber Fiziksel Sistemler.

1.Giriş

Tarım toplumundan sanayi toplumuna geçiş süreci, tarihsel olarak Birinci Sanayi Devrimi ile açıklanır; bu dönemde James Watt'ın geliştirdiği buhar makinesi hem üretimde hem ulaşımda devrim yaratmış, tekstil ve demir-çelik gibi sektörlerde mekanikleşme hızlanmış, demiryolları ve buharlı gemiler ticaretin ölçeğini genişletmiş ve değiştirmiştir (Landes, 1969). Tarımda aile temelli küçük ölçekli üretimden fabrikalara dayalı büyük ölçekli üretime geçiş, kırsaldan kentlere göçü tetiklemiş ve yeni bir işçi sınıfının doğmasına yol açmıştır (Hobsbawm, 1999). Bu dönüşüm yalnızca ekonomik değil; aynı zamanda toplumsal ve kültürel bir devrim olarak, modern endüstriyel toplumun ve kapitalist ekonominin temelini oluşturmuştur (Mokyr, 1990). Sanayi devrimleri, insanlık tarihi için en önemli dönüm noktalarından biri olarak kabul edilmektedir. Tarım ve feodal toplumdan sanayi ve hizmet toplumuna geçişi sağlayan, teknolojik yeniliklerin öncülüğünde toplumsal, ekonomik ve kültürel dönüşümleri beraberinde getiren çok aşamalı bir süreçtir. Bu süreçte, birinci devrim buhar gücü ve makineleşmeyle, ikinci devrim elektrikle, üçüncü devrim bilgi teknolojileriyle, dördüncü devrim ise siber-fiziksel sistemlerle tanımlanmıştır. Günümüzde ise yapay zekâ, nesnelerin interneti, biyoteknoloji ve uzay endüstrisi gibi alanlarla şekillenen Beşinci Sanayi Devrimi, sadece üretim yöntemlerini değil, insanlığın yaşam tarzını ve iletişim biçimini köklü biçimde dönüştürme potansiyeline sahiptir (Kılıç, 2023).

Bu tarihsel akışın incelenmesi, günümüzde yapay zekâ teknolojilerinin merkezde yer aldığı Endüstri 5.0'a geçişin felsefi ve teknolojik temellerini anlamak açısından önemlidir. Sanayi devrimlerinin tarihsel sürekliliği, sadece kullanılan teknolojik araçların gelişimiyle sınırlı kalmamakta aynı zamanda üretim üzerindeki insan kontrolünün aşamalı olarak artırılması süreci olarak da yorumlanmaktadır. Endüstri 1.0 ile buhar gücüyle fiziksel kontrol sağlanmışken, Endüstri 3.0'da otomasyonla dijital kontrol ve nihayet Endüstri 5.0'da sürdürülebilirlik odaklı yapay zekâ ile kognitif ve etik kontrol hedeflenmektedir. Bu dönüşümün anlaşılması, günümüzdeki dijital uçurumu ve geleceğin akıllı üretim vizyonunu çözümlemek için gereklilik arz etmektedir.

2. Sanayi Devrimlerinin Gelişim Süreci



Şekil 1. Sanayi Devrimlerinin Gelişim Süreci
Kaynak: (Kılıç 2023, s. 279)

Tablo1: Sanayi Devrimleri: Enerji, Teknoloji ve Üretim Paradigmalarının Evrimi

Sanayi Devrimi	Yaklaşık Dönem	Ana İtici Güç (Enerji/Bilgi)	Temel Teknolojik Atılım	Üretim Odak Noktası	Toplumsal ve Ekonomik Dönüşüm
Endüstri 1.0	1760–1840	Buhar ve Su Gücü, Kömür, Metal	Mekanik Tezgahlar, Dokuma Makineleri	Fabrika sistemine geçiş, Tarımdan sanayiye yönelim	Kırsaldan kente göç, işçi sınıfının doğuşu, ilk sanayi şehirleri
Endüstri 2.0	1870'ler	Elektrik Enerjisi	Seri üretim, Montaj hatları (Fordizm)	Kitlesel üretim, Ölçek ekonomileri	Tüketim toplumunun temelleri, sendikalaşma, iş bölümü artışı
Endüstri 3.0	1969–2000'ler	Bilişim Teknolojileri (IT)	Bilgisayar, PLC, İnternet	Esnek üretim, Dijital kontrol	Hizmet sektörünün yükselişi, küreselleşme, bilgi ekonomisi
Endüstri 4.0	2011	Siber-Fiziksel Sistemler, Büyük Veri	IoT, Bulut Bilişim, Yapay Zekâ (erken dönem)	Akıllı fabrikalar, Tam otomasyon, Verimlilik	Endüstriyel dijitalleşme, veri temelli karar alma, platform ekonomisi
Endüstri 5.0	2020'ler	Yapay Zekâ, Kognitif Sistemler	İnsan-makine işbirliği (Cobots), Metaverse, Dijital İkizler	Kişiselleştirme, İnsan odaklılık, Sürdürülebilirlik	Teknoloji-insan uyumu, etik üretim, döngüsel ekonomi, sosyal inovasyon

Kaynak: (Prisecaru, 2016, s.57); (Kılıç 2023) ; (Nalbant ve Aydın 2025).

Sanayi devrimleri, enerji kaynakları, teknolojik atılımlar ve üretim yöntemleri üzerinden toplumsal ve ekonomik dönüşümlerin sürekliliğini göstermektedir. Endüstri 1.0 buhar ve su gücü ile mekanik tezgâhların ortaya çıkışı sayesinde tarımdan sanayiye geçişi ve işçi sınıfının doğuşunu tetiklemiştir. Endüstri 2.0 ise elektrik enerjisi ve montaj hatlarıyla kitlesel üretimi hayata geçirerek tüketim toplumunun temellerini atmış, iş bölümü ve sendikalaşmayı hızlandırmıştır. Endüstri 3.0 bilişim teknolojilerinin (bilgisayar, PLC, internet) üretime entegrasyonu ile esnek üretim ve dijital kontrolü öne çıkarmış; küreselleşme ve bilgi ekonomisinin yükselişine zemin hazırlamıştır. Endüstri 4.0 siber-fiziksel sistemler, büyük veri ve yapay zekâ ile akıllı fabrikaları ve tam otomasyonu mümkün hale getirerek endüstriyel dijitalleşmeyi, veri temelli karar alma süreçlerini ve platform ekonomisini ön plana çıkarmıştır. Günümüzde şekillenmekte olan Endüstri 5.0 ise yapay zekâ ve kognitif sistemler aracılığıyla insan-makine işbirliğini, kişiselleştirilmiş üretimi ve sürdürülebilirliği merkeze almaktadır. Etik üretim, döngüsel ekonomi ve sosyal inovasyon gibi toplumsal değerleri üretime entegre etmektedir.

Bu evrimsel süreç, sanayi devrimlerinin yalnızca teknolojik ilerlemelerle sınırlı olmadığını; aynı zamanda üretim biçimlerini, toplumsal yapıları ve ekonomik sistemleri dönüştüren çok boyutlu bir süreç olduğunu göstermektedir. Özellikle Endüstri 4.0'dan Endüstri 5.0'a geçiş, teknolojinin insan merkezli ve sürdürülebilir bir toplumsal dönüşümle bütünleştiğini ortaya koymaktadır.

2.1. Endüstri 1.0: Buhar Gücüyle Üretimin Doğuşu

Tarım toplumunda üretim, genellikle su ve rüzgâr gibi doğal enerji kaynaklarına ve kas gücüne bağımlıydı; bu kaynakların verimliliği sınırlı ve kontrol edilebilirliği düşüktü. Sanayi devrimi, bu kısıtlamaları aşarak kömür ve buhar gücü gibi insanın kontrol edebildiği enerji kaynaklarını kullanıma sunmuştur. Buhar makinasının 18. yüzyılın başlarında icadı ve geliştirilmesiyle, mekanik güç için daha önce kullanılan kas gücünün ya da sınırlı verimlilikteki su ve rüzgâr güçlerinin yerini kömür ve buhar gücü almıştır. Üretim süreçleri

artık doğanın izin verdiği koşullardan bağımsız olarak insanın kontrolünde gerçekleşen, organize ve verimli bir yapıya dönüşmüştür (Peker & Arslanoğlu, 2017).

18. yüzyılda endüstriyel makineleri çalıştırmak için su ve buhar gücünden yararlanma mekanizmalarının geliştirilmesiyle başlayan Endüstri 1.0 toplumun odağını tarıma dayalı elle üretilen mallardan endüstriyel ürünlere kaydırmıştır. İnsanları fabrikalara, ürünleri pazarlara taşıyan buharlı trenlerin gelişmesi ile kolaylaşan ulaşım, malların eskisinden daha uzağa, daha uygun maliyetle taşınmasına ve fabrikaların yaygınlaşmasına, çiftlik işçilerinin değirmenlerde ve fabrikalarda çalışmak üzere daha büyük merkezlere taşınmasına olanak sağlamıştır. Değirmenlerde kumaş dokumak için kullanılan su gücüyle çalışan tezgahların her geçen gün artması ile birlikte tarımda da makineleşme sayesinde daha verimli gıda üretiminin sağlanabilmesi, insanların yaşamında, çalışma ve iş yapma biçiminde bir değişimi gerçekleştirmiştir (Sharma & Singh 2020). Bu kritik değişim, birinci sanayi devriminin temelini oluşturmuş ve toplumun ana geçim kaynağını tarımdan sanayiye kaydırmıştır. Bir ülkenin ekonomik rekabet gücünü doğrudan etkileyen endüstrideki bu ilk teknolojik atılımlar, küresel ekonominin gelecekteki dönüşümünün başlangıç noktasını işaret etmiştir. Bu devrim aynı zamanda, tarıma ve el sanatlarına dayalı toplum ve üretim biçimlerini köklü bir biçimde değiştirmiş; daha önce kırsal bölgelerde yaşayan nüfusun şehirlere göç ederek fabrika işçiliği gibi yeni çalışma biçimlerine uyum sağlamasını ve yeni iş süreçlerinin gelişimini sağlamıştır (O'Brien, 2017).

