



## Endüstri 4.0 ve 5.0 Kullanımının Matematiksel Küme Teorisi ile Modellenmesi

### *The Modeling of Industry 4.0 and 5.0 Applications Using Mathematical Set Theory*

Esen GÜRBÜZ<sup>a</sup>, Alp Eren ALP<sup>b</sup>

#### ÖZ

<sup>a</sup>Prof. Dr., Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, İşletme, Niğde, Türkiye / Prof. Dr., Niğde Ömer Halisdemir University, Business Administration, Niğde, Türkiye  
ORCID:  
0000-0001-5156-1439  
E-posta/E-mail:  
esen@ohu.edu.tr

<sup>b</sup>Doktora Öğrencisi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, İşletme, Niğde, Türkiye /Phd Student, Niğde Ömer Halisdemir University, Business Administration, Niğde, Türkiye  
ORCID:  
0000-0002-2184-9682  
E-posta/E-mail:  
a.aerenalp@gmail.com

**Sorumlu Yazar**  
**Corresponding Author**  
Esen GÜRBÜZ

**Makale Türü**  
**Article Type**  
Araştırma Makalesi  
Research Article

**Geliş Tarihi**  
**Received**  
20.09.2024

**Kabul Tarihi**  
**Accepted**  
22.10.2024

**ROR ID**  
03ejnre35

**Amaç** - Endüstri 4.0 ve Endüstri 5.0'ın gelişim süreçlerinin, matematiksel küme teorisi kullanılarak modellenmesiyle, açık ve öz bir şekilde incelenmesi amaçlanmaktadır.

**Yöntem** - Fikirlerin sade ve kesin bir biçimde sunulması, temel matematiksel dilin ve sunum yöntemlerinin öğrenilmesiyle mümkün hale gelmektedir. Bu doğrultuda, küme teorisi, matematiksel düşünme biçiminin ve matematiksel dilin temel unsurlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Endüstri 4.0 ve Endüstri 5.0'ın gelişim süreçleri de matematiksel küme teorisi çerçevesinde modellenmiştir.

**Bulgular** - Endüstri 4.0 ve Endüstri 5.0'ı tanımlayan teknolojiler ve unsurlar, matematiksel küme teorisi kullanılarak modellenmekte ve açıklanmaktadır.

**Sonuç** - Bu çalışmada, Endüstri 4.0 ve Endüstri 5.0'ın gelişim süreçleri, matematiksel küme teorisi kullanılarak modellenmiştir. Yapılan bu modelleme, süreçlerin geçirdiği evrimi ve teknolojilerin birbirleriyle olan ilişkilerini daha net bir şekilde anlamaya olanak tanımaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Endüstri 4.0, Endüstri 5.0, Matematiksel Küme Teorisi.

**JEL Kodları:** M10, M31, C00, C02.

#### ABSTRACT

**Purpose** - Considering the impact of the development processes of Industry 4.0 and Industry 5.0 on businesses operating in various sectors, this study aims to analyze these processes in a clear and concise manner through modeling based on mathematical set theory.

**Methodology** - The presentation of ideas in a simple and precise manner becomes more comprehensible through the learning of fundamental mathematical language and presentation methods. In this context, set theory stands out as one of the core elements of mathematical thinking and language. The development processes of Industry 4.0 and Industry 5.0 have also been modeled within the framework of mathematical set theory.

**Findings** - The technologies and elements that define Industry 4.0 and Industry 5.0 are modeled and explained using mathematical set theory.

**Conclusions** - In this study, the development processes of Industry 4.0 and Industry 5.0 are modeled using mathematical set theory. This modeling enables a clearer understanding of the evolution of these processes and the relationships between the various technologies.

**Keywords:** Industry 4.0, Industry 5.0, Mathematical Set Theory.

**JEL Codes:** M10, M31, C00, C02

## 1. GİRİŞ

Yaratıcılık ve yenilik, ekonomik rekabet gücünün temel unsurları olup, bir işletmenin veya endüstrinin rekabetçi konumunu korumasında kritik bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, insanlar, sanayi gelişimiyle paralel olarak zaman içinde evrim geçirmiştir. Yaratıcı ekonomi (YE), yaratıcılığı stratejik bir avantaj olarak kullanarak, ekonomideki her gelişime uyum sağlayarak ilerleyen bir sektördür (Sneha ve Kavitha, 2024). Endüstri 4.0 ile birlikte dijital dönüşüm sürecinin hız kazandığı ve işletmelerin veri analitiği, yapay zeka ve nesnelerin interneti gibi teknolojileri kullanarak operasyonel verimliliklerini artırdıkları genel olarak bilinen bir konudur. Dijitalleşmeyi benimsemeyen işletmeler ise, operasyonlarını optimize edemedikleri için rekabet avantajlarını kaybetme riskiyle karşı karşıya kalabilecektir. Endüstri 5.0'da ise günümüzün en fazla dikkat çekilen konularından olan ve sürdürülebilir kalkınma amaçlarında da önem taşıyan, insan odaklı yaklaşımlar, esneklik ve sürdürülebilirlik, ön plana çıkmaktadır. Teknolojik gelişmelere ayak uydurmak için yalnızca teknolojiyi entegre etmek yeterli olmamakta; işletmelerin, çalışanlarını da bu değişim sürecine adapte edecek şekilde eğitmesi gerekmektedir. Teknolojinin hızlı ilerlemesi, işletmelerin bu değişimlere uyum sağlamak için esnek stratejiler geliştirmesini ve sürdürülebilirlik ile çevre dostu teknolojilere odaklanmalarını zorunlu kılmaktadır. Aksi takdirde, artan çevre bilinciyle birlikte tüketicilerin tercihlerinde değişim yaşanabilir ve bu durum, işletmelerin pazar payını kaybetme riskiyle karşı karşıya kalmalarına yol açabilir.

Endüstri 4.0, büyük veri analitiği, yapay zeka, nesnelerin interneti, dijital ikizler gibi teknolojilerin uygulanması yoluyla endüstrilerde, iş modellerinde, stratejilerde ve süreçlerde meydana gelen teknolojik devrimi tanımlamaktadır. Bu teknolojilerin amacı, üretimi iyileştirmek ve ürün ve hizmet kalitesini artırmaktır. Günümüzde mevcut dijital teknolojilerin piyasada ve toplumda kavramsallaştırılması ve haritalandırılması ihtiyacına rağmen, Endüstri 4.0 araştırmaları, sürdürülebilirliği ve refahı geliştirme perspektifini genişletmek yerine teknolojinin endüstri ve üretim üzerindeki etkisine odaklanmaktadır. Bu nedenle, Endüstri 4.0 yaklaşımının sınırlamalarını ele almak için Endüstri 5.0 paradigması tanıtılmıştır. Endüstri 5.0, rekabet gücünü ve yeniliği artırmanın yanı sıra, teknolojinin sosyal ve çevresel etkisini de dikkate almak için insan merkezli bir bakış açısının “makinelere” (teknolojinin simgesi) ile düşünmeye entegre edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. İnsan-makine etkileşimine yapılan bu vurgu, kişiselleştirilmiş ürün ve hizmetlerin yaratılmasında insanların güçlendirilmesini teşvik etme ihtiyacını ortaya koymaktadır (Troisi vd., 2024). Endüstri 4.0 ve 5.0'ın karmaşık teknolojik süreçlerini anlamak ve analiz etmek için matematiğin genişleyen kullanım alanı ve soyut analiz araçlarından da yararlanması önemli görülmektedir.

Matematiğin kullanım alanları, yirminci yüzyılda büyük bir hızla genişlemiştir. Bu genişleme, matematiğin bilimsel alanlarda artan uygulamaları ile eş zamanlı olarak gerçekleşmiştir. Saf matematik, soyutlama ve geniş kavramların analizi üzerine giderek daha fazla vurgu yaparken, bu artışa paralel olarak pratik uygulamalarda da artış gösterdiği gözlemlenmektedir. Bu durum, doğayı inceleme sürecinde genel kalıpların belirlenmesine yönelik bilimlerin artan ilgisinden kaynaklanmaktadır. Aynı zamanda basitleştirici fikirlerin arayışı, giderek daha soyut analiz araçlarına olan talebi artırmaktadır (Shultz, 1979). James Franklin (2009), matematiği oranlar, desenler veya ilişkiler gibi nicel ve yapısal yönleri inceleyen bir disiplin olarak tanımlamaktadır: “matematikçiler, doğada ortaya çıkan desenleri veya formları inceleyen bilim insanlarıdır.” Bu görüş, matematiksel sembollerin ya gerçek yapıların ve özelliklerin “formel” ya da “doğal” işaretleri ya da matematiksel kavramların “araçsal” işaretleri olduğu fikrine dayanmaktadır (Franklin, 2009'den akt. Crespo ve Tohme, 2016).

Filozoflar, matematiğin başlangıcından itibaren matematiksel düşüncenin doğası üzerine, düşünmüşlerdir. Matematiğin ilk baskın kavramları ise Platon ve Aristoteles tarafından formüle edilmiş, sonrasında 1800'lere kadar önemli bir değişiklik olmamıştır. Yirminci yüzyılda ortaya çıkan modern kavramlardan biri Platon'a atıfta bulunan Platonizmdir. Ancak Matematikte platonizm Platon'dan belirsiz bir şekilde ilham almış, Platon'un fikirlerinden esnek bir şekilde esinlenmiştir. Matematiksel platonizm, üç tezin birleşimi olarak tanımlanmıştır: varlık (matematiksel nesnelere vardır), soyutluk (matematiksel nesnelere soyuttur) ve bağımsızlık (matematiksel nesnelere, zeki varlıklar ve onların dili, düşüncesi ve uygulamalarından bağımsızdır). Buna göre, platonistlere göre, matematiksel varlıklar gerçekten mevcut olan ve fiziksel değil, soyut nesnelere. Matematiksel ifadelerin doğruluğu, atıfta buldukları nesnelere kaynaklanmakta olup doğruluk keşfedilmekte, inşa edilmemektedir. Aristoteles'in fikirleri ise, modern matematik felsefesi akımları üzerinde neredeyse hiç etkili olmamıştır (Crespo ve Tohme, 2016). İnsan aklı zayıf bir araçtır ve sınırlı bir sezgi kapasitesine sahiptir. Bilgi edinmek için adım adım ilerlemektedir. Matematik, insanın akıl yürütmesini desteklemede son derece yararlı ve güçlü bir araçtır. İlişkileri ve yapıları doğru bir şekilde ifade etmekte ve doğru düşünme için gerekli kuralları içermektedir. Bilimler, ekonomi de dahil olmak üzere, matematik

kullanımından büyük ölçüde yarar sağlamaktadır (Crespo ve Tohme, 2016). Ekonomik teoride temaların tartışılması ve geliştirilmesinde matematikte geliştirilen bazı kavramların uygulanması kullanışlı bulunmuştur (Shultz, 1979; Löffler ve Kruschwitz, 2019).