Endüstri 1.0 buharın kısıtlı taşıma mesafesi nedeniyle, üretimin büyük tesislerde (fabrikalarda) merkezileşmesi ilkesine dayanır. Buhar gücünün verimli kullanımı sayesinde demir üretimi yüksek verimle gerçekleştirilebilmiş ve demiryolları gibi ulaşım altyapısının hızla yaygınlaşması sağlanmıştır. Böylece kömür ve demir gibi hammaddelerin ve nihai ürünlerin taşınması kolaylaşarak sanayinin gelişmesine ivme kazandırılmıştır. Bu süreç, tekstil, gemi yapımı ve demiryolu gibi kilit sektörlerde köklü değişimlere yol açarak üretkenlik ve çıktı miktarını önemli ölçüde artırmıştır (Prisecaru, 2016).

Endüstri 1.0 döneminde, buhar gücünün iplik endüstrisine entegre edilmesiyle benzer şekilde tarım, imalat, madencilik ve ulaştırma da insan ve hayvan gücüne dayalı üretimin yerini makineli üretimler almıştır. Bu dönüşüm, başlangıçta iş seviyesini sınırlasa da, iş yükünü hafifleterek verimliliği önemli ölçüde artırmıştır (Yavari & Pilevari, 2020).

Bu dönem, tarıma ve el sanatlarına dayalı toplum yapısından, endüstriyel ekonomiye geçişin dönüşümünü temsil etmekle birlikte insanlık tarihindeki üretkenliğin en belirgin sıçramalarından biridir. Tarihsel analizler, Sanayi Devrimi'nin bu ilk aşamasının, 1760 ile 1830 yılları arasında büyük ölçüde Büyük Britanya ile sınırlı kaldığını göstermektedir. Fransa gibi diğer Avrupa ülkeleri bu erken dönemde daha yavaş ve daha az kapsamlı bir sanayileşme yaşamış, diğer kıtalar ise çok daha geriden takip etmiştir (O'Brien, 2017). Endüstri 1.0 ile birlikte üretim biçiminde, teknolojide ve sınıfsal yapıda da değişimler yaşanmıştır (Kılıç & Alkan, 2018). Bu değişimler Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2: Endüstri 1.0 ile Gerçekleşen Değişimler ve Sonuçları

Boyut	Değişim	Sonuç
Üretim Biçimi	Atölye → Fabrika sistemi	Seri üretim, iş bölümü, verimlilik artışı
Teknoloji	Buhar gücü, mekanik tezgahlar, maden ve metal kullanımının artışı	İnsan emeğinin yerini makineleşme almıştır.
Sınıfsal Yapı	Burjuvazi – Proletarya ikiliği	Yeni toplumsal çatışmalar, işçi hareketlerinin doğuşu
Toplumsal Kurumlar	Aile, eğitim, sosyal yaşam	Geleneksel yapının çözülmesi, modern toplumun kurumsal temellerinin atılması

(Yazar tarafından oluşturulmuştur.)

Bu dönemde atölye üretiminden fabrika sistemine geçiş, yalnızca üretim süreçlerini dönüştürmekle kalmamış; aile kurumu, eğitim sistemi, toplumsal kurumlar ve toplumsal yapı üzerinde de köklü değişikliklere yol açmıştır (Kılıç & Alkan 2018). Bu dönüşümün o dönemde toplumsal yapı üzerinde en belirgin sonucu, burjuvazi ile proletarya arasındaki ikili sınıfsal yapının ortaya çıkmasıdır (Nair, 2025). Tablo 2, Endüstri 1.0 sürecini teknik ve toplumsal boyutlarıyla ele almaktadır.

2.2. Endüstri 2.0: Elektrik, Seri Üretim ve Ölçekleme

İkinci Sanayi Devrimi, elektriğin üretim süreçlerine entegre edilmesiyle birlikte sanayide köklü bir dönüşümü başlatmıştır. Bu dönüşüm, Henry Ford'un hareketli montaj hattı uygulamasıyla kitlesel üretim çağını başlatmıştır. Elektrik enerjisinin 19. yüzyılın sonlarında termik santrallerde buhar türbinleriyle üretilmeye başlanması, sanayi tesislerinde gücün daha esnek ve verimli kullanılmasına olanak tanımıştır (Peker & Arslanoğlu, 2017). Bu gelişme, Endüstri 1.0'daki buhar gücünün merkezileşmiş yapısından, elektrik sayesinde dağıtık ve esnek üretim sistemlerine geçişi ifade etmektedir.

On dokuzuncu yüzyıldan itibaren elektrik, sanayileşme sürecinde temel enerji kaynağı olarak öne çıkmış ve buhar ile su gücüne kıyasla sunduğu kullanım kolaylığı sayesinde üretim süreçlerinde hızla benimsenmiştir. Elektriğin yaygınlaşması, yalnızca özel makinelerin farklı alanlarda kullanılabilirliğini artırmakla kalmamış, aynı zamanda endüstrilerin performans ve verimlilik düzeylerinde de önemli gelişmeler sağlamıştır. Bu gelişmeler endüstrilerin performansını ve verimliliğini artırmıştır. Frederick Taylor gibi öncü isimlerin iş süreçlerini ve işçi verimliliğini incelemeleri sonucunda, üretim yönetiminde bilimsel yöntemlerin uygulanması gündeme gelmiş ve bu bağlamda çevik üretim ile yalın üretim gibi modern yönetim anlayışlarının temellerini oluşturmuştur (Yavari & Pilevari, 2020).

Sanayi devrimi öncesinde üretim faaliyetleri büyük ölçüde zanaatkârlık ve usta-çırak ilişkisine dayalı bilgi aktarımı ile yürütülmekteydi. Zanaatkâr, yalnızca gerekli araç ve gereçlere hâkim olmakla kalmaz, aynı zamanda üretim sürecinin tüm aşamalarını kontrol eden temel aktör konumundaydı. Ancak Adam Smith'in iş bölümü teorisi ve Frederick Taylor'un bilimsel yönetim yaklaşımıyla birlikte, üretimde iş bölümü ve uzmanlaşma kavramları ön plana çıkmıştır. Bu gelişmeler, makinelerin daha etkin kullanımına olanak tanımış ve verimliliğin artırılmasına yönelik sistematik düşüncenin temellerini atmıştır (Wu et al., 2024). Sonuç olarak bu dönemde seri üretim ve montaj hatlarının kurulmasıyla üretim süreçleri daha sistematik bir yapıya kavuşmuştur. Henry Ford, Frederick Taylor'un bilimsel yönetim ilkelerinden esinlenerek 1914'te hareketli montaj hattını hayata geçirmiş; bu sayede üretim süresi ciddi ölçüde kısalmış, ürün çeşitliliği ve miktarı artmış ve böylece büyük

ölçekli üretim mümkün hâle gelmiştir. Ancak bu kitlesel üretim modeli, zamanla tüketici taleplerinin çeşitlenmesi karşısında yetersiz kalmıştır. Bu durum, esnek üretim sistemlerine olan ihtiyacı doğurmuştur (Ateş & Çöpoğlu, 2017). Henry Ford gibi Taylor'ın teorisini benimseyen Taiichi Ohno'nun öncülüğünde geliştirilen Toyota Üretim Sistemi ise müşteri odaklılık ve ürün çeşitliliği ilkeleriyle kitlesel üretimin standartlaşmış yapısına alternatif sunmuştur. Bu yaklaşım, Üçüncü Sanayi Devrimi'nde dijitalleşmeyle birlikte gelişecek olan esnek otomasyonun da öncülü olmuştur (Yin et al., 2018).

2.3. Dijitalleşmenin Başlangıcı: Endüstri 3.0 Bilişim Teknolojileri ve Otomasyonun Yükselişi

1960'lı yıllarda ortaya çıkan Endüstri 3.0 elektronik ve bilgi teknolojilerinin üretim süreçlerine entegre edilmesiyle sanayide köklü bir dönüşümün başlangıcını temsil etmiştir (Kılıç, 2023; Mosleuzzaman et al., 2024). 1970'lerde özellikle bilgi teknolojilerinin yükselişi dijitalleşmenin artması ve bilgisayar kullanımının yaygınlaşması üretim süreçlerinin mevcut verimi ve ürün kalitesini artırmış, maliyetleri düşürmüştür (Güdek, 2023). Bu dönemde, PLC ve SCADA sistemleri üretim hatlarının dijitalleşmesinde kritik rol oynamıştır (Mulyani et al., 2021). Otomasyonun yaygınlaşmasıyla birlikte programlanabilir mantık denetleyicileri (PLC'ler) ve robotik sistemlerin kullanımı, tekrarlayan işlerde insan müdahalesinin azaltılmasına olanak tanımış; üretim süreçlerinde hız ve hassasiyet önemli ölçüde artmıştır (Barata et al., 2018). PLC ve SCADA sistemleri, üretim hatlarının güvenilirliğini ve verimliliğini artırarak dijitalleşmenin temel yapı taşları haline gelmiştir. Elangovan (2021), bu sistemlerin yalnızca operasyonel süreçlerin kontrolünü kolaylaştırmakla kalmadığını, aynı zamanda veri toplama ve analiz yoluyla karar verme mekanizmalarını güçlendirdiğini vurgulamaktadır. Böylece otomasyon teknolojileri, modern sanayinin dijitalleşme sürecinde kritik bir rol üstlenmiştir.

Ayrıca bilgisayar destekli üretim (CAM) ve bilgisayarla entegre üretim (CIM) teknolojilerinin geniş çapta benimsenmesi, üreticilerin daha yüksek doğruluk ve kalite standartlarına ulaşmasını sağlamıştır (Frank et al., 2019). Endüstri 3.0 otomasyon sistemlerinin üretimde kullanılması, insan emeğini minimize ederek hata seviyesini düşürmüş ve üretimde otomasyonu sağlayan devrim olarak tanımlanmıştır. Bu dönemde makineler hissedilir ölçüde insanların yerini almaya başlamış ve küreselleşmenin yarattığı baskıyla birlikte firmalar maliyetleri düşürmek amacıyla makine kullanımına daha fazla yönelmiştir (Çetinkaya & Susam, 2021). İnternetin yaygınlaşması, iletişim ve veri alışverişini sürekli artırarak küreselleşmeyi hızlandırmış, işletmelerin uluslararası ölçekte faaliyet göstermesini kolaylaştırmıştır. George ve George (2020), bu gelişmenin üretim ve yönetim süreçlerinin yerel sınırların ötesinde yeniden yapılandırılmasına zemin hazırladığını belirtmektedir. Böylece Endüstri 3.0 yalnızca teknolojik bir dönüşüm değil, aynı zamanda küresel ölçekte ekonomik ve örgütsel yeniden yapılanmayı da beraberinde getirmiştir.

Tüm bu teknolojik ilerlemelere rağmen Endüstri 3.0 endüstriyel sistemlerin parçalı ve birbirinden kopuk yapısı nedeniyle sınırlı kalmış; söz konusu teknolojiler gerçek zamanlı veri paylaşımı ve bütüncül karar alma süreçleri için gerekli bağlantıları sağlayamamıştır (Liao et al., 2017).

Endüstri 3.0 döneminde otomasyon teknolojileri ve internetin yaygınlaşması, üretim süreçlerini dijitalleştirerek hem verimlilik hem de küresel rekabet açısından sanayiye yeni bir bakış açısı kazandırmıştır. Bu süreci açıklayan akademik çalışmalar, otomasyonun;

verimlilik, esneklik ve küreselleşme üzerindeki etkilerini vurgulamaktadır. Bu dönüşüm, Endüstri 4.0 ve sonrasında gelişen akıllı fabrikaların temelini oluşturmuştur.

2.4. Ağ Bağlantılı Akıllı Fabrikalar: Endüstri 4.0

Sanayi 3.0 ve Sanayi 4.0 arasındaki dönüşüm, üretim süreçlerinde insan-makine etkileşiminden makine-makine iletişimine geçişi ifade eden köklü bir model değişimi olarak değerlendirilmektedir. Sanayi 3.0'da makineler önceden yapılandırılmaya ihtiyaç duymakta, her değişiklikte insan müdahalesi gerekmekte ve üretim daha çok kitlesel, standart ürünlere dayalı olarak yürütülmektedir. Bu dönemde verimlilik, insan emeği ve makinenin kapasitesiyle sınırlı kalırken, stoklama ve envanter yönetimi üretim fazlasını karşılamaya yönelik olarak şekillenmiştir. Oysa Sanayi 4.0'da siber fiziksel sistemler, bulut bilişim ve büyük veri analizleri sayesinde akıllı makineler birbirleriyle iletişim kurarak üretim süreçlerini planlamakta, kontrol etmekte ve gerektiğinde durdurabilmektedir. Böylece müşteri odaklı, çeşitlilik içeren ve tam zamanlı üretim modeli mümkün hale gelmiş; stoklama ihtiyacı ortadan kalkmıştır (Davutoğlu, 2020). Endüstri 4.0'ın yapısı, üç temel unsur üzerine inşa edilmiştir: nesnelerin interneti, hizmetlerin interneti ve siber-fiziksel sistemler. Bu yapı sayesinde fiziksel işlemler dijital ortamda izlenebilmekte, sanal kopyalar oluşturulmakta ve merkezi olmayan karar alma süreçleri mümkün hale gelmektedir. Örneğin Alman Yapay Zekâ Araştırma Merkezi (DFKI) ve Siemens ortaklığında geliştirilen akıllı fabrika uygulaması, RFID (Radyo Frekansı ile Tanımlama Teknolojisi) etiketleri aracılığıyla ürünlerin makinelerle iletişim kurmasını sağlayarak üretim sürecinin başından itibaren dijital ortamda veri kaydını mümkün kılmıştır (endustri40.com, 2025). RFID, kablosuz iletişim teknolojilerinde temel olarak etiket veya okuyuculardan ve bunlara bağlı antenlerden oluşan, radyo frekansı aracılığı ile diğer kablosuz teknolojilerle entegre çalışabilen birçok alanda bilgi saklama, kontrol ve takip işlemini gerçekleştirebilen bir teknolojidir (Maraşlı & Çıbuk, 2015). Bu teknoloji, Endüstri 4.0'ın uygulanabilirliğini somut bir biçimde ortaya koymaktadır. Endüstri 4.0'ın avantajları, yalnızca üretim süreçlerinin verimliliğini artırmakla sınırlı değildir. Sistemlerin izlenmesi ve arıza teşhisinin kolaylaşması, bileşenlerin öz farkındalık kazanması, çevre dostu ve kaynak tasarrufu sağlayan sürdürülebilirlik, üretimde esneklik, maliyetlerin azaltılması ve yeni hizmet ile iş modellerinin geliştirilmesi bu dönüşümün öne çıkan katkılarıdır. Dolayısıyla Endüstri 4.0 teknolojik bir devrim olmanın ötesinde, ekonomik ve toplumsal dönüşümün de temel taşıdır (endustri40.com, 2025).

Endüstri 4.0 dördüncü sanayi devrimi olarak, önceki devrimlerin dijital temelini alıp, Siber-Fiziksel Sistemler (SFS), Nesnelerin İnterneti (IoT), bulut bilişim ve gerçek zamanlı teknolojilerin birleşimiyle akıllı üretimi merkeze almıştır (Kılıç, 2023). Endüstri 4.0 ile birlikte bu dönemde özellikle dikey entegrasyon, endüstriyel kablosuz ağlar, bulut bilişim ve akıllı nesneler (makineler, ürünler, konveyörler) arasındaki etkileşim ön plana çıkmaktadır. Bu etkileşim, esnek ve yeniden yapılandırılabilir üretim sistemlerinin kurulmasını, fabrikaların değişen müşteri taleplerine ve piyasa koşullarına hızla uyum sağlamasını hedeflemektedir. Akıllı fabrikalar yalnızca teknolojik değil aynı zamanda organizasyonel dönüşümü de beraberinde getirmiştir. IoT, bulut bilişim ile akıllı nesnelerin entegrasyonu geleceğin üretim sistemlerinin temelini oluşturmaktadır. Yapay zekâ (YZ) bu dönemde, sistem performansını ve rekabet gücünü artırmak için veri toplama ve analiz etme yetenekleriyle süreç optimizasyonunda kritik bir rol üstlenmiştir. Sensörler ve IoT cihazları

tarafından toplanan gerçek zamanlı veriler, YZ sistemlerinden beslenerek üretim hatlarındaki darboğazları ve verimsizlikleri belirlemek için kullanılmaktadır (Wang et al., 2016). Endüstri 4.0 Teknolojileri Tablo 3.'de sunulmuştur.