Matematikçi, evrak çantasında dört temel araç; “*matris cebiri, kalkülüs, olasılık teorisi ve simülasyon*” ve çeşitli özel modeller taşımaktadır. Matris cebiri, kalkülüs, olasılık teorisi ve simülasyon araçları, pazarlama yöneticilerine karar verme sürecinde yardımcı olmak için geliştirilen birçok modelin oluşturulmasında ve çözülmesinde temel rol oynamaktadır. Bu modellerden bazıları normatif karar verme için, bazıları ise bir sürecin analiz edilmesi için tasarlanmıştır (Kotler, 1963). Bunlarla birlikte, küme teorisi tüm matematik dalları arasında en temel olanıdır (bazıları bunun tek temel dal olduğunu savunur) çünkü bilinen tüm matematiksel sonuçlar küme teorisinin önermelerinden çıkarılabilir ve bilinen tüm matematiksel kavramlar bir küme veya kümedeki bir eleman kavramına indirgenebilir. Küme teorisi ekonomistler için de giderek önemli hale gelmektedir. Küme teorisi gibi temel matematik dallarının kullanımı, ekonomik teorinin birçok sonucunu hem basitleştirme hem de bu sonuçların genel geçerliliğini artırma avantajına sahiptir (Shultz, 1979). Bir küme, çeşitli nesnelere bir koleksiyondur. Bir kümeyi tanımlamak istiyorsanız, elemanlarını belirtmeniz gerekir (Löffler ve Kruschwitz, 2019). Herhangi bir türden nesnelere, örneğin kitaplar, insanlar, sayılar gibi, iyi tanımlanmış bir koleksiyonu veya toplamı bir küme olarak tanımlanmaktadır. Dolayısıyla, her şey bir küme olarak değerlendirilebilir. Küme teorisi, ortak özelliklere sahip sayı kümelerinin gruplanmasıyla ilgilenen bir matematiksel soyutlamadır. Kümeleri kullanmak ve karşılaştırmak, ister matematikte ister iş dünyası gibi uygulamalı alanlarda olsun, neredeyse sınırsız bir kapsamı olan teorilerin ve kuralların oluşturulmasını sağlar. İşletme operasyonlarına uygulandığında, küme teorisi planlama ve operasyonlarda yardımcı olabilir. İşletmenin her unsuru muhasebe, yönetim, operasyonlar, üretim ve satışlar gibi en az bir kümeye gruplandırılabilir. Bu kümelerin içinde başka kümeler de bulunmaktadır. Örneğin, operasyonlar içinde depo operasyonları, satış operasyonları ve idari operasyonlar kümeleri vardır. Bazı durumlarda, kümeler kesişebilir; satış operasyonları, operasyonlar kümesi ve satışlar kümesiyle kesişebilir (<https://smallbusiness.chron.com/> : 10.08.2024). Bir kümede yer alan nesnelere, somut olmak zorunda da değildir. Bunlar pozitif tam sayılar kümesi, gerçek sayılar kümesi gibi soyut kavramlar da olabilmektedir. Bir küme, belirli ve ayırt edici nesnelere oluşan iyi tanımlanmış bir koleksiyondur. Bir kümenin tüm üyelerinin ayırt edici olması gerektiği gelenekseldir; bu nedenle, bir kümeyi üyelerini listeleterek tanımlarken, tüm tekrarlar silinmelidir (<https://egyankosh.ac.in/> : 15.06.2024). Kümeler birleştirebilmekte, kesişimleri ve farkları hesaplanabilmektedir (Löffler ve Kruschwitz, 2019).

Bu makale, Endüstri 4.0'ın dijitalleşme odaklı perspektifini, Endüstri 5.0'in insan-merkezli ve sürdürülebilirlik odaklı yaklaşımlarıyla harmanlayarak bu iki kavram arasındaki ilişkiyi matematiksel bir model çerçevesinde ele almaktadır. Literatürde Endüstri 4.0'a dair çalışmalar genellikle teknolojinin endüstri ve üretim üzerindeki etkilerine odaklanırken, bu çalışma, insan-makine etkileşiminin yanı sıra teknolojinin sosyal ve çevresel etkilerini de matematiksel bir bakış açısıyla analiz etmektedir. Bu yönüyle, Endüstri 5.0'a dair araştırmalarda matematiğin soyut analiz araçlarının kullanımını vurgulayan ve bu disiplinin endüstriyel gelişim süreçlerine katkısını ortaya koyan öncü bir yaklaşıma sahiptir. Makalenin özgün değeri, Endüstri 4.0 ve 5.0'ın dijitalleşme ve sürdürülebilirlik süreçlerine yönelik matematiksel modellemeler sunarak, bu alanlardaki mevcut araştırma boşluklarını doldurması ve daha geniş bir perspektif sunmasıdır.

Bu bağlamda, fikirlerin düzenli ve kesin bir biçimde sunulabilmesi, temel matematiksel dilin ve sunum yöntemlerinin öğrenilmesiyle daha anlaşılır hale gelmektedir. Matematiksel düşünme biçiminin ve matematiksel dilin temellerinden biri olan küme teorisi, teknolojik çağın küme teorisiyle modellenmesi yoluyla, hem teoriye hem de Endüstri 4.0 ve Endüstri 5.0 dönemlerine farklı bir perspektif kazandırma potansiyeline sahiptir. Bu çalışma, Endüstri 4.0 ve Endüstri 5.0 süreçlerinin matematiksel kümeler aracılığıyla analiz edilmesine odaklanmakta; ayrıca Endüstri 1.0'dan Endüstri 5.0'a kadar gerçekleşen dönüşümleri teorik çerçevede ele almakta ve bu dönüşümleri küme teorisi kapsamında modelleyerek ifade etmektedir.

## 2. ENDÜSTRİ 4.0 ve 5.0'IN GELİŞİM SÜRECİ

Birinci sanayi devrimi, diğer adıyla Endüstri 1.0, 18. yüzyılda başlamıştır ve buhar çağı olarak adlandırılmıştır. Bu devrimde üretim buhar ve mekanizasyonun kullanımına dayanmaktadır (Tunji-Olayeni vd., 2024). 18. yüzyılın ikinci yarısında gerçekleşen Sanayi Devrimi, tarıma dayalı ekonomilerden önemli bir kopuşa neden olarak, sanayileşmiş toplumların ortaya çıkmasına zemin hazırlamıştır. Mekanizasyon, kentleşme ve teknolojik ilerlemeler, üretim ve ulaşımda önemli dönüşümler sağlamıştır. Sanayi Devrimi dönemi, insanlık tarihinde, yankıları günümüze kadar süren teknolojik ilerlemelerin bir dizi gelişimini başlatan kritik bir dönüm noktası olarak kabul edilmektedir (Batra vd., 2024). Sanayi 1.0, üretimin mekanizasyonuna yol açan

buharlı motorun icadıyla ilişkilidir (Kumar vd., 2024). Bu devrimin en önemli özelliği, el yapımı üretimden makine kullanımına geçiştir. Bu dönem, hem mikro hem de makro düzeyde önemli ekonomik kazançlar sağlamış ve yaşam standardı üzerinde olumlu etkiler yaratmıştır. Bununla birlikte Endüstri 1.0 sanayi öncesi döneme göre daha fazla ekonomik kazanç sağlamış olsa da, süreçleri yavaş olduğu için arz talebi karşılayamamıştır. Endüstri 1.0, buhar makinelerini çalıştırmak için fosil yakıtlara olan bağımlılığı nedeniyle çevre üzerinde olumsuz bir etkiye de sahip olmuştur (Tunji-Olayeni vd., 2024). Bu devrim sadece teknik bir yenilik oluşturmakla kalmamış insanoğlunun hayatını değiştiren ve küresel alana yayılan canlı bir süreç olarak tarihteki yerini almıştır (Yalçın, 2012).

Birinci sanayi devrimi üretimde buhar makinelerine dayanmakta iken, 19. yüzyılda başlayan ikinci sanayi devrimi yani Endüstri 2.0 elektriğin yardımıyla kitlesel üretime odaklanmaktadır. Endüstri 2.0 kitlesel üretim, standardizasyon ve sanayileşme çağıdır. Bu dönemde kitlesel üretim elektriğe dayanarak, elektrik şebekeleri, telefonlar, radyo, telgraf ve içten yanmalı motorları beraberinde getirmiştir. İkinci sanayi devrimi üretim sırasında önemli miktarda elektrik gücüne bağımlı olması nedeniyle, sermaye yoğun bir dönemdir (Tunji-Olayeni vd., 2024). Sanayi 2.0 daha çok elektrik ve içten yanmalı motorlarla ilgili olup, 19. yüzyılda mekanik üretim sistemlerinin elektrifikasyonuna odaklanmıştır. Elektrik, üretim için suya ihtiyaç duyan buharla kıyaslandığında, üretimde daha kolay kullanılabilen ve bu sayede elektrik transferi çok daha basit hale gelmektedir (Kumar vd., 2024). Endüstri 2.0, buharlı makinelerin ve kömürün yerini elektrik ve petrolün almasını ifade ederken, dönemin en önemli gelişmeleri ise telgraf telefon (Koca, 2020), radyo, daktilo ve ucuz gazete kağıdı gibi iletişim kanallarının gelişmesi olmuştur (Pamuk ve Soysal, 2018). Demir kullanımının yerini çelik kullanımının alması, kimyasal madde kullanımı ve öncülüğünü Henry Ford' un yaptığı seri üretim bu dönemin en belirgin özellikleridir (Alizon vd., 2009).

Üçüncü sanayi devrimi, diğer adıyla Endüstri 3.0, 20. yüzyılda yaklaşık 1950'lerde başlamıştır. Bu dönem, otomasyon çağı olarak da bilinmektedir ve üretim, elektronik, internet ve otomasyon kullanımına dayanmaktadır. Endüstri 3.0, sanayileşmeye önemli iyileştirmeler getirmiş olsa da, karmaşık sistemlerin kullanılması ve bu sistemlerin belirli koşullarda çalışmaması, birçok organizasyon için ek maliyetlere yol açmıştır (Tunji-Olayeni vd., 2024). Sanayi 3.0 dijitalleşme, otomasyon ve internet ile daha çok ilgilenmiş; bu dönemde internet hesaplamalar ve veri aktarımı için kullanılmaya başlanmış ve verilerin dijitalleşmesi gerçekleşmiştir (Kumar vd., 2024). Bu dönemde üretim, nükleer, biyo-tarım, telekomünikasyon, lazer, fiber optik, mikro elektronik ve bilgisayar alanlarındaki gelişmelerle çok farklı boyutlarda olmaya başlamıştır (Redclift, 2005). Ulaşım ve iletişimdeki gelişmeler tedarik zincirini küresel ölçekli yapmakla beraber, üretimin de yerinde yapılmasını getirmiştir. Bu durum maliyetlerin kontrol altına alınmasını, düşük fiyatlı ve kaliteli ürünlerin üretilmesini sağlamıştır (Görçün, 2017).