Tablo 3: Endüstri 4.0 Teknolojileri

4.0 Teknolojisi	Tanım	Uygulama Alanları	Katkıları
Siber Fiziksel Sistemler (CPS)	Fiziksel süreçleri dijital sistemlerle entegre eden yapılardır. Sensörler, kontrol sistemleri ve yazılım bileşenleri ile gerçek zamanlı veri alışverişi sağlar.	Akıllı fabrikalar, enerji sistemleri, ulaşım altyapısı, üretim hatları	Gerçek zamanlı izleme, otomasyon, üretim esnekliği, hata azaltımı
Bulut Bilişim	Donanım ve yazılım kaynaklarının internet üzerinden hizmet olarak sunulmasıdır. Kullanıcılar veri depolama ve işlem gücüne uzaktan erişebilir.	Üretim planlama, veri analizi, tedarik zinciri yönetimi	Maliyet azaltımı, esneklik, ölçeklenebilirlik, işbirliği kolaylığı
Katkı Maddesi Üretimi (3D Baskı)	Dijital modellerin katman katman işlenerek fiziksel ürünlere dönüştürülmesidir.	Prototipleme, medikal implantlar, kişiselleştirilmiş ürünler	Tasarım özgürlüğü, düşük maliyet, hızlı üretim, kişiselleştirme
Büyük Veri, Veri Madenciliği ve Analitiği	Üretimden gelen büyük hacimli verilerin toplanması, işlenmesi ve analiz edilmesidir.	Kalite kontrol, bakım planlama, müşteri analizi	Süreç optimizasyonu, karar destek, maliyet azaltımı, öngörü gücü
Yapay Zekâ (AI)	Makine öğrenimi ve algoritmalarla verilerden öğrenen ve karar veren sistemlerdir.	Tahminleme, kalite kontrol, bakım, müşteri hizmetleri	Otomasyon, hata tespiti, verimlilik artışı, kişiselleştirme
Cobot (İşbirlikçi Robot)	İnsanlarla güvenli şekilde çalışan robotlardır. Sensörlerle donatılmış, esnek ve programlanabilir robotlar.	Montaj, paketleme, ergonomik görevler	İş güvenliği, üretim esnekliği, insan-robot işbirliği
Artırılmış Gerçeklik (AR)	Gerçek dünya üzerine dijital bilgilerin bindirilmesi. Mobil cihazlarla entegrasyon	Bakım, eğitim, depo yönetimi, kalite kontrol	Hızlı karar alma, hata azaltımı, çalışan verimliliği
CAD/CAM	Bilgisayar destekli tasarım ve üretim sistemleri. Ürünlerin dijital ortamda modellenmesini sağlar.	Ürün geliştirme, prototipleme, üretim planlama	Tasarım doğruluğu, üretim hızı, kalite artışı
MES/SCADA	Üretim süreçlerini izleyen ve yöneten sistemler. Gerçek zamanlı veri ile üretim performansı artırılır.	Üretim takibi, kalite kontrol, süreç yönetimi	İzlenebilirlik, şeffaflık, verimlilik, hata önleme
Sensörleme	Fiziksel ortamdan veri toplayan cihazlar. Sıcaklık, basınç, titreşim gibi parametreleri ölçer.	Üretim hatları, bakım sistemleri, çevresel izleme	Karar destek, otomasyon, kalite izleme, erken uyarı
Nesnelerin İnterneti (IIoT)	Fiziksel cihazların internete bağlanarak veri alışverişi yapar. Sensörler, makineler ve yazılımlar arasında sürekli iletişim kurar, Üretim süreçlerinin daha akıllı ve verimli hale gelmesini sağlar.	Makine izleme, enerji yönetimi, üretim entegrasyonu	Gerçek zamanlı veri, sistem entegrasyonu, süreç verimliliği

Kaynaklar: Lee vd. (2014); Yavari & Pilevari (2020); Zhou vd. (2015)

Tablo 3'de adı geçen teknolojilerin entegrasyonu ve bütünleşmesiyle, endüstrilerin dijitalleşme süreci daha hızlı gerçekleşmekte ve endüstri 4.0 hedeflerine daha hızlı

ulaşılmaktadır. Bu teknolojiler özellikle kişiselleştirilmiş ürünlerin müşteri taleplerine göre hızlı ve esnek şekilde yeniden yapılandırılması, siparişe özel üretim sıralamasının yapılması, zamanında teslimat ve müşteri memnuniyetini artmasını sağlarken, stok maliyetlerinin de azalmasını sağlamaktadır (Yavari & Pilevari, 2020).

Ayrıca akıllı fabrikalarda siber-fiziksel sistemler, insan emeğini tamamlayarak karar süreçlerini daha etkin biçimde yürütmektedir. Bununla birlikte, bu sistemlerin işleyişinde kullanılan algoritmaların tasarımı, güncellenmesi ve korunması hâlâ insan katkısına bağlıdır. Dolayısıyla Endüstri 4.0 insan ve makine arasındaki işbirliğini yeniden tanımlayan, teknolojik kapasite ile insan yaratıcılığının birbirini desteklediği yeni bir üretim anlayışını ortaya koymaktadır (Wu et al., 2024). Endüstri 4.0'ın sağladığı sistemlerin tam entegrasyonu ile işçilik maliyeti düşük üretimler yerini, yüksek katma değerli üretimlere geçişe ve bu ürünlerin rekabetine bırakmıştır (Alçın, 2016).

Tüm bunlara ilaveten endüstriye entegre olan dijital teknolojiler, işletme yönetimi ve pazar koşulları dönüşümünü de beraberinde tetiklemektedir. Bu tetikleyiciler sonucunda iş modelleri, organizasyon yapısı ve iş süreçleri de dönüşmektedir. Özellikle müşteri ilişkileri ve ürün geliştirmede kullanılan yapay zekâ ve dijital teknolojiler işletmelerde örgütsel yapıyı ve süreçleri değiştirmektedir. Böylece gelişen teknoloji ve değişen müşteri ihtiyaçları karşısında iş modelleri, süreçleri dönüştürürken, süreçler de organizasyon yapısını dönüştürmektedir (Klein, 2020). Endüstri 4.0 ile birlikte dönüşen yönetimsel ve örgütsel uygulamalar iş gücü piyasasında da çok daha nitelikli iş gücüne ihtiyacı ortaya koymaktadır (Nalbant & Aydın, 2025). Endüstri 4.0'ın temel faydaları Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4: Endüstri 4.0'ın Temel Faydaları

Fayda	Açıklama
Verimlilik	Otomasyon sistemlerinin ve Endüstri 4.0'ın diğer bileşenlerinin kullanımıyla üretkenlik artar. Farklı araçların kullanımı sayesinde insan gücüne olan ihtiyaç azalırken, ürün kalitesi yükselir ve kayıplar minimize edilir.
Çeviklik	Yüksek standartlaşma ve düşük hacimli üretim sayesinde esneklik artar. Bu da kuruluşların müşteri ihtiyaçlarına hızlı ve etkili şekilde yanıt verme yeteneğini geliştirir.
Yenilikçilik	Endüstri 4.0, ürün çeşitliliği ve düşük hacimli üretim özellikleriyle yenilik için uygun bir ortam sunar. Yeni ürünlerin tanıtımı ve test edilmesi kolaylaşır. Müşteri ihtiyaçlarına hızlı yanıt verme ve doğru bilgiye erişim, doğru ürünün doğru zamanda pazara sunulmasını sağlar.
Müşteri Deneyimi	Dönüşüm için yapılan ilk yatırımlara rağmen, kalite farklılıklarının azalması, daha az malzeme israfı ve personel/operasyon maliyetlerinin düşmesiyle maliyetler zamanla azalır. Bu durum müşteri memnuniyetini artırır.
Gelir Artışı ve Maliyet Azaltımı	Daha kaliteli ürün ve hizmetlerin daha düşük maliyetle sunulması, mevcut müşterilerin memnuniyetini artırır. Bu da daha büyük pazarlara ve daha fazla müşteriye erişimi kolaylaştırır.

Kaynak: (Paschek et al., 2019).

Tablo 4, Endüstri 4.0'ın işletmelere sağladığı çok boyutlu faydaları bütüncül bir şekilde özetlenmektedir. Otomasyon ve dijitalleşme sayesinde verimlilik artarken, insan hataları azalmakta ve üretim süreçleri daha kaliteli ve kayıpsız hale gelmektedir. Yüksek düzeyde standartlaşma ve esnek üretim altyapısı, işletmelerin çevikliğini artırarak müşteri taleplerine hızlı ve etkili yanıt verebilmesini sağlamaktadır. Ürün çeşitliliği ve düşük hacimli üretim yapısı, yenilikçiliği teşvik ederken; doğru zamanda doğru ürünü pazara sunma becerisi,

rekabet avantajı sağlamaktadır. Dönüşüm maliyetlerine rağmen, zamanla azalan operasyonel giderler ve artan kalite, müşteri deneyimini iyileştirir. Sonuç olarak, hem maliyetlerin düşmesi hem de müşteri memnuniyetinin artması, işletmelerin daha geniş pazarlara açılmasını ve gelirlerini artırmasını kolaylaştırmaktadır. Bu faydalar, Endüstri 4.0'ın sadece teknolojik değil, aynı zamanda stratejik bir dönüşüm olduğunu açıkça göstermektedir.

Diğer taraftan Fraunhofer (2013) ise çalışmasında Endüstri 4.0'ın üretim dünyasında köklü bir dönüşüm yaratacağını, bunun hem büyük fırsatlar hem de ciddi riskler barındırdığını ortaya koymaktadır. Çalışmada insan–makine işbirliği, veri güvenliği riski ve iş gücü eğitimi kritik başarı faktörleri olarak öne çıkmaktadır. Dijitalleşme ile birlikte siber saldırı risklerinin artabileceğini bununda veri güvenliği riskini doğurabileceğini ifade etmiştir. Ayrıca çalışanların yeni beceriler kazanması gerektiğini, aksi halde işsizlik riskinin de doğma olasılığından bahsetmektedir. Çalışmada özellikle işçi–işveren ilişkilerinin de yeniden şekillenebileceğine vurgu yapılmaktadır.

2.5. Yapay Zekâ Çağı ve İnsan Merkezli Dönüşüm: Endüstri 5.0

Endüstri 5.0 Endüstri 4.0'ın verimlilik sapmasını düzelterek, teknolojik gelişimin merkezine insanı konumlandırmakta, sürdürülebilir ve esnek bir endüstriye geçişi temsil etmektedir. Endüstri 5.0 kişiselleştirme, insan-makine işbirliği ve sürdürülebilir üretimi teşvik etmektedir. Endüstri 5.0'da yapay zekânın (YZ) rolü, Endüstri 4.0'dakinden farklıdır. Endüstri 5.0'da yapay zekânın rolü; insan yaratıcılığını otomasyonla daha akıllı ve uyarlanabilir olarak bütünleştirerek endüstriyel süreçleri kolaylaştırmaktır. Bu durum YZ'nın sadece verimlilik artırma aracı olmaktan çıkıp, insan yaratıcılığının kognitif destekçisi haline dönüşmesi anlamına gelmektedir. Bu yaklaşım, iş gücünün görevlerini YZ'ye kaptırma korkusu yerine, YZ'yi kullanarak daha yüksek değerli, yaratıcılık gerektiren görevlere odaklanmasını sağlamaktadır (Nalbant & Aydın, 2025).