## 2.1 Endüstri 4.0

Sanayi devrimlerinde teknolojik yenilikler üretim şirketlerinin üretim verimliliğini artırmak için önemli ölçüde kullanılmıştır. İlk üç sanayi devrimi olan; Endüstri 1.0 endüstriyel süreçlerde buhar ve hidroelektrik gücün kullanımı, Endüstri 2.0 elektrik enerjisinin kullanımı ve Endüstri 3.0 bilgi teknolojisinin geliştirilmesine odaklanmıştır. Son birkaç yıl içinde siber-fiziksel sistemler, nesnelerin interneti ve bulut sistemleri gibi teknolojilerin tanıtılması, Hannover Messe'de "Endüstri 4.0" olarak adlandırılan dördüncü sanayi devriminin başlangıcını oluşturmuştur (Sharifabadi vd., 2024). Endüstri 4.0 ilk olarak 2011 yılında Almanya'da düzenlenen "Hannover Festivali"nde Siegfried Dais ve Henning Kagermann tarafından tanıtılmıştır (Rupp vd. 2021). Sanayi devrimleri, buhar makinesi (1.0), elektrik (2.0) ve bilgisayarlar (3.0) gibi tekil teknoloji icatları iken, mevcut teknolojik gelişmeler ve büyük miktarda veriyi işleme yeteneği (4.0)'dır. Alman araştırma topluluğu, mekanizasyon (1.0), seri üretim (2.0) ve otomasyon (3.0) endüstrilerinden sonra gelen süreci bir sonraki sanayi devrimi (4.0) olarak şekillendirmiş ve tanıtmıştır. Bu bağlamda, fiziksel alan ile siber-fiziksel alanın entegrasyonunun gerçekleşmesi beklenmektedir (Rupp vd. 2021). Alman hükümeti daha sonra bu fikri benimseyerek, ülkenin sanayi stratejisinin çekirdeğine dâhil etmiş ve sanayinin gelişimi amacıyla kullanmıştır (Raj vd. 2024). Endüstri 4.0 ve dördüncü sanayi devrimi terimleri sıklıkla birbirinin yerine kullanılsa da, Endüstri 4.0, dördüncü sanayi devriminin sadece bir alt kümesi olmaktadır (Rupp vd., 2021).

Endüstri 4.0, dijital teknolojileri iş ve üretim operasyonlarına entegre ederek küresel ekonomik manzarayı dönüştürmektedir. "Endüstri 4.0", Almanya'da 2011 yılında mevcut sorunlarla başa çıkmak ve Almanya'nın sanayi sektörünün rekabet gücünü artırmak amacıyla bir teknolojik dönüşüm olarak başlatılmıştır (Yadav vd., 2024). Endüstri 4.0 teknolojilerinin önemini farkına varıldıktan sonra, farklı ülkeler Endüstri 4.0'ın uygulamaları ve kavramlarını geliştirmek için kendi programlarını başlatmışlardır. Ardından, teknolojik dönüşüm sürecinde Endüstri 4.0, dünya genelinde birçok projede birden fazla teknolojinin yer alması

nedeniyle farklı fikirler ve teknolojileri içermiştir (Yadav vd., 2024). Endüstri 4.0'ın uygulanmasındaki temel amaç, endüstrileri karmaşık pazarın taleplerini karşılamakta daha verimli hale getirmektir. Bu nedenle, Endüstri 4.0 öncelikle endüstrileri daha akıllı hale getirmek için ileri dijital teknolojiler ve gelişmiş ağ sistemlerinin entegrasyonuna odaklanmaktadır. Endüstri 4.0, işletmeleri daha akıllı hale getirirken aynı zamanda sınırlı kaynakları en verimli şekilde kullanmalarına da yardımcı olmaktadır (Raj vd., 2024).

Endüstri 4.0, çeşitli endüstriyel sektörler arasında daha fazla bağlantı sağlamak amacıyla bilgisayar ve bilgi teknolojilerinin kullanılması olarak tanımlanmaktadır (Sharifabadi, 2024; Tunji-Olayeni vd., 2024; Eriksson vd., 2024). Elektronik ve bilgisayar teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte, 20. yüzyıl insan yaşamını ve sanayiye daha düzenli hale getirmiş, sanayi seviyesindeki zor görevler kolay bir hale gelmiştir. Bu devrim aynı zamanda, otomatik üretimde daha yüksek doğrulukla çalışan, insanlara benzeyen robotların bir takım olarak görev aldığı bir dönemi de beraberinde getirmiştir (Kumar vd., 2024). Bu dijital çağ, belirsiz ortamlarda çalışabilen ve daha yüksek operasyonel verimlilik sağlayabilen akıllı sistemlerin geliştirilmesini içermektedir (Tunji-Olayeni vd., 2024). Bununla birlikte makineler, çalışanlar, tedarikçiler ve nihai tüketiciler dahil olmak üzere tedarik zincirinin tüm parçaları arasında entegrasyonu mümkün kılmaktadır. Bu artan bağlantı, bilgisayar ve bilgi teknolojilerinin kullanımını gerektirmektedir (Sharifabadi, 2024).

Endüstri 4.0, günümüz endüstriyel üretiminin tamamıyla ilişkili olan ve ürünlerin imalatında ve çeşitli hizmetlerin sunulmasında bir devrim yaratan popüler bir konudur. Endüstri 4.0'ın bilgi açıklığı, atıkların azaltılması, ürün üretimi ve hizmet sunumunda verimliliğin artırılması gibi faydalarına rağmen, uygulama sürecinde karşılaşılabilecek birçok zorluk bulunmaktadır ve bu zorlukların, üretim ve hizmet endüstrilerinde Endüstri 4.0'ın uygulanması sırasında sorunsuz ve eksiksiz bir geçişi sağlamak için sistematik olarak belirlenmesi gerekmektedir (Sharifabadi vd., 2024). Akıllı ve otonom süreçler için iletişim, bilgi ve akıllı teknolojileri kullanılmaktadır. Üçüncü sanayi devriminin ana özelliği otomasyon iken, dördüncü sanayi devriminin odak noktası dijitalleşme olmuştur. Dijitalleşme iş hassasiyetini artırmakta, israfı azaltmakta, verimliliği artırmakta, süreçleri hızlandırmakta ve zaman tasarrufu sağlamaktadır (Tunji-Olayeni vd., 2024) Tahmine dayalı bakım ve ileri analitik, Endüstri 4.0'ın diğer özelliklerindedir (Yadav vd., 2024). Genellikle Endüstri 4.0 veya akıllı üretim olarak adlandırılan dördüncü sanayi devrimi, organizasyonel yöntemleri köklü bir şekilde değiştirmektedir (Sharifabadi vd., 2024).

Endüstri 4.0 şirketlerin ve organizasyonların makineler, tedarik sistemleri, üretim ekipmanları, nihai ürünler ve müşteriler arasında iletişim kurma yeteneğini geliştirmek için dijital teknolojilerin kullanılmasıdır (Sharifabadi vd., 2024). Rupp vd. (2021 s.12) literatürde Endüstri 4.0'ı tanımlamak için en sık kullanılan kelime öbeklerinin genel görünümünü bibliyometrik analiz ile inceleyerek şu tanımlı geliştirmiştir:

*“Endüstri 4.0, Akıllı Fabrikalar oluşturmak için Siber Fiziksel Sistemlerin, Nesnelerin İnterneti, Büyük Veri, Bulut Bilişim, Yapay Zekâ ve İletişim Teknolojilerini kullanarak, değer zinciri boyunca gerçek zamanlı bilgi ve iletişim sağlamak amacıyla uygulanmasıdır.”* (Rupp vd.,2021 s.12)

Son on yılda, Endüstri 4.0'ın ortaya çıkışı, birçok sektörü geleneksel üretim yöntemlerinden dijital ve otomatik sistemlere geçiş yapmaya zorlamıştır (Khanuja vd., 2024). Endüstri 4.0 süreçlerin dijitalleştirilmesi yoluyla şirketlerin ve endüstrilerin tamamen dönüşmesi ile karakterize edilmekte; bu dönüşümde, çalışanlar, makineler, sistemler, araçlar ve ürünler internet aracılığıyla ve gerçek zamanlı olarak daha fazla birbirine bağlanarak, tüm üretim sisteminin daha büyük bir entegrasyonunu sağlamaktadır. Ayrıca, insan iş gücünün daha az kullanılması sıkça görülmekte, bu da bilgi alışverişinde bulunan ve otonom olarak çalışan akıllı makineler ve yazılımların kullanılmasına neden olmaktadır. Bu durumda çalışanların rolü daha odaklanmış bir role dönüşerek, öncelikle makinelerin kontrolü ve izlenmesine yönelmekte ve üretimin kendisi daha çok üretim teknolojilerine bırakılmaktadır (Rocha vd., 2024).

Endüstri 4.0'ın dijital ilerlemesi, süreç verimliliğini artırmaya, değer yaratmaya ve rekabet gücünü yükseltmeye yönelik çeşitli temel teknolojileri, metodolojileri ve eğilimlerin uygulanmasının benimsenmesidir (Eriksson vd., 2024). Birinci sanayi devriminde buhar makinesi, ikincisinde elektrik ve üçüncü sanayi devriminde bilgisayarlar gibi geçmiş sanayi devrimleri yalnızca tek bir teknolojik buluşla harekete geçirilmiş iken, dördüncü sanayi devrimi, birden fazla teknolojik gelişme ve büyük miktarda veriyi yönetme yeteneği tarafından yönlendirilmektedir. Bu devrimdeki sistemler, insan müdahalesi olmadan endüstrilerin gelişimini hızlandıran otonom, kendi kendini yönlendiren süreçleri teşvik edecek şekilde tasarlanmıştır. Bu dördüncü devrim, birbirleriyle etkileşime geçebilen ve bağımsız olarak işlev gösterebilen akıllı fabrikalar oluşturarak, üretim sürecinin verimliliğini, etkinliğini ve kalitesini artırmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, bu dijital

teknolojinin, el işçiliği üretiminden kitlesel üretime ve yalın üretime, şimdi ise kitlesel özelleştirmeye doğru bir kaymayı teşvik ettiği belirlenmiştir (Yadav vd., 2024).