Endüstri 5.0 insan-makine iş birliği, yapay zekâ ve siber-fiziksel sistemlerin otonom kapasitesini insanın yaratıcı problem çözme ve etik değerlendirme becerileriyle birleştiren hibrit bir düzen üzerine kuruludur. Bu birliktelik, üretim hatlarında esneklik ve güvenliği artırırken, müşteri tercihlerini tasarım aşamasından itibaren dikkate alarak kişiselleştirilmiş ve küçük ölçekli üretimi ekonomik hale getirebilir (Koska, 2025).

Sürdürülebilirlik Endüstri 5.0'ın en önemli hedeflerinden biridir. Döngüsel ekonomi ilkeleriyle kaynak verimliliğini artırmak, sıfır atık yaklaşımını benimsemek ve karbon nötr üretime geçiş yapmak bu vizyonun temel unsurlarıdır. Ekodizayn ve kapalı döngü tedarik zincirleri, çevre dostu politikaların rekabet gücüyle uyumlu olduğunu; riskleri azaltarak uzun vadeli dayanıklılığı güçlendirdiğini göstermektedir. Bu çerçeve aynı zamanda robotik, yapay zekâ gibi alanlarda yeni iş modelleri ve istihdam fırsatları yaratmaktadır (Sarışık ve Demir, 2025).

Bununla birlikte, Endüstri 5.0'ın uygulanması bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Kurumsal kültürün dönüşümü, yüksek entegrasyon maliyetleri, çevresel hedeflerde standart eksiklikleri, iş gücünün yeniden eğitilmesi ve ülkeler arasındaki gelişmişlik farkları bu sürecin önündeki engeller olarak öne çıkmaktadır (Koska, 2025). Bu nedenle çok paydaşlı yönetişim, açık standartlar, kamu-özel iş birlikleri ve yaşam boyu öğrenme ekosistemleri kritik öneme sahiptir. Toplum 5.0'ın kapsayıcı dijital dönüşüm

ilkeleri ise beceri dönüşümünün sosyal adalet ve erişilebilirlik ekseninde yönetilmesine katkı sağlamaktadır (Çalış Duman, 2022).

Sonuç olarak Endüstri 5.0 insan zekâsı ve yaratıcılığını makinelerin hesaplama gücüyle birleştirerek kişiselleştirilmiş üretim, çevre dostu politikalar ve yeni istihdam alanlarını bütüncül bir sanayi vizyonunda bir araya getirmektedir. Bu vizyon, etik ve açıklanabilir yapay zekâ, döngüsel değer zincirleri ve müşteri odaklı tasarımın kurumsallaştırılmasıyla daha da güçlenebilir. Politika düzeyinde standartlaştırma, yeşil finansman ve kapsayıcı eğitim reformlarıyla desteklendiğinde ise sürdürülebilir ve dayanıklı bir endüstriyel dönüşümün gerçekleşmesi mümkün olacaktır (Sarışık & Demir, 2025; Koska, 2025; Çalış Duman, 2022).

Ayrıca üretim sistemlerinin yaşam döngüsü artık yalnızca verimlilik ve güvenilirlik değil, ekolojik taleplerin de karşılanmasını gerektirmektedir. Bu noktada Endüstri 5.0, Endüstri 4.0'ın teknolojik temelleri üzerine insan merkezli ve sürdürülebilir yaklaşımlar eklemeyi hedeflemektedir (Petrescu et al., 2023). İnsan-makine entegrasyonu, yeşil üretim ve karbon nötrlük gibi ilkelerle çalışan sayısını koruyarak süreç performansını artırmayı amaçlayarak, yaratıcılık ve bilişsel yetenekleri robotik çözümlerle birleştirmektedir (Xu et al., 2021). Son olarak, dijital ikizler ve yapay zekâ destekli sanal-fiziksel entegrasyon teknolojileri, süreçlerin izlenmesi, risklerin yönetilmesi ve arıza sürelerinin azaltılması yoluyla üretim sistemlerini daha güvenilir, esnek ve sürdürülebilir hale getirmektedir (Petrescu et al., 2023). Böylece Endüstri 5.0 teknolojik verimliliği, insan zekâsı ve çevresel sorumlulukla bütünleştirerek, geleceğin üretim modelini şekillendirmektedir.

Endüstri 5.0'ın yapay zekâ ile kurduğu ilişki, yalnızca üretim süreçlerinin otomasyonu değil, aynı zamanda insan zekâsı ile teknolojik zekânın bütünleşmesi açısından kritik bir dönüm noktasıdır. Bu bağlamda, yapay zekâ sistemleri artık tek başına karar verici değil; insanın yaratıcılığını, sezgilerini ve toplumsal değerlerini destekleyen bir ortak akıl mekanizması olarak konumlanmaktadır. Nguyen ve Tran'ın (2023) ortaya koyduğu "Artırılmış Zekâ" kavramı, bu iş birliğinin somut bir göstergesidir. Benzer şekilde, Adel'in (2022) vurguladığı dijital ikizler ve işbirlikçi robotlar, insan-makine etkileşimini daha sezgisel ve güvenli hale getirerek üretim ortamında yeni bir öğrenme kültürü yaratmaktadır.

Endüstri 5.0'ın önemli katkılarından bir diğeri de, Martini ve arkadaşlarının da (2024) belirttiği gibi, insan emeğinin yeniden canlandırılmasıdır. Ancak bu canlanma, klasik anlamda fiziksel iş gücünün geri dönüşü değil; insanın entelektüel kapasitesi, yaratıcılığı ve problem çözme becerilerinin akıllı sistemlerle bütünleşmesi anlamına gelmektedir. Dolayısıyla Endüstri 5.0 yapay zekâyı bir ikame unsuru olarak değil, insan merkezli kalkınmanın hızlandırıcısı olarak görmektedir.

Sürdürülebilir üretim modelleri ile toplumsal refah arasındaki bağı güçlendirerek, geleceğin sanayi toplumunu daha kapsayıcı, daha esnek ve daha insani bir zemine taşıyacak bu dönüşümde yapay zekâ bir otomasyon aracı olmaktan çıkıp, insan yaratıcılığının kognitif destekçisi rolünü üstlenmektedir. Özellikle makinelerin otonom kararlar vereceği bir sürece girilmesi, gelişen akıllı sistemlerin başarısının ve karmaşıklığının artması, bu sistemlerin anlaşılabilirliğinin azalması, toplumsal şüpheleri de beraberinde getirmiştir. Bu nedenle Endüstri 5.0'ın önündeki engellerin başında, geliştirilecek zeki sistemlere karşı oluşabilecek toplumsal önyargıların giderilmesi gerekmektedir (Canbay, 2021).

Endüstri 5.0'ın getirdiği teknolojik ve etik zorlukların yönetilmesi için disiplinler arası işbirliklerinin artırılması, siber güvenlik ve yapay zekânın etik boyutları konuları üzerine odaklanılması ve çalışmaların artırılması önyargıların giderilmesinde etkili olabilir.

3. Endüstri 4.0 ve Endüstri 5.0 Karşılaştırmalı Analizi

İncelenen literatür neticesinde Endüstri 4.0 ve Endüstri 5.0'ın karşılaştırmalı analizi Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo 5: Endüstri 4.0 ve Endüstri 5.0 Karşılaştırmalı Analizi

Özellik	Endüstri 4.0	Endüstri 5.0
Temel Odak	Teknoloji odaklı dijitalleşme, otomasyon, akıllı sistemler	İnsan-merkezli yaklaşım, insan-makine iş birliği, sürdürülebilirlik
Avantajlar	Üretim süreçlerinde hız ve verimlilik artışı Büyük veri ve IoT ile gerçek zamanlı analiz Küresel rekabet gücü Akıllı fabrikalar sayesinde maliyet optimizasyonu Tedarik zincirinde şeffaflık ve entegrasyon	İnsan zekâsı ve yaratıcılığının makinelerle entegrasyonu Kişiselleştirilmiş üretim ve müşteri odaklılık Sıfır atık ve yeşil üretim hedefleri Çevre dostu politikalar ve karbon nötr yaklaşım Yeni iş modelleri ve istihdam alanları (robotik, yapay zekâ, bakım)
Zorluklar	Yüksek yatırım maliyetleri Uzman insan kaynağı ihtiyacı Veri güvenliği ve siber saldırı riskleri Küçük işletmeler için adaptasyon güçlüğü İnsan rolünün azalmasıyla iş gücü kaygıları	İnsan-makine iş birliği için kültürel ve organizasyonel dönüşüm ihtiyacı Yeni teknolojilerin entegrasyonu için yüksek maliyet Çevresel hedeflerin uygulanmasında regülasyon ve standart eksiklikleri İş gücünün yeniden eğitilmesi gerekliliği Küresel ölçekte farklı gelişmişlik düzeylerinin uyum sorunları
Müşteri Odaklılık	Dijitalleşme ile hızlı yanıt ve süreç optimizasyonu	Tasarım aşamasında müşteri tercihlerini entegre eden kişiselleştirilmiş üretim
Çevresel Etki	Kaynak kullanımının optimize edilmesi	Karbon nötr üretim, sıfır atık, sürdürülebilir üretim
Ekonomik Katkı	Küreselleşme ve dijital dönüşümle rekabet avantajı	Çevre dostu iş modelleri, yeni iş alanları ve küresel ekonomik canlanma
İnsan Rolü	Daha çok otomasyonun gölgesinde, süreçlerin dijital kontrolü	İnsan zekâsı, yaratıcılığı ve karar verme süreçlerinde aktif rol

(Yazar tarafından oluşturulmuştur.)

Endüstri 4.0 üretim süreçlerinde otomasyon ve dijitalleşmeyi ön plana çıkarırken, Endüstri 5.0 insan-makine iş birliğini, kişiselleştirilmiş üretimi ve sürdürülebilirliği temel alır (Nalbant & Aydın, 2025; Koska, 2025; Xu et al., 2021). Endüstri 5.0 teknolojiyi insanın yaratıcılığı, duygusal zekâsı ve etik değerleriyle bütünleştirerek, üretim süreçlerini daha esnek, çevreci ve toplumsal açıdan sorumlu hale getirmektedir (Martini et al., 2024; Adel, 2022).

Endüstri 4.0, üretim süreçlerinde dijitalleşme ve otomasyonun ön plana çıktığı bir dönemi temsil eder. Akıllı fabrikalar, büyük veri ve IoT sayesinde süreçler daha hızlı, verimli ve küresel ölçekte rekabetçi hale gelir. Ancak bu yaklaşımda insan faktörü geri planda kalır;

makineler ve algoritmalar üretim süreçlerini kontrol ederken, iş gücü daha çok sistemlerin gölgesinde kalır. İnsan emeği bu yeni dönemde sınırlı bir rol üstlenirken, karar alma süreçleri yapay zekâ destekli robotlara devredilmiştir. Dolayısıyla bu iki sanayi devrimi arasındaki temel fark, insanın üretim sürecindeki belirleyici rolünden, makinelerin kendi aralarında kurduğu akıllı iletişim ve entegrasyon sistemleri aracılığıyla üretimi yöneten bir yapıya geçiş olarak özetlenebilir. Bu durum verimlilik açısından avantaj sağlasa da iş gücü kaygılarını ve adaptasyon sorunlarını beraberinde getirir.

Endüstri 5.0 ise insan zekâsı ve yaratıcılığı, makinelerin hız ve hassasiyetiyle birleşerek daha kapsayıcı ve sürdürülebilir bir üretim modeli oluşturur. Kişiselleştirilmiş üretim, müşteri odaklılık ve çevre dostu politikalar bu dönemin temel özellikleridir. Karbon nötr üretim, sıfır atık hedefleri ve yeni iş modelleri, Endüstri 5.0'ın yalnızca ekonomik değil aynı zamanda sosyal ve çevresel katkılarını da vurgular.

Endüstri 4.0 daha çok teknoloji ve verimlilik odaklı bir dönüşüm sağlarken, Endüstri 5.0 insan-merkezli ve sürdürülebilir bir vizyon sunar. Bu iki yaklaşım birbirini tamamlar: 4.0'ın dijital altyapısı olmadan 5.0'ın insan-makine iş birliği mümkün değildir; 5.0 olmadan ise 4.0'ın yarattığı verimlilik toplumsal ve çevresel değerlerle bütünleşemez. Endüstri 4.0 daha çok teknoloji odaklı bir devrim olarak üretim süreçlerini dijitalleştirmiş, hız ve verimlilik sağlamıştır. Ancak yüksek maliyetler, siber güvenlik riskleri ve iş gücü kaygıları önemli zorluklar olarak öne çıkmaktadır.

Endüstri 5.0 ise üretim süreçlerini insan zekâsı ve yaratıcılığı ile birleştirerek insan-merkezli, sürdürülebilir ve çevre dostu bir üretim anlayışı geliştirmiştir. Avantajları arasında sıfır atık, kişiselleştirilmiş üretim ve yeni iş modelleri bulunurken; zorlukları arasında kültürel dönüşüm, maliyetler ve küresel uyum sorunları yer almaktadır.

3. Sonuç

Sanayi Devrimi'nin ilk aşaması Birinci Sanayi Devrimi (1.0), su ve buhar gücüyle üretimin makineleşmesini sağlayarak demir-çelik ve tekstil sektörlerinde büyük ilerlemeler yaratırken ulaşım ağlarını da beraberinde geliştirmiştir. İkinci aşama olan İkinci Sanayi Devrimi (2.0) ile de üretim süreçleri köklü bir dönüşüm geçirmiştir. Elektriğin sağladığı güç sayesinde montaj hattı gelişmiş ve her işçi yalnızca küçük bir görevi yerine getirerek ürünün tamamına katkı sağlamıştır; bu durum iş bölümünü daha ayrıntılı bir hale getirmiştir. Bu yeni düzen, işçilerin teknik beceriler kazanmasını zorunlu kılmış; iş bölümü, basit bir iş paylaşımından çıkarak uzmanlaşma, departmanlaşma ve teknik bilgiye dayalı bir üretim sistemine evrilmiştir.

Dijitalleşmenin ve dönüşümün başlangıcı olan Endüstri 3.0 döneminde ise üretimde kalite yönetimi ve süreç iyileştirme daha çok manuel veri toplama ve istatistiksel yöntemlere dayanırken, Endüstri 4.0 ile otomatik veri toplama, yapay zekâ destekli analiz ve siber-fiziksel sistemlerle bu yaklaşımı ileriye taşımıştır. Kablosuz bağlantılar ve ağ tabanlı entegrasyon, makineler, insanlar ve süreçler arasında güvenilir ve akıcı bir kontrol döngüsü oluşturmuştur (Kusiak, 2017). Bu döngü, yalnızca üretim verimliliğini artırmakla kalmamış; aynı zamanda organizasyonların yeni iş değeri yaratmasına, kaynak kullanımını optimize etmesine ve ekipler arası iş birliğini güçlendirmesine de katkı sağlamıştır (Güdek, 2023).

Endüstri 4.0 siber-fiziksel sistemleri ve yapay zekâyı kullanarak verimliliği artırmış ve maliyetleri düşürmüştür. Endüstri 5.0'da bu teknolojik ilerlemeye etik sorumluluk, sürdürülebilirlik ve insan merkezli tasarım gibi yeni boyutlar ekleyerek Endüstri 4.0'ın eksik bıraktığı sosyal ve çevresel hedefleri merkeze almıştır (Nalbant ve Aydın, 2025).

Endüstri 5.0 Endüstri 4.0'ın teknoloji merkezli otomasyon ve dijitalleşme yaklaşımının da üzerinde, insanı, sürdürülebilirliği ve toplumsal sorumluluğu üretim süreçlerinin merkezine yerleştiren bütüncül bir değişimi temsil etmektedir. İnsan merkezli yapay zekâ (HCAI), cobot'lar, döngüsel ekonomi, enerji verimliliği ve etik iş modelleri gibi unsurlar, Endüstri 5.0'ın temel yapı taşlarını oluşturmaktadır. Bu yeni sanayi devrimi, yalnızca teknolojik inovasyonları değil, aynı zamanda insan refahı, çevresel koruma ve toplumsal fayda gibi değerleri de önceliklendirmektedir.

Sanayi devrimlerinin gelişim süreci, her zaman yeni teknolojilerin ortaya çıkışıyla ivmelenmiş, bu teknolojilerin daha etkin biçimde kullanılabilmesi için ileri düzey yöntemlerin geliştirilmesini beraberinde getirmiştir. Bu çerçevede, Birinci ve İkinci Sanayi Devrimleri aynı üretim döngüsünün farklı aşamalarını temsil ederken, Üçüncü ve Dördüncü Sanayi Devrimleri dijitalleşme ve siber-fiziksel sistemlerin entegrasyonu ile yeni bir döngüyü ifade etmektedir. Günümüzde ise yapay zekâ teknolojilerinin merkezde yer aldığı Beşinci Sanayi Devrimi, önceki döngülerin doğal bir devamı olarak görülmekte; insan-makine işbirliği, kişiselleştirilmiş üretim ve sürdürülebilirlik ilkeleriyle sanayileşme sürecinin çağdaş uzantısını oluşturmaktadır. Endüstri 5.0'ın başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için, teknolojik altyapının güçlendirilmesi, veri güvenliği ve etik standartların geliştirilmesi, iş gücünün sürekli eğitimi ve toplumsal sorumluluk bilincinin yaygınlaştırılması gerekmektedir. Ayrıca, ulusal ve uluslararası düzeyde politika ve standartların oluşturulması, sektörler arası işbirliği ve inovasyonun teşvik edilmesi büyük önem taşımaktadır. Endüstri 5.0 insan ve toplumun ihtiyaçlarını gözeten, sürdürülebilir ve etik bir sanayi vizyonu sunmaktadır. Bu vizyonun hayata geçirilmesi, yalnızca sanayi ve iş dünyasının değil, tüm paydaşların ortak çabasıyla mümkündür. Geleceğin üretim ekosisteminde, insan ve teknoloji arasındaki uyum, sürdürülebilir kalkınma ve toplumsal refahın anahtarı olacaktır.

Bu çalışma ile Endüstri 1.0'dan, Endüstri 5.0'a uzanan tarihsel ve teknolojik ilerleme döngüsü incelenerek, her aşamanın üretim süreçlerine getirdiği temel yenilikler ile bu yeniliklerin doğurduğu sınırlılıklar ortaya konulmaya çalışılmıştır. Özellikle Endüstri 4.0'ın başarıyla sağladığı yüksek verimlilik ve otomasyon seviyesine rağmen, etik, sosyal ve çevresel hedeflerdeki eksiklikler nedeniyle yeni bir dönüşümün (Endüstri 5.0) kaçınılmaz hale geldiği yapılan literatür taraması ile netleştirilmiştir. Endüstri 4.0'ın teknoloji merkezli ve kâr odaklı yaklaşımının aksine, Endüstri 5.0'ın insan merkezli tasarım (HCAI), sürdürülebilirlik ve toplumsal sorumluluğu temel alan ve üretim felsefesine entegre edilen değer odaklı bir değişimin temsilcisi olduğu tespit edilmiştir.