Endüstriyel üretimde siber-fiziksel sistemler ve nesnelerin interneti gibi teknolojilerin uygulanmasıyla, fiziksel ve dijital unsurların gerçek zamanlı entegrasyonu mümkün olmaktadır (Eriksson vd., 2024). Endüstri 4.0, nesnelerin interneti (Tunji-Olayeni vd., 2024; Kumar vd., 2024; Khanuja vd., 2024; Raj vd. 2024), yapay zeka (Tunji-Olayeni vd., 2024; Kumar vd., 2024; Khanuja vd., 2024), makine öğrenimi (Tunji-Olayeni vd., 2024; Khanuja vd., 2024), eklemeli imalat ve 3D (Raj vd. 2024), blokchain (Kumar vd., 2024) ve robotlar gibi çeşitli teknolojilerin bir işbirliği olup, geleneksel üretim yöntemlerini devrim niteliğinde değiştirmektedir (Kumar vd., 2024; Khanuja vd., 2024; Raj vd., 2024). Endüstri 4.0, dijital teknolojilerin kullanılmasıyla, modern kalite yönetim tekniklerinin benimsenmesine önemli ölçüde katkıda bulunmakta ve geleneksel yöntemlerin sınırlamalarını ele almaktadır. Endüstri 4.0 teknolojilerinin kalite yönetim sistemlerine entegrasyonu, işletmelerin literatürde Kalite 4.0 olarak adlandırılan bir kalite standardına ulaşmasını sağlamaktadır (Talaie, 2024).

Endüstri 4.0, robotik, yapay zeka, makine öğrenimi, büyük veri, bulut bilişim, blok zinciri gibi yeni teknolojik yeteneklerle, iş ortamında bilginin yakalanmasını, depolanmasını, işlenmesini ve iletilmesini kolaylaştırmakta ve yeni stratejilerin, pazarların ve endüstrilerin gelişimi için önemli değişiklikler ve fırsatlar yaratmaktadır (Sharifabadi, 2024). Endüstri 4.0 genellikle, fiziksel ve dijital sistemleri birleştirerek süreçlerin gerçek zamanlı izlenmesi ve kontrolü için nesnelerin interneti ve siber-fiziksel sistemler (örneğin, sensörler, iletişim cihazları ve veri analitiği) kullanmaktadır (Khanuja vd., 2024). Bununla birlikte Endüstri 4.0, nesnelerin interneti, ileri robotik ve büyük veri analitiği, eklemeli üretim, artırılmış gerçeklik gibi dijital teknolojilerin uygulanması ve kullanılması yoluyla üretim endüstrilerinde köklü değişiklikler içermekte ve genellikle yapay zeka ile ilişkili olmaktadır. (Eriksson vd., 2024). Endüstri 4.0 ile yakından ilişkilendirilen teknolojiler genel olarak aşağıda açıklanmaktadır:

- (1) Nesnelerin İnterneti (IoT), ağ bağlantılı bir dünyayı ifade etmektedir (Rupp vd., 2021). Nesnelerin interneti fiziksel nesnelerin kendi aralarında veya daha büyük sistemlerle bağlantılı olduğu ağlardır (Özdemir vd., 2018). Makineler, mobil cihazlar ve insanlar, veri üretmek için elektronik sensörler, aktüatörler veya diğer dijital cihazlarla donatılmıştır. Bu ağın amacı, verileri toplamak, değiş tokuş etmek ve analiz ederek ağın bulunduğu ortamda iyileştirmeler veya değişiklikler yapmaktır. Örneğin, Radyo Frekansı ile Tanımlama (RFID) sistemleri, her yerde bulunan veri yönetimi için temel bir olanak sağlayıcı olarak görülebilmektedir (Rupp vd., 2021).
- (2) Siber Fiziksel Sistemler (CPS), fiziksel nesnelere, insanlar ve yazılımların birbirine sıkı bir şekilde entegre olduğu, yeni düzeyde sosyo-teknik etkileşimler yaratan mekanizmalardır. Bu bağlamda, fiziksel nesnelerin bulunduğu gerçek dünya sürekli olarak sanal dünya ile etkileşime girerek bilgi alışverişi yaparak en iyi kararı belirlemektedir. Üretim alanında, bu tür sistemler siber fiziksel üretim sistemleri (CPPS) olarak adlandırılmaktadır (Rupp vd., 2021). Nesnelerin interneti ve Siber-Fiziksel Sistemler, fiziksel ve dijital nesnelerin gerçek zamanlı entegrasyonunu sağlayarak üretim sürecindeki tüm sistemler ve ekipmanlar üzerinde dijital kontrolü mümkün kılmaktadır. Yatay ve dikey entegrasyonda bu teknolojilere benzer bir şekilde sistem entegrasyonuna odaklanmaktadır. Her iki durumda da, üretimin her bir parçasının ne, nasıl ve hangi ölçüde çalışması gerektiğini belirlemek için bilgi paylaşımında bulunmaktadır. Yatay ve Dikey Sistem Entegrasyonu, değer zincirlerinin daha etkin bir şekilde yönetilmesini sağlamaktadır. Yatay entegrasyon, farklı şirketleri ve bunların ürünlerini birbirine bağlarken; dikey entegrasyon, bir organizasyon içindeki farklı alt sistemlerin entegrasyonunu hedeflemektedir. Bu entegrasyonlar, dijital teknolojiler ve bilgi paylaşımı sayesinde dinamik ve rekabetçi bir üretim sistemini desteklemektedir (Rocha vd., 2024).
- (3) İnternete bağlı cihazların (nesnelerin interneti) sağladığı geniş bağlantılılık sayesinde üretilen büyük miktarda veri, Endüstri 4.0'ın bir diğer önemli teknolojisi olan büyük veri analitiğini (big data analytics) öne çıkarmaktadır. Büyük veri analitiği, bir şirket içindeki çeşitli nesnelere, makinelerden ve sistemlerden gelen büyük miktardaki verilerin entegrasyonu, işlenmesi ve kritik değerlendirilmesi olarak tanımlanmaktadır. Bu teknoloji, verimliliği artırmak, talepleri öngörmek, süreçleri daha verimli ve sürdürülebilir hale getirmek, karar alma süreçlerini desteklemek gibi çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır. (Rocha vd., 2024). Büyük veri analizi, yapılandırılmamış, yarı yapılandırılmış ve yapılandırılmış büyük veri kümelerinin analizinde kullanılmaktadır. Bu teknoloji, verileri değerlendirilebilir bir şekilde sunmaya çalışarak kalıpları bulmayı, kararları desteklemeyi veya bir karar için temel sağlamayı hedeflemektedir (Rupp vd., 2021).

- (4) İnternete bağlı cihazlar (nesnelerin interneti) ile yakından ilişkili bir diğer teknoloji ise bulut üretim (cloud manufacturing) olarak bilinen bulut bilişimdir. Bulut üretim, sunucular, depolama, veri tabanları, ağlar, yazılımlar, analitik ve yapay zeka gibi bilişim hizmetlerini kullanarak nesnelerin interneti tarafından üretilen büyük veriyi yönetmekte ve dağıtmaktadır. Bu nedenle, bulut üretim, endüstrilerdeki çeşitli üretim süreçlerinde üretilen büyük miktardaki verinin bulutta paylaşılması ve dönüştürülmesi olarak görülmektedir. Bu veriler, hizmetlerin ve üretim sistemlerinin akıllı bir şekilde yönetilmesi için kullanılabilir kaynaklara dönüştürülmektedir. (Rocha vd., 2024). Bulut bilişim, kablosuz ağlar aracılığıyla uzaktan gerçekleştirilen hesaplamaları tanımlarken, hizmetler internet üzerinden ölçeklenebilir kaynaklar aracılığıyla görselleştirilmektedir. Ayrıca, çok hızlı yanıt verme yeteneği ve verilerin dışarıda depolanması ile karakterize edilmekte ve genellikle büyük veri ile birleştirilmektedir (Rupp vd., 2021).
- (5) Fiziksel sistemin bir parçası olarak eklemeli üretim de kilit bir teknoloji olarak tanımlanmaktadır. 3D baskı olarak da bilinen bu teknoloji, özellikle küçük parti boyutlarının yüksek karmaşıklıkta bireysel üretimi için uygundur (Rupp vd., 2021). Hızlı prototipleme veya eklemeli üretim, bazen 3D baskı olarak da adlandırılmakta ve uzun yıllardır kullanılmaktadır (Rodríguez-Martín vd., 2024). Dijital 3D modellerin doğrudan üretimini mümkün kılmakta ve bu nedenle dijital değer zincirine uyum sağlamaktadır (Rupp vd., 2021). Günümüzde, eklemeli üretim teknolojisi olgunlaşmakta ve farklı pazarlara nüfuz etmektedir. Hem prototipleme hem de dağıtık üretimde kullanılmakta olup, gelecekteki kullanıcıların eklemeli üretim teknolojisini benimsemesine yardımcı olmaktadır. Teknoloji, iç verimliliği artırmada faydalı bir araç olarak yeniden popülerlik kazanmaktadır. Günümüzde, tasarım ve pazarlama dünyasında en popüler ve yeni gelişmelerden biri haline gelmiştir (Rodríguez-Martín vd., 2024).
- (6) Verilerin cihazlar arasında zincirlenmesi, depolanması ve analiz edilmesi sayesinde, otomasyon ve robotizasyon donanımlarının gelişimi için bir alan ortaya çıkmış olup, bu durum Endüstri 4.0'ın işleyişi için vazgeçilmez hale gelmiştir. Bu kullanım, robotlar ve insanlar arasında paylaşılan bir çalışma alanında işbirlikçi, minimal insan müdahalesi veya operasyonlar sırasında hiçbir insan müdahalesi olmadan çalışabilmektedir. Bu düzenleme, otomasyon ve robotizasyonun Endüstri 4.0 bağlamında ne kadar önemli olduğunu ve bu teknolojilerin insan-robot işbirliğinden tamamen otonom sistemlere kadar nasıl uygulanabileceğini net bir şekilde ifade etmektedir (Rocha vd., 2024).
- (7) Bilgisayarlar ve yazılımlar arasındaki etkileşim aracılığıyla izlenebilecek bir başka yol da, otomatik süreçlerde insan bilincini taklit etmeyi amaçlayan dijital cihazların programlanmasıdır. Literatürde, makine öğrenimi ve yapay zeka, makinelerde insan düşüncesi ve davranışının simülasyonu olarak anlaşılmaktadır. Bu, makinenin geçmiş ve yeni bilgilerden öğrenmesini sağlayan algoritmalar sayesinde gerçekleştirilir ve böylece makine, kendi başına kararlar alabilir ve eylemlerde bulunabilir. Bu açıklama makine öğrenimi ve yapay zekanın temel işlevlerini ve bunların otomasyon süreçlerine nasıl katkıda bulunduğunu net bir şekilde ifade etmekte ve insan düşünce süreçlerinin makinelerde simüle edilmesi ve otonom karar alma yeteneği konusunu vurgulamaktadır. (Rocha vd., 2024). Sistemlerin artan karmaşıklığı nedeniyle, bütüncül bir bakış açısına dayalı kararlar almak giderek zorlaşmaktadır. Büyük veri tarafından yapılandırılan veriler, daha ileri araştırmalar için yapay zeka ile analiz edilmektedir. Yapay zeka zorlu uygulamalarda karşılaşılan karmaşık problemlerde kilit bir araç olduğunu birçok alanda kanıtlamıştır. Bu teknolojinin amacı, insan mantığına benzer şekilde tepki verebilen akıllı makineler geliştirmektir (Rupp vd., 2021).
- (8) Bir diğer kilit teknoloji, artırılmış gerçeklik veya sanal gerçeklik olup, gerçeklik dijital 3D modellerin kullanımıyla desteklenmekte ve karıştırılmaktadır. Artırılmış gerçeklik genellikle karmaşık bileşenlerin montajında veya gerçek zamanlı olarak teknik 3D dokümantasyon olarak kullanılmakta; sıklıkla öngörücü bakım için bir yardımcı araç olarak hizmet etmektedir. Bu teknoloji, zaman, hata ve maliyetlerin azaltılmasına katkı sağlamaktadır (Rupp vd., 2021). Endüstri 4.0'da sanallaştırma söz konusu olduğunda, artırılmış gerçeklik ve sanal gerçeklik, gerçekliğe dijital efektler bindirerek üretim ortamlarının daha iyi görselleştirilmesini sağlayan hizmet sistemi nedeniyle kritik bir öneme sahiptir. Artırılmış gerçeklik ve sanal gerçeklik, gerçek dünya içinde 3D sanal nesnelerin dijital üretimi olarak anlaşılmakta ve bu, üretim süreçlerinde simülasyon, veri üretimi ve bilgi paylaşımını mümkün kılmaktadır. Bu sanal ortam içinde, benzer bir teknoloji de bulunabilmektedir. Simülasyon ve modelleme, gerçek dünyadaki ürünlerin, makinelerin, operasyonların, hizmetlerin ve süreçlerin sanal bir dünyada taklit edilmesini, bu

sayede bunların test edilmesini ve optimize edilmesini içermektedir. Bu yaklaşım, zaman ve malzeme israfını azaltmaktadır (Rocha vd., 2024).

- (9) Son olarak, tüm üretim zinciri sanal ortamda birbirine bağlı olduğunda, üretim sektörleri arasında etkili iletişim için veri koruması önem kazanmaktadır. Bu doğrultuda, Endüstri 4.0'da güvenliğin sağlanması şarttır. Siber güvenlik, bir endüstrinin çeşitli operasyonel alanlarında paylaşılan ve üretilen verilerin korunması için güvenlik sistemlerinin uygulanmasını ifade etmektedir ve bu da siber saldırılar ve değerli şirket bilgilerinin çalınması risklerini ortadan kaldırmaktadır. Bu düzenleme, Endüstri 4.0'daki sanallaştırma, simülasyon ve siber güvenlik konularını net bir şekilde özetleyerek, bu teknolojilerin birbirleriyle nasıl entegre olduğunu ve üretim süreçlerindeki rollerini vurgulamaktadır (Rocha vd., 2024).

Endüstri 4.0 teknolojilerinin benimsenmesi, kaynak kullanımının optimize edilmesi, operasyonel verimliliğin artırılması, bilinçli karar verme için gerçek zamanlı bilgilere erişim, bakım süreçlerinin iyileştirilmesi, etkili ürün geliştirme, belirli müşteri gereksinimlerini karşılamak için ürünlerin kişiselleştirilmesi ve rakiplere karşı rekabet avantajı sağlama gibi sayısız fayda sunmaktadır (Khanuja vd., 2024). Endüstri 4.0, insanların yaşama, üretim yapma ve iş yapma biçimlerini değiştirmek için teknolojilerin kullanılmasına olanak tanımakta, verimliliği, karlılığı ve rekabetçiliği artırmaktadır. Aynı zamanda gerçek zamanlı verilerin analiz edilmesi, görünürlüğün artırılması ve otonom izleme, 3D modellerin doğrudan üretimi ve iş gücü esnekliğini sağlamaktadır (Tunji-Olayeni vd., 2024).

Endüstri 4.0'ın önemli faydalarına rağmen, bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Örneğin, özellikle vasıfsız işçiler için işsizliği derinleştirebilmekte, monoton iş düzeni nedeniyle iş yorgunluğuna yol açabilmekte, insan etkileşimini ve çevresel konulara düşük bir vurgu yapabilmektedir. Bununla birlikte dijital teknolojilerin kullanımıyla endüstriyel süreçleri iyileştirmenin dışında, üretimin insan ve çevre boyutlarına fazla odaklanmama yönüyle önceki sanayi devrimlerinden çok farklı görülmeyebilmektedir (Tunji-Olayeni vd., 2024). Şekil 1, sanayi devrimlerinin dönüşümünü özetlemektedir (Yadav vd., 2024).

**Şekil 1.** Sanayi Devriminin Dönüşümü

1. ED İnsan emeğinden makinleşmeye	2. ED Seri üretimden mekanizasyona	3. ED Seri üretimden otomasyona	4. ED Otomasyondan kitlesele kisiselleştirmeye
<ul style="list-style-type: none"><li>•18.yy dan 19. yüzyıla</li><li>•Buhar makineleri</li><li>•Basit pazar</li><li>•Üretim hacmi</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>•19.yy sonlarından 1980 lere</li><li>•Elektrik, elektronik mekanik cihazlar</li><li>•İstikrarlı pazar</li><li>•Üretim hacmi ve ürün çeşitliliği</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>•1980 lerden 2011'e</li><li>•Bilgi, analogdan dijitale, entegreden modüllere</li><li>•Değişken pazar</li><li>•Üretim hacmi, ürün çeşitliliği, teslim süresi</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>•2011 den</li><li>•IoT, büyük veri, elektrikli araç, 3D yazıcılar, bulut bilişim, CPS</li><li>•Akıllı pazar</li><li>•Müşteriler bireysel kişiselleştirmeye katılım sağlar</li></ul>

**Kaynak:** Karnik vd. 2022, Yin vd., akt. Yadav vd., 2024 erken görünüm sayısı.

## 2.2. Endüstri 5.0

Son birkaç yılda, Endüstri 4.0'ı tamamlayan ve değer odaklı bir kavram olarak yükselen Endüstri 5.0, dikkat çekmeye başlamış (Eriksson vd., 2024) ve Dördüncü sanayi devriminin altıncı yılında, 2017 yılında beşinci sanayi devrimi tanıtılmıştır (Tunji-Olayeni vd., 2024). Endüstri 5.0 kavramının, 2015 yılında Michael Rada tarafından sosyal medya platformlarında tanıtıldığı söylenmektedir. Endüstri 5.0 ile ilgili belgelenmiş kayıtlar 2017 yılına tarihlenmektedir. Ancak 2021 yılında Avrupa Birliği tarafından resmîyet kazanarak, Avrupa'daki şirketler ve sanayiler için çevresel, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirliği öncelikli hale getirmek amacıyla gündeme gelmiştir. Öte yandan, Endüstri 5.0, üretimin insan ve çevresel boyutlarını sanayi faaliyetlerine



entegre etmeye çalışmaktadır (Tunji-Olayeni vd., 2024). Endüstri 5.0, önceki sanayi devrimlerinin üzerine inşa edilmekte ve ürün ve hizmetlerin geliştirilmesini yönlendirmek için insanları merkeze yerleştirmeye vurgu yapmaktadır (Agarwal ve Alathur, 2023).

Endüstri 5.0 paradigmasının ortaya çıkışı, Avrupa Komisyonu'nun "Avrupa Endüstri 5.0" perspektifini tanıtmayla kritik bir noktaya ulaşmıştır. 2021 yılında yayımlanan ajandasında Avrupa Komisyonu, Endüstri 5.0'ı mevcut Endüstri 4.0 paradigmasının tamamlayıcı bir uzantısı olarak sunmuş ve bu yaklaşımın ortaya çıkan sosyo-çevresel ihtiyaçları karşılamak üzere tasarlandığını belirtmiştir. Avrupa Komisyonu, 2022 yılının başlarında Endüstri 4.0'a karşı daha iddialı bir duruş sergileyerek, acil iklim krizi ve sosyal gerilimlerle başa çıkmak için uygun olmadığını, ileri sürmüştür. Bu kapsamda Endüstri 5.0'ı endüstriyel gelişim için yeni bir vizyon olarak savunmakta; değer zincirlerinin, iş modellerinin ve dijital dönüşümün rolünü ve işlevselliğini, günümüzün aşırı bağlantılı iş ortamında yeniden şekillendirmektedir. Avrupa Komisyonu'nun Endüstri 5.0 konusundaki bu görüşü, farklı bakış açılarını bir araya getirerek birleşik bir anlayış oluşturmuştur. Bu görüşe göre, Endüstri 5.0, endüstriyel gelişim sürecine, özellikle çevresel sürdürülebilirlik, dayanıklılık ve insan merkezilik olmak üzere, geniş kapsamlı sürdürülebilir kalkınma hedeflerini entegre etmektedir. Avrupa Komisyonu, bu temel unsurları bir araya getirerek, Endüstri 5.0'ı toplumsal refahı, ekolojik korumayı ve uyum sağlama yeteneğini önceliklendiren kapsamlı bir çerçeve olarak öngörmüştür. (Ghobakhloo vd., 2024). Avrupa Komisyonu'na göre, sanayinin refahın motoru olmaya devam edebilmesi için dijital ve yeşil dönüşümlere öncülük etmesi gerekmektedir. Endüstri 5.0, yalnızca verimlilik ve üretkenliği hedefleyen bir vizyonun ötesine geçerek, sanayinin topluma olan rolünü ve katkısını güçlendiren bir endüstri vizyonu sunmaktadır. Bu yaklaşım, üretim sürecinin merkezine çalışanın refahını yerleştirmekte ve iş ve büyümenin ötesinde bir refah sağlamak amacıyla yeni teknolojilerden yararlanırken, gezegenin üretim sınırlarına saygı göstermektedir. Endüstri 5.0, mevcut "Endüstri 4.0" yaklaşımını tamamlayarak, sürdürülebilir, insan merkezli ve dirençli bir Avrupa sanayisine geçiş sürecinde araştırma ve yeniliği hizmete sunmaktadır (Gagnidze, 2023).

Endüstri 5.0, sürdürülebilir, insan merkezli ve esnek bir üretim endüstrisine yönelik organizasyonel dönüşüme odaklanmakta ve esnek ve uyarlanabilir üretim süreçleri için yetenekler, çeşitlilik ve güçlendirme ön plana çıkmaktadır. Endüstri 4.0 teknolojilerinin uygulanmasında karşılaşılan zorluklarla başa çıkarken, insan etkileşimi, eleştirel düşünme ve yorumlama yeteneklerinin kritik olduğu savunulmaktadır. Dijital dönüşüm gibi organizasyonel değişimlerin ele alınmasında, tüm çalışanların katılımı, stratejik iletişim, yenilikçilik ve liderlik gibi sosyal sürdürülebilirlik unsurlarının dahil edilmesi gerektiği öne sürülmektedir (Eriksson vd., 2024). Endüstri 5.0, insan merkezli bir sistemi benimseyerek, insanın bilişsel düşünce gücünü gerekli görevlere aktarırken, sürekli tekrar eden görevleri hızlı ve doğru bilgi teknolojisi destekli entegre makineler ve robotlara devredebilir. Endüstri 5.0, insanı merkeze alan bir tasarım çözümdür (Kumar vd., 2024).