Sanayileşme sürecinin artık sadece ekonomik büyümeyi değil, insan ve toplumun refahını gözeten etik ve sürdürülebilir bir geleceğe doğru evrildiği düşünülürse işletmelerin öncelikle dijitalleşme, veri analitiği ve yapay zekâ entegrasyonu gibi teknolojik temellere odaklanmaları gerekirken; aynı zamanda insan-merkezlilik, sürdürülebilirlik ve esneklik kavramlarını da stratejilerinin merkezine yerleştirmeleri kritik önem taşımaktadır. Sanayide akıllı fabrikalar, nesnelerin interneti (IoT) ve siber-fiziksel sistemler aracılığıyla üretim

süreçlerini optimize etmek, enerji verimliliğini artırmak ve kaynak kullanımını daha sürdürülebilir hale getirmek işletmelerin temel hedefleri arasında yerini almalıdır. Bunun yanında, Endüstri 5.0'ın öne çıkardığı insan–makine işbirliği, çalışanların dijital becerilerle donatılması ve toplumsal faydayı gözeten üretim anlayışı, işletmelerin uzun vadeli rekabet gücünü belirleyecektir. Dolayısıyla, teknolojik dönüşümün yanında etik değerler, çevresel sorumluluk ve sosyal kapsayıcılık da işletmelerin odaklanması gereken temel kavramlar arasında yer almalıdır.

Kaynakça

Adel, A. (2022). Future of industry 5.0 in society: Human-centric solutions, challenges and prospective research areas. Journal of Cloud Computing, 11(1), 1–15.

Alçın, S. (2016). Üretim için yeni bir izlek: Sanayi 4.0. Journal of Life Economics, 8, 19–30.

Ateş, H., & Çöpoğlu, M. (2015). Kamu yönetimi ve çalışma hayatında esneklik. Bilgi Ekonomisi ve Yönetimi Dergisi, 10(1).

Barata, J., da Cunha, P. R., & Stal, J. (2018). Mobile supply chain management in the Industry 4.0 era: An annotated bibliography and guide for future research. Journal of Enterprise Information Management, 31(1), 173–192. https://doi.org/10.1108/jeim-09-2016-0156

Canbay, P. (2021). Endüstri 5.0'a doğru: Zeki otonom sistemlerde etik ve ahlaki sorumluluklar. Bilişim Teknolojileri Online Dergisi, 12(45).

Çalış Duman, M. (2022). Toplum 5.0: İnsan odaklı dijital dönüşüm. Journal of Social Policy Conferences. Advance online publication. https://doi.org/10.26650/jspc.2022.82.1008072

Çetinkaya, G., & Susam, N. (2021). Dördüncü sanayi devriminde kamu ortak gelişmeler: Seçilmiş ülkeler ve Türkiye karşılaştırması. Hayat Ekonomisi Dergisi, 8(4), 413–429.

Davutoğlu, N. A. (2020). Üçüncü ve dördüncü sanayi devrimleri arasındaki temel ve sistematik farklılıkların determinist bir yaklaşımla analizi. Management and Political Sciences Review, 2(1), 176–194.

Elangovan, U. (2021). Industry 5.0: The future of the industrial economy. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003190677

Endüstri 4.0 Platformu. (2025, 18 Kasım). Endüstri tarihine kısa bir yolculuk. https://endustri40.com/endustri-tarihine-kisa-bir-yolculuk/

Frank, A. G., de Sousa Mendes, G. H., Ayala, N. F., & Ghezzi, A. (2019). Servitization and Industry 4.0 convergence in the digital transformation of product firms: A business model innovation perspective. Technological Forecasting and Social Change, 141, 341–351. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.01.014

Fraunhofer IAO. (2013). Produktionsarbeit der Zukunft—Industrie 4.0. Frauenhofer IAO. https://www.busol.de/Fraunhofer-IAO-Studie_Produktionsarbeit_der_Zukunft-Industrie_4_0.pdf

George, A. S., & George, A. H. (2020). Industrial revolution 5.0: The transformation of the modern manufacturing process to enable man and machine to work hand in hand. Journal of Seybold Report, 15(9), 214–234.

Güdek, B. (2023). Endüstriyel dönüşüm ve Endüstri 5.0. Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 16(4), 1129–1142.

Hobsbawm, E. J. (1999). Industry and empire: The birth of the industrial revolution. London: Penguin Books.

Kılıç, R. (2023). Sanayi devrimlerinin serüveni: Endüstri 1.0'dan Endüstri 5.0'a. Takvim-i Vekayi, 11(2), 276–291.

Kılıç, S., & Alkan, R. (2018). Dördüncü sanayi devrimi Endüstri 4.0: Dünya ve Türkiye değerlendirmeleri. Girişimcilik İnovasyon ve Pazarlama Araştırmaları Dergisi, 2(3), 29–49.

Klein, M. (2020). Digital transformation in businesses and its drivers. Journal of Business in the Digital Age, 3(1), 24–35.

Koska, A. (2025). Geleceğin üretim devrimi olarak Endüstri 5.0: Kavramsal bir değerlendirme. İktisadi İdari ve Siyasal Araştırmalar Dergisi, 10(27), 622–637. https://doi.org/10.25204/iktisad.1657113

Kusiak, A. (2017). Smart manufacturing must embrace big data. Nature, 544(7648), 23–25.

Landes, D. S. (1969). The unbound Prometheus: Technological change and industrial development in Western Europe from 1750 to the present. Cambridge: Cambridge University Press.

Lee, J., Kao, H.-A., & Yang, S. (2014). Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment. Procedia CIRP, 16(1), 3–8.

Liao, Y., Deschamps, F., de Freitas Rocha Loures, E., & Ramos, L. F. P. (2017). Past, present and future of Industry 4.0: A systematic literature review and research agenda proposal. International Journal of Production Research, 55(12), 3609–3629. https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576

Maraşlı, F., & Çıbuk, M. (2015). RFID Teknolojisi ve Kullanım Alanları. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, *4*(2), 249-275.

Martini, B., Bellisario, D., & Coletti, P. (2024). Human-centered and sustainable artificial intelligence in Industry 5.0: Challenges and perspectives. Sustainability, 16(13), 5448.

Mokyr, J. (1990). The lever of riches: Technological creativity and economic progress. Oxford: Oxford University Press.

Mosleuzzaman, M. D., Arif, I., & Siddiki, A. (2024). Design and development of a smart factory using Industry 4.0 technologies. Academic Journal on Business Administration Innovation & Sustainability, 4(4), 89–108. https://doi.org/10.69593/ajbais.v4i04.131

Mulyani, M. A., Yusuf, S., Siregar, P., Nurihsan, J., Razzaq, A., & Anshari, M. (2021). Fourth industrial revolution and educational challenges. In 2021 International Conference on Information Management and Technology (ICIMTech).

Nalbant, K. G., & Aydın, S. (2025). Endüstri 4.0'dan Endüstri 5.0'a geçiş: Dijital dönüşümde yapay zekâ ve metaverse'in rolü. Sosyal, Beşeri ve İdari Bilimler Dergisi, 8(1), 41–54. https://doi.org/10.26677/TR1010.2025.1502

Nair, G. (2025). Tarım devriminden yapay zekâ ya bilginin toplumsallığı bağlamında Sanayi 4.0 ve bilgi toplumu tartışmaları. Politik Ekonomik Kuram, 9(3), 1338–1350.

Nguyen, H. D., & Tran, K. P. (2023). Artificial intelligence for smart manufacturing in Industry 5.0: Methods, applications, and challenges. In K. P. Tran (Ed.), Artificial intelligence for smart manufacturing (pp. xx–xx). Springer.

O'Brien, P. (2017). Was the first industrial revolution a conjuncture in the history of the world economy? Economic History Working Papers, No. 259/2017. London School of Economics.

Paschek, D., Mocan, A., & Draghici, A. (2019). Industry 5.0—The expected impact of next industrial revolution. In Thriving on future education, industry, business, and society: Proceedings of the MakeLearn and TIIM International Conference (pp. 125–132).

Peker, H. S., & Arslanoğlu, H. (2017). Sanayi 4.0'ın enerji güvenliğine olası etkileri. Güvenlik Stratejileri, 11(2), 133–149.

Petrescu, M. G., Neacşa, A., Laudacescu, E., & Tanase, M. (2023). Energy in the era of Industry 5.0: Opportunities and risks. In C. F. Machado & J. P. Davim (Eds.), Industry 5.0: Creative and innovative organizations (pp. 71–90). Springer.

Sarıışık, G., & Demir, S. (2025). Industry 5.0: Sürdürülebilir ve dayanıklı endüstriyel dönüşüm için insan merkezli bir paradigma. *Sosyal Perspektif Çalışmaları Dergisi, 2*(2), 50–66. https://doi.org/10.5281/zenodo.15358434

Sharma, A., & Singh, B. J. (2020). Evolution of industrial revolutions: A review. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 9*(11), 66–73.

Wang, S., Wan, J., Li, D., & Zhang, C. (2016). Implementing smart factory of Industrie 4.0: An outlook. *International Journal of Distributed*. https://doi.org/10.1155/2016/3159805

Wu, K., Xu, J., & Zheng, M. (2024). Industry 4.0: Review and proposal for implementing a smart factory. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 133*(5–6), 1331–1347. https://doi.org/10.1007/s00170-024-13839-7

Yavari, F., & Pilevari, N. (2020). Industry revolutions development from Industry 1.0 to Industry 5.0 in manufacturing. *Journal of Industrial Stratgic Management, 5*(2), 44–63.