Endüstri 5.0 kavramı, mevcut 4.0 yaklaşımını, sürdürülebilir, insan odaklı ve dayanıklı bir üretim endüstrisine odaklanarak tamamlamayı amaçlamaktadır. Endüstri 4.0'da ana odak yeni dijital teknolojilerin uygulanmasıyken, Endüstri 5.0'ın insan ve teknoloji arasındaki bağlantıya odaklanan insan odaklı perspektifini öne çıkarmaktadır. Endüstri 5.0, üretim süreçlerinde operatörleri ve mühendisleri vurgulamakta, insan iş prosedürlerini, rutinlerini, karar destek mekanizmalarını ve bilgi alışverişini optimize etmeye odaklanmaktadır (Eriksson vd., 2024). Endüstri 5.0, yapay zeka, robotik ve nesnelerin interneti gibi ileri teknolojileri insan becerileriyle sorunsuz bir şekilde entegre ederek, daha bütünleşik, işbirlikçi ve sürdürülebilir bir üretim süreci oluşturmayı amaçlamaktadır (Agarwal ve Alathur, 2023). Endüstri 5.0, dijital teknolojileri kullanarak istihdam ve gelişimin ötesinde refah yaratmayı amaçlayan ve gezegenin üretim kısıtlamalarını gözetken bir üretim konseptidir. İnsanların yaratıcılığını, verimli, akıllı ve hassas makinelerle iş birliği içinde kullanarak kaynak açısından verimli ve kullanıcı tercihli üretim çözümleri elde etmeyi amaçlamaktadır. Ayrıca, sanayinin yüksek derecede esneklik potansiyeline sahip olduğunu kabul etmekte, sürdürülebilir üretime odaklanmakta ve işçilerin refahını üretim sürecinin merkezine yerleştirmektedir (Tunji-Olayeni vd., 2024).

Endüstri 5.0'ın Endüstri 4.0'dan temel farkı, yalnızca organizasyonel kârlar için makinelerin ve teknolojilerin verimliliğine odaklanmak yerine, insana ve çevreye yeniden odaklanılmasıdır. Endüstri 5.0, insanların yaratıcılığını verimli, akıllı ve hassas makinelerle iş birliği içinde kullanarak, kaynak açısından verimli ve kullanıcı tercihli üretim çözümleri elde eden bir üretim türüdür. Endüstri 5.0 üretimde insan ve çevresel boyutların sanayi faaliyetlerine entegrasyonu olarak tanımlanmaktadır ve verimlilik, üretkenlik ve karlılığı artırmak için dijital teknolojilerden yararlanmayı içermektedir (Tunji-Olayeni vd., 2024). Endüstri 5.0, sanayi

gelişimi alanında ihtiyaç duyulan bir dönüşümü temsil etmekte ve Endüstri 4.0 tarafından belirlenen sınırların ötesine geçmektedir. Endüstri 4.0 öncelikli olarak teknoloji odaklı ilerlemeler, otomasyon ve veri odaklı verimlilik artışlarına odaklanırken, Endüstri 5.0, sürdürülebilirlik, insan merkezilik ve toplumsal refaha vurgu yapmaktadır. Endüstri 5.0, endüstrilerin ekolojik sınırlar içinde faaliyet göstermesi gerektiğini, çevresel etkileri azaltmayı ve işçilerin ve toplumun genel refahını önceliklendirmeyi kabul etmektedir (Ghobakhloo vd., 2024).

Endüstri 5.0, sanayinin yüksek derecede dayanıklılık potansiyeline sahip olduğunu kabul eden, sürdürülebilir üretime odaklanan ve işçilerin refahını üretim sürecinin merkezine yerleştiren bir üretim olarak tanımlanabilir. Bu, dijital teknolojileri kullanarak işçilerin refahını önceliklendiren ve istihdam ve gelişimin ötesinde, gezegenin üretim kısıtlamaları dahilinde zenginlik yaratan bir üretim konseptidir. Ayrıca, insan beyin gücü ve akıllı sistemler aracılığıyla verimliliği artırmak için bir fabrikada insanların ve makinelerin iş birliğini içeren bir yaklaşımdır. Avrupa Birliği'nin vizyonuna paralel olarak, Endüstri 5.0 sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmayı hızlandırırken insan değerlerini teknolojiyle bütünleştirerek sürdürülebilirliği uygulamaya koymayı amaçlamaktadır. Endüstri 5.0 hem işçilerin hem de gezegenin sınırlarına saygı gösteren bir üretim modeli olarak tanımlanmaktadır (Tunji-Olayeni vd., 2024). Endüstri 5.0'nin ortaya çıkışı, hem heyecan hem de şüphe uyandırmıştır. Endüstri 5.0, teknoloji odaklı gelişmeler ile toplumsal motivasyonlu bir çerçevenin birleşimi olarak kendini sunmakta ve dijital yenilik ile insan merkezli değerler arasındaki boşluğu kapatmayı amaçlamaktadır. Ancak, Endüstri 5.0 hedef ve amaçlarının algılanan idealizmi sürekli olarak eleştirilmektedir. Eleştiriciler, bu teknolojilerin daha çok geleceğe yönelik olduğunu, gerçekçi olmadığını ve birçok şirketin bu teknolojileri operasyonlarına dahil etmekten oldukça uzak olduğunu ileri sürmektedir (Ghobakhloo vd., 2024). Endüstri 5.0 üzerine tartışmalar son zamanlarda başlamış olup, şimdiden aktif bir tartışma konusu haline gelmiştir. Endüstri 5.0 kavramı, “insan/değer odaklı Endüstri 4.0'ın kaybolan boyutunu yeniden tanıtmak” olarak da tanımlanabilmektedir. Endüstri 5.0, mevcut Endüstri 4.0 paradigmasının yerine geçecek ya da alternatif olacak bir kavram olarak değil, evrimi ve mantıksal bir devamı olduğu da ileri sürülmektedir (Gagnidze, 2023).

Teknolojik bileşenlerin tanınması ve kategorize edilmesi konusunda üç farklı bakış açısı bulunmaktadır: Birincisi; Endüstri 5.0'in Endüstri 4.0'ın doğal fakat kademeli bir uzantısı olarak görülmesidir. Bu perspektiften bakıldığında, Endüstri 5.0, Endüstri 4.0'ın teknolojik temeli üzerine inşa edilmekte, ortaya çıkan zorluklar ve fırsatları ele almak için teknolojik bileşenlerini dahil etmekte ve geliştirmektedir. İkincisi, Endüstri 5.0 Endüstri 4.0'dan daha radikal bir ayrılma olarak görülmesiyle, tamamen yeni ve yıkıcı teknolojiler tanıtan bir paradigma kayması olarak, tanımlanmasıdır. Bu bakış açısına göre, Endüstri 5.0, geleneksel dijital teknolojilerden bir uzaklaşmayı temsil etmekte ve yeni bir endüstriyel manzara oluşturmak için devrim niteliğindeki ilerlemeleri benimsemektedir. Üçüncüsü, kapsayıcı bir tutum benimseyerek Endüstri 5.0'in, Endüstri 4.0'ın unsurlarını ve yeni dönüştürücü teknolojileri içeren hibrit bir yaklaşım olarak tanınmasıdır. Endüstri 5.0'ı, yerleşik dijital teknolojileri son teknoloji yeniliklerle harmanlayarak, daha bütüncül ve sinerjik bir endüstriyel ortam oluşturmak için iki dünyanın en iyilerini birleştiren bir yaklaşım olarak görülmektedir. Endüstri 5.0'daki bilişsel teknolojileri, devam eden operasyonlar sırasında desen algılama yeteneklerine, öz farkındalığa, hataları düzeltme yeteneğine ve bilgiye dayalı karar verme yetisine sahip olarak tanımlamaktadır. Bu perspektifte, Endüstri 4.0'da ortaya çıkan belirli teknolojilerin, Endüstri 5.0 gündemi altında önemli ölçüde genişlediği ileri sürülmektedir. Özellikle, “Her Şeyin İnterneti” (IoE) terimi, nesnelerin interneti (IoT)'nin Endüstri 5.0 içindeki daha geniş uygulamasını vurgulamak için önem kazanmıştır. IoE için Endüstri 5.0'in kapsayıcı entegrasyon gereksinimlerini karşılamak için endüstriyel sistemlerin, veri yönetim sistemlerinin, akıllı ürünlerin ve akıllı tüketicilerin entegrasyonunu içerdiğini ileri sürülmektedir. Benzer şekilde, akıllı enerji yönetim sistemleri ve akıllı ürün yaşam döngüsü yönetim sistemleri gibi teknolojiler, Endüstri 5.0'da temel teknolojik bileşenler olarak tanınmakta ve döngüsellik hedeflerine ulaşılmasına katkıda bulunmaktadır. Genel olarak, yukarıda tartışılan üç bakış açısı, Endüstri 5.0'daki çeşitli teknolojilerin dinamik genişlemesini ve entegrasyonunu vurgulamakta, gelişen teknolojik yapısının bütüncül bir bilimsel incelemesini teşvik etmektedir. Şekil 2, üç perspektifi ve bunların Endüstri 5.0 içerisindeki teknolojilerle olan ilişkilerini kapsamlı bir şekilde özetlemektedir (Ghobakhloo vd., 2024).

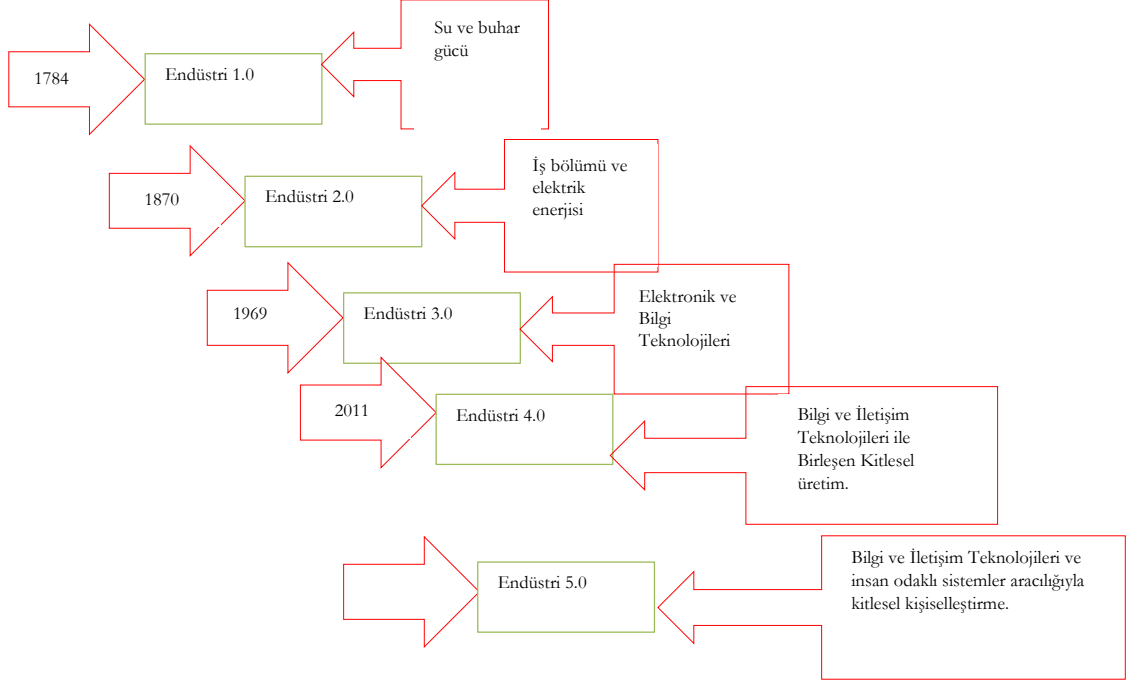
Şekil 2. Endüstri 5.0 Teknolojilerine ve Bunların Temel Sınıflandırmalarına İlişkin Perspektifler

<p><b>Birinci perspektif:</b> <b>Endüstri 4.0'ın doğal fakat kademeli bir genişlemesi.</b> Endüstri 5.0 teknolojileri, mevcut dijital teknolojilerin devamı ve iyileştirilmesi üzerine inşa edilmektedir.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eklemeli üretim.</li> <li>• Büyük veri.</li> <li>• Blockchain.</li> <li>• Bulut bilişim.</li> <li>• Siber güvenlik ve kriptograf.</li> <li>• Uç hesaplama.</li> <li>• Gömülü sistem.</li> <li>• Girişimcilik sistemi.</li> <li>• Yürütme sistemi.</li> <li>• Endüstri kontrol sistemleri.</li> <li>• Endüstriyel robotlar.</li> <li>• Nesnelerin interneti.</li> <li>• Makine öğrenmesi.</li> <li>• Şebeke altyapısı.</li> </ul>	<p><b>İkinci perspektif:</b> <b>Endüstri 4.0'dan köklü bir kopuş.</b> Endüstri 5.0, geleneksel dijital teknolojilerden bir kopuşu temsil etmekte ve devrim niteliğindeki teknolojik ilerlemeleri benimsemektedir.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Genel yapay zeka.</li> <li>• Biyo-yaratıcı teknolojiler.</li> <li>• Biyosensörler</li> <li>• Beyin-makine arayüzleri.</li> <li>• Nedensel yapay zeka.</li> <li>• Fiber bilgisayar teknolojileri.</li> <li>• Genler bilimi.</li> <li>• İnsansı robot.</li> <li>• Tıbbi nesnelerin interneti.</li> <li>• Kendini iyileştiren/tamir eden malzeme.</li> <li>• Akıllı öğrenme materyali.</li> <li>• Sürü zekası.</li> </ul>	<p><b>Üçüncü perspektif:</b> <b>Endüstri 4.0 teknolojisinin önemli ölçüde dönüşümü.</b> Endüstri 5.0, Endüstri 4.0 unsurlarını ve yeni dönüştürücü teknolojileri bir araya getiren hibrit bir yaklaşımdır.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Uyarlanabilir (bilişsel) robotik.</li> <li>• Bilişsel siber-fiziksel sistemler.</li> <li>• Bilişsel üretken yapay zeka.</li> <li>• Genişletilmiş gerçeklik.</li> <li>• İnsan tanıma teknolojileri.</li> <li>• Endüstriyel giyilebilir teknolojiler.</li> <li>• Her Şeyin İnterneti (IoE).</li> <li>• Mobil otonom robotlar.</li> <li>• Çok ölçekli dinamik simülasyon.</li> <li>• Akıllı enerji yönetim sistemi.</li> <li>• Akıllı ürün yaşam döngüsü yönetimi.</li> </ul>
---	---	--

**Kaynak:** Ghobakhloo vd., 2024 s. erken görünüm sayısı.

Gerçekte Endüstri 5.0, Endüstri 4.0 tarafından oluşturulan teknolojik temele dayanırken, bu iki kavram arasında ayırım yapmak önemlidir. Endüstri 4.0, endüstriyel süreçlerin dijitalleştirilmesi ve otomatikleştirilmesi etrafında odaklanarak, artan üretkenlik ve ekonomik büyümeye yol açmıştır. Ancak, uygulamaları bazen çevresel ve toplumsal endişeleri göz ardı etmiş ve teknolojik ilerlemelerin iş kayıplarına ve sosyal eşitsizliklere yol açabileceği üzerine tartışmalara neden olmuştur (Ghobakhloo, 2024). Endüstri 4.0'ın iç üretim mekanizması, üretim verimliliğini artırırken mikro çevresel sürdürülebilirlik açısından çevresel azaltım ölçütlerini iyileştirse de, gelir odaklılık, üretim-tüketim ve ekonomik paradigmalardan ötesine geçememektedir. Ayrıca, eleştirmenler Endüstri 4.0'ın daha çok karlılık ve hissedar üstünlüğünü vurgulayan neoliberal kapitalist modele odaklandığını ve bunun sonucunda ekolojik tükenme, bölgesel eşitsizlik ve zayıf ekonomi gibi bazı ekolojik-sosyal endişelerin arttığını ileri sürmektedir (Kaswan vd., 2024). Buna karşılık, Endüstri 5.0, sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu olacak şekilde dijital endüstriyel dönüşümü düzenlemeyi amaçlayan toplum odaklı bir gündem olarak ortaya çıkmaktadır. Endüstri 5.0, endüstrilerin rolünü yeniden tanımlamayı amaçlamakta; onları sadece servet üreten yapılar olarak değil, aynı zamanda toplumsal sorunların çözümüne aktif katkı sağlayan birer unsur olarak görmektedir. Endüstri 5.0'ın, Endüstri 4.0'ın devam eden ilerlemesiyle eş zamanlı olarak ortaya çıkması, iklim değişikliği, biyolojik çeşitlilik kaybı ve kaynak tükenmesi gibi giderek daha belirgin hale gelen sonuçlar, endüstrilerin çevresel etkilerini azaltma sorumluluğu hakkında tartışmalara yol açmasıyla ilişkilidir. Ayrıca, etik tüketiciliğin yükselişi ve toplumun işletmelerin sorumlu davranmasını beklemesi, Endüstri 5.0'ın önemini ve geçerliliğini artıran faktörler arasında yer almaktadır (Ghobakhloo, 2024). Şekil 3. Endüstri 1.0'dan Endüstri 5.0'a kadar olan farklı sanayi devrimlerini göstermektedir.

Şekil 3. Endüstri Devrimleri



Kaynak: Kaswan vd., 2024 s. erken görünüm sayısı.

### 3. ENDÜSTRİ 4.0 ve 5.0'İN MATEMATİKSEL KÜMELERLE İFADESİ

Endüstri 4.0 ve 5.0'in matematiksel küme teorisi ile modellenmesinden önce, bazı temel küme işlemleri aşağıda ifade edilmektedir:

- 1)  $A$  ve  $B$  iki küme olsun.  $A$  ve  $B$  kümelerinin tüm ortak elemanlarından oluşan kümeye kesişim kümesi denilmektedir.

“ $\cap$ “ : kesişim sembolü ile  $A \cap B$  biçiminde gösterilmektedir.

$A \cap B = \{ x \mid x \in A \text{ ve } x \in B \}$  kümesi biçimindedir.

- 2)  $A$  ve  $B$  iki küme olsun.  $A$  ve  $B$  kümelerinin tüm elemanlarından oluşan kümeye birleşim kümesi denilmektedir.

“ $\cup$ “ : birleşim sembolü ile  $A \cup B$  biçiminde gösterilmektedir.

$A \cup B = \{ x \mid x \in A \text{ veya } x \in B \}$  kümesi biçimindedir.

- 3)  $A$  ve  $B$  iki küme olsun.  $A$  kümesinde olup,  $B$  kümesinde olmayan tüm elemanlardan oluşan kümeye,  $A$  kümesinin  $B$  kümesinden farkı denilmektedir.

$A \setminus B$  veya  $A - B$  biçiminde gösterilmektedir.

$A \setminus B = \{ x \mid x \in A \text{ ve } x \notin B \}$  dir.

Dünya bir evrensel küme, insanlığın geliştirdiği birçok unsurda bu evrensel kümenin alt kümeleri olarak ifade edilmektedir. Bu alt kümelerin elemanları; insanlık tarihi boyunca gelişmesini sürdürmeye devam eden ekonomi (E), tarım (T), eğitim (G), ulaşım (U), sağlık (S), lojistik (L), pazarlama (P), enerji (J), sosyal hayat (SH), buhar (B), mekanizasyon (M), kentleşme (K), üretim (Ü), teknolojik gelişme (TG), motor (R), vb. (D1) gibi en temel unsurlardır ve özet ifadesi aşağıda matematiksel küme teorisi ile açıklanmaktadır:

$$E1 = \{E, T, G, U, S, L, P, J, SH, B, M, K, Ü, TG, R, D1\}$$

Bu unsurlar Endüstri 1.0 döneminde var olup tarihsel seyir içerisinde ve Endüstri devrimleriyle beraber gelişmesine devam ederek günümüze kadar gelmiştir. Endüstri 1.0 dönemine ait olan bu unsurlar diğer endüstri devrimlerinin teknolojik gelişmelerine paralel olarak değişim sağlamış ama her endüstri döneminde de insan hayatında var olmaya devam etmiş ve bundan sonra da devam edecektir. Bu ifadeye bağlı olarak endüstri devrimlerinde var olan değişimlere bakıldığında; Endüstri 1.0 döneminde var olan tüm unsurlar Endüstri 2.0 döneminde de varlığını ve gelişimini sürdürerek yeni gelişmelere de yer vermiştir.