Yin, Y., Stecke, K. E., & Li, D. (2018). The evolution of production systems from Industry 2.0 through Industry 4.0. *International Journal of Production Research, 56*(1–2), 848–861.

Xu, X., Lu, Y., & Vogel-Heuser, B. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems, 61*, 530–535. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006

Zhou, K., Liu, T., & Zhou, L. (2015, August). Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges. In *2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)* (pp. 2147–2152). IEEE.

Extended Summary

This study chronologically examines the transition process from agricultural-based manual labour in social production to today's Industry 5.0 paradigm based on artificial intelligence and cognitive systems. The transition from an agricultural society to an industrial society is historically explained by the First Industrial Revolution; during which James Watt's steam engine revolutionised both production and transportation, accelerated mechanisation in sectors such as textiles and iron and steel, and expanded and transformed the scale of trade through railways and steamships (Landes, 1969). The transition from small-scale, family-based production in agriculture to large-scale, factory-based production triggered migration from rural areas to cities and led to the emergence of a new working class (Hobsbawm, 1999). This transformation was not only economic; it was also a social and cultural revolution that laid the foundations for modern industrial society and the capitalist economy (Mokyr, 1990). The industrial revolutions are considered one of the most important turning points in human history. It is a multi-stage process that enabled the transition from an agricultural and feudal society to an industrial and service society, bringing about social, economic and cultural transformations led by technological innovations. In this process, the first revolution was defined by steam power and mechanisation, the second by electricity, the third by information technologies, and the fourth by cyber-physical systems.

Today, the Fifth Industrial Revolution, shaped by fields such as artificial intelligence, the Internet of Things, biotechnology, and the space industry, has the potential to fundamentally transform not only production methods but also humanity's lifestyle and communication patterns (Kılıç, 2023). Examining this historical flow is important for understanding the philosophical and technological foundations of the transition to Industry 5.0, which centres on artificial intelligence technologies today. The historical continuity of industrial revolutions is not limited to the development of the technological tools used but is also interpreted as a process of gradually increasing human control over production. While physical control was achieved through steam power in Industry 1.0, digital control was achieved through automation in Industry 3.0, and finally, cognitive and ethical control through sustainability-focused artificial intelligence is targeted in Industry 5.0. Understanding this transformation is essential for resolving the current digital divide and realising the vision of smart manufacturing in the future. The development process of the industrial revolutions is presented in Table 1.

Table 1: Industrial Revolutions – The Evolution of Energy, Technology and Production Paradigms

Industrial Revolution	Approximate Period	Primary Driving Force (Energy/ Knowledge)	Key Technological Breakthrough	Production Focus	Societal and Economic Transformation
Industry 1.0	1760–1840	Steam and Water Power, Coal, Metal	Mechanical Looms, Textile Machinery	Transition to the factory system, shift from agriculture to industry	Rural-to-urban migration, emergence of the working class, rise of early industrial cities
Industry 2.0	1870's	Electrical Energy	Mass production, Assembly lines (Fordism)	Large-scale production, Economies of scale	Foundations of consumer society, rise of trade unions, intensification of division of labour
Industry 3.0	1969–2000's	Information Technologies (IT)	Computers, PLCs, Internet	Flexible production, Digital control	Expansion of the service sector, globalisation, emergence of the knowledge economy
Industry 4.0	2011	Cyber-Physical Systems, Big Data	IoT, Cloud Computing, Early Artificial Intelligence	Smart factories, Full automation, Efficiency	Industrial digitalisation, data-driven decision-making, platform economy
Industry 5.0	2020's	Artificial Intelligence, Cognitive Systems	Human–machine collaboration (Cobots), Metaverse, Digital Twins	Personalisation, Human-centredness, Sustainability	Human–technology alignment, ethical production, circular economy, social innovation

Sources: Prisecaru (2016, p.57); Kılıç (2023); Nalbant & Aydın (2025).

The industrial revolutions illustrate the continuity of societal and economic transformation through evolving energy sources, technological innovations, and production methods. Industry 1.0, driven by steam and water power alongside mechanical looms, marked the transition from agrarian economies to industrial production, catalysing the emergence of the working class and the growth of industrial cities. Industry 2.0, powered by electricity and assembly-line production, enabled mass manufacturing, laid the foundations of consumer society, and accelerated unionisation and labour division. Industry 3.0 integrated information technologies—computers, PLCs, and the internet—into production, fostering flexible manufacturing and digital control, while underpinning globalisation and the rise of the knowledge economy. Industry 4.0, characterised by cyber-physical systems, big data, and artificial intelligence, facilitated smart factories, full automation, and industrial

digitalisation, with data-driven decision-making and platform-based economic models. Emerging in the 2020's, Industry 5.0 emphasises human–machine collaboration, personalisation, and sustainability, embedding ethical production, circular economy principles, and social innovation into industrial practice. Following the reviewed literature, a comparative analysis of Industry 4.0 and Industry 5.0 is presented in Table 2.

Table 2: Comparative Analysis of Industry 4.0 and Industry 5.0

Feature	Industry 4.0	Industry 5.0
Core Focus	Technology-oriented digitalisation, automation, smart systems	Human-centred approach, human–machine collaboration, sustainability
Advantages	Increased speed and efficiency in production processes; Real-time analysis through Big Data and IoT; Enhanced global competitiveness; Cost optimisation via smart factories; Transparency and integration in supply chains	Integration of human intelligence and creativity with machines; Personalised production and customer orientation; Zero-waste and green production objectives; Environmentally friendly policies and carbon-neutral approaches; Emergence of new business models and employment opportunities (robotics, artificial intelligence, maintenance)
Challenges	High investment costs; Need for specialised human resources; Data security and cyber-attack risks; Adaptation difficulties for small enterprises; Concerns regarding workforce displacement due to reduced human roles	Requirement for cultural and organisational transformation to enable human–machine collaboration; High costs of integrating new technologies; Lack of regulations and standards in implementing environmental objectives; Necessity of workforce reskilling; Difficulties in harmonising diverse levels of development on a global scale
Customer Orientation	Rapid response and process optimisation through digitalisation	Personalised production integrating customer preferences at the design stage
Environmental Impact	Optimisation of resource utilisation	Carbon-neutral production, zero waste, sustainable manufacturing
Economic Contribution	Competitive advantage through globalisation and digital transformation	Environmentally friendly business models, creation of new employment opportunities, and global economic revitalisation
Human Role	Predominantly overshadowed by automation, with processes under digital control	Active involvement of human intelligence, creativity, and decision-making processes

(Compiled by the author.)

Industry 5.0 represents a holistic change that goes beyond Industry 4.0's technology-centric approach to automation and digitalisation, placing people, sustainability, and social responsibility at the heart of production processes. Human-centred artificial intelligence (HCAI), cobots, circular economy, energy efficiency, and ethical business models form the cornerstones of Industry 5.0. This new industrial revolution prioritises not only technological innovations but also values such as human well-being, environmental protection, and social benefit. The development process of industrial revolutions has always been accelerated by the emergence of new technologies, which has led to the development of advanced methods for their more effective use. In this context, while the First and Second Industrial Revolutions represent different stages of the same production cycle, the Third and Fourth Industrial Revolutions represent a new cycle with digitalisation and the integration of cyber-physical systems. Today, the Fifth Industrial Revolution, centred on artificial intelligence technologies, is seen as a natural continuation of previous cycles; it forms the contemporary extension of the industrialisation process with the principles of human-machine collaboration, personalised production and sustainability. For Industry 5.0 to be successfully implemented, it is necessary to strengthen the technological infrastructure, develop data

security and ethical standards, provide continuous training for the workforce, and raise awareness of social responsibility. Furthermore, establishing national and international policies and standards, promoting cross-sectoral cooperation and innovation are of great importance. Industry 5.0 offers a sustainable and ethical industrial vision that considers the needs of people and society. Realising this vision is only possible through the joint efforts of all stakeholders, not just industry and the business world. In the production ecosystem of the future, harmony between humans and technology will be the key to sustainable development and social welfare. This study examines the historical and technological cycle of progress from Industry 1.0 to Industry 5.0, attempting to reveal the fundamental innovations brought by each stage to production processes and the limitations these innovations have created.

Considering that the industrialisation process is now evolving towards an ethical and sustainable future that focuses not only on economic growth but also on the well-being of people and society, it is critical that businesses focus primarily on technological foundations such as digitalisation, data analytics and artificial intelligence integration. it is also critically important that they place the concepts of human-centredness, sustainability, and flexibility at the core of their strategies. Optimising production processes, increasing energy efficiency, and making resource use more sustainable through smart factories, the Internet of Things (IoT), and cyber-physical systems in industry should be among the fundamental objectives of businesses.

In addition, the human-machine collaboration, equipping employees with digital skills, and production approach that prioritises social benefit, which Industry 5.0 emphasises, will determine businesses' long-term competitive strength. Therefore, alongside technological transformation, ethical values, environmental responsibility, and social inclusivity should also be among the fundamental concepts that businesses focus on.

Ek bilgiler

Çıkar çatışması bilgisi: Sorumlu yazar, çalışmada çıkar çatışması olmadığını kabul etmektedir.

Destek bilgisi: Çalışmada herhangi bir kuruluştan destek sağlanmamıştır.

Etik onay bilgisi: Çalışma, etik onay belgesi gerektirmemektedir.