Endüstri 1.0 dönemindeki unsurlara ek olarak Endüstri 2.0 döneminde kitlesel üretim (KÜ), elektrik (EL), standardizasyon (ST), içten yanmalı motor (IR), elektrik şebekeleri (EŞ), telefon (N), telgraf (F), radyo (Y), vb. (D2) gibi yeni unsurlarda insan hayatına eklenmiştir. Endüstri 2.0 döneminde ki bu gelişmelerin özet ifadesi aşağıda küme teorisi ile açıklanmaktadır:

$$E2 = \left\{ \bigcup_{i=1}^2 E_i \right\} = E1 \cup \{KÜ, EL, ST, IR, EŞ, N, F, Y, D2\} = E1 \cup (E2 - E1)$$

Endüstri 2.0 da var olan gelişmelere ek olarak ortaya çıkan yenilikler otomasyon (O), elektronik (ET), internet (IN), veri (V), vb. (D3) gibi unsurlar Endüstri 3.0 kümesini oluşturmuştur. Bu gelişmeler matematiksel küme teorisi kapsamında, aşağıda özet olarak ifade edilmektedir:

$$E3 = \left\{ \bigcup_{i=1}^3 E_i \right\} = E2 \cup \{O, ET, IN, V, D3\} = E2 \cup (E3 - E2)$$

Gelişim devam ederek Endüstri 4.0 dönemi yaşanmış ve bu dönemde tüm bu teknolojilere ve gelişmelere ek olarak akıllı teknolojiler (AT), ağ sistemleri (AS), bulut bilişim (BB), sınırlı kaynakların verimli kullanılması (VK), sanayi (SY), otomatik üretim (OÜ), yüksek verimlilik (YV), sistemler arası entegrasyon (SE), hizmet sunumunda kalite (HK), dijitalleşme (DJ), yapay zeka (YZ), nesnelerin interneti (IoT), büyük veri (BV), makine öğrenimi (MO), eklemeli imalat (EI), blockchain (CH), robot (RT), vb. (D4) gibi yenilikler Endüstri 1.0 dan Endüstri 3.0' a kadar var olan tüm unsurları geliştirmiştir. Bu gelişmeler matematiksel küme teorisi kapsamında, aşağıda özet olarak ifade edilmektedir:

$$E4 = \left\{ \bigcup_{i=1}^4 E_i \right\} = E3 \cup \{AT, AS, BB, VK, SY, OÜ, YV, SE, HK, DJ, YZ, IoT, BV, MO, EI, CH, RT, D4\} \\ = E3 \cup (E4 - E3)$$

Bu gelişmelere ek olarak her şeyin interneti (HI), toplum odaklı (TO), iletişim teknolojileri ve insan odaklılık kullanılarak kitlesel kişiselleştirme (IIT), vb. (D5) gibi yeni unsurlar Endüstri 5.0 dönemini oluşturmaktadır ve matematiksel küme teorisine dayalı özet ifadesi aşağıda açıklanmaktadır.

$$E5 = \left\{ \bigcup_{i=1}^5 E_i \right\} = E4 \cup \{HI, TO, IIT, D5\} = E4 \cup (E5 - E4)$$

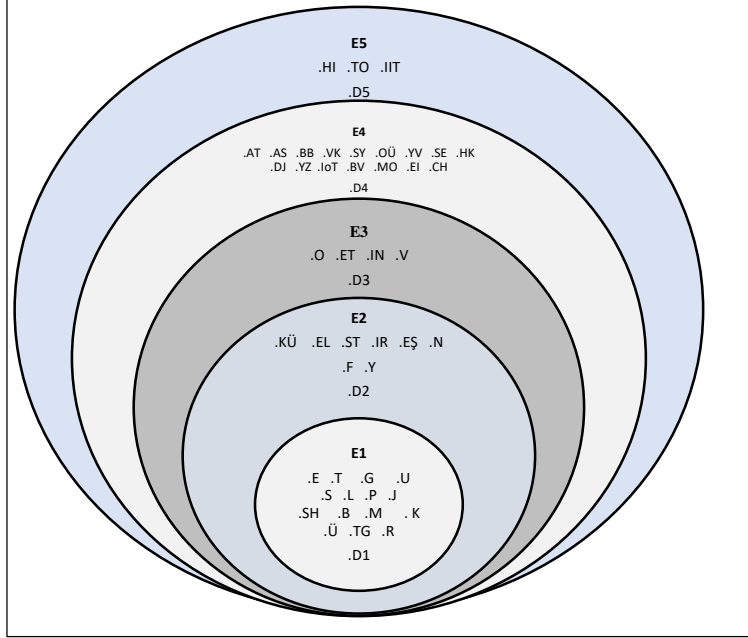
Bu gelişmelerin hepsi günümüz dünyasında olduğundan evrensel küme olarak dünya göz önüne alınmıştır. Tüm bu unsurlar incelendiğinde bu kümeler arasında matematiksel olarak

$$E1 \subset E2 \subset E3 \subset E4 \subset E5 \subset E$$

ilişkisinin varlığı açıktır.

Evrensel kümenin alt kümeleri, D1, D2, D3, D4 ve D5 kümelerine eklenmemiş olan ve makale içerisinde yer verilmeyen diğer elemanlar olmak üzere, aşağıda ve Şekil 4'de ifade edilmektedir:

Şekil 4. Endüstri 1.0, 2.0,3.0,4.0 ve 5.0 Venn Diyagramı



**Kaynak:** Yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 4'de yer alan Venn Diyagramı da insanlığın dönüşmeye başladığı dönemin Endüstri 1.0 dönemi olduğunu özetlemektedir. Yani gelişimi tetikleyen unsurlar E1 döneminde var olan unsurlardır. Bu durum matematiksel olarak;

$$E1 = \left\{ \bigcap_{i=1}^5 E_i \right\}$$

ifade edilir. Bu dönemde var olan tüm bileşenlerde Endüstri devrimlerinde gerek teknolojik yenilikler ve gerekse de enerji alanlarındaki yeniliklerle gelişmesini sürdürmüştür. Örnek olarak Eğitim Endüstri 1.0 da bir eleman iken bu eleman bütün Endüstri dönemlerinde gelişmesini devam ettirmiştir. Bu gelişme matematiksel olarak;

$$E5 = \left\{ \bigcup_{i=1}^5 E_i \right\}$$

biçiminde ifade edilir.

Endüstri 2.0 da bilgisayarın toplumun hayatına girmesiyle beraber Endüstri 1.0 daki tüm bileşenler bu teknolojiyle doğru orantılı olacak şekilde gelişmesini sürdürmüştür ve bu farklı elemanlarda Endüstri 3.0 dönemine hazırlık sürecini başlatmıştır. Buna göre Endüstri 3.0 döneminin başlamasına neden olan unsurlar; Endüstri 2.0 dönemindeki unsurların Endüstri 1.0 dönemindeki unsurlardan farklıdır. Yani Endüstri 3.0 döneminin başlamasını tetikleyen unsurlar  $E_3H$  ile gösterilmiş ve;

$$E_3H = E2 - E1 = \{KÜ, EL, ST, IR, EŞ, N, F, Y, D2\}$$

unsurlarındaki gelişmelerle beraber  $E1$  kümesinin elemanları arasındaki farktan oluşmaktadır.

Modellemeye devam edilmesi durumunda Endüstri 4.0 döneminin başlamasını tetikleyen unsurlar  $E_4H$  biçiminde gösterilerek;

$$E_4H = E3 - (E1 \cup E2) = E3 - \left\{ \bigcup_{i=1}^2 E_i \right\} = E3 - E2 = \{O, ET, IN, V, D3\}$$

unsurlarındaki gelişmelerle  $E2 = E1 \cup E2$  kümesinin elemanlarının arasındaki farktan oluşmuştur. Bu modelleme geliştirme yapmamıza neden olacaktır ki Endüstri 5.0 dönemini  $E_5H$  biçiminde gösterip;

$$E_5H = E4 - (E1 \cup E2 \cup E3) = E4 - \left\{ \bigcup_{i=1}^3 E_i \right\} = E4 - E3 \\ = \{AT, AS, BB, VK, SY, OÜ, YV, SE, HK, DJ, YZ, IoT, BV, MO, EI, CH, RT D4\}$$

unsurlarındaki ve  $E3 = E1 \cup E2 \cup E3$  kümesinin elemanları arasındaki fark ile başlayacaktır.

Matematiksel Modelleme Endüstri devrimlerinin gelişmesiyle beraber diğer bir Endüstri döneminin başlamasına neden olacak gelişmeleri kolaylıkla modellememize neden olur. Buna göre Endüstri 6.0 hazırlık dönemi  $E_6H$

$$E_6H = E5 - (E1 \cup E2 \cup E3 \cup E4) = E5 - \left\{ \bigcup_{i=1}^4 E_i \right\} = E5 - E4 = \{HI, TO, IIT, D5\}$$

biçiminde modellenirken Endüstri n.0 hazırlık dönemi  $E_nH$

$$E_nH = E(n-1) - \left\{ \bigcup_{i=1}^{n-2} E_i \right\} = E(n-1) - E(n-2)$$

biçiminde modellenerek geliştirilebilir. Bu modele göre Endüstri 10.0 hazırlık dönemi

$$E_{10}H = E9 - \left\{ \bigcup_{i=1}^8 E_i \right\} = E9 - E8$$

Elemanları arasındaki fark sonucunda başlayacaktır.

#### 4. SONUÇ

18. yüzyılda Endüstri 1.0'ın başlamasıyla sanayi devrimi ve teknolojik ilerlemeler hız kazanmış; bu süreç, 19. yüzyılda Endüstri 2.0, 20. yüzyılda Endüstri 3.0, 21. yüzyılda Endüstri 4.0 ve günümüzde Endüstri 5.0 ile devam etmiştir. Bu kapsamda yaşanan ilerlemelerin önümüzdeki yıllarda da süreceği açıktır. Söz konusu gelişmeler, her sektördeki işletmelerin üretim ve faaliyetlerini derinden etkilemiş ve etkilemeye devam etmektedir. Bu gelişmelere ayak uyduramayan işletmelerin verimlilik kaybı yaşayacağı ve pazardaki rekabet avantajını kaybedeceği açıktır. Teknolojik yeniliklerin hızla ilerlemesi, işletmelerin bu değişimlere uyum sağlamak için esnek stratejiler geliştirmelerini zorunlu kılmaktadır. Aksi takdirde, teknoloji odaklı rekabet gücünü kaybetme riski artmaktadır. Günümüzde dijital platformlar aracılığıyla yürütülen iş modelleri, geleneksel iş yapma biçimlerinin yerini alarak esnek iş modellerine ihtiyaç doğurmuştur. Özellikle, teknolojik gelişmelere uyum sağlamak için yalnızca teknolojiyi entegre etmek yeterli olmayıp, işletmelerin çalışanlarını da bu değişim sürecine adapte edecek şekilde eğitmesi gerekmektedir. Buna ek olarak, sürdürülebilir iş modellerini benimseyen işletmeler, yalnızca değer yaratma ve kar elde etme amacı gütmekle kalmayıp, sosyal sorumluluk bilinciyle itibarlarını da güçlendirecektir.

Endüstri 4.0 ve Endüstri 5.0'in önemini açık olduğu bu noktada, bu kavramların matematiksel bir dil ve sunum yöntemleriyle ifade edilmesi, farklı sektörlerdeki gelişim süreçlerinin küme teorisi gibi alternatif yaklaşımlar aracılığıyla modellenmesine ve uygulanmasına önemli katkılar sunabilir. Endüstri 5.0, akıllı teknolojiler (AT), ağ sistemleri (AS), bulut bilişim (BB), sınırlı kaynakların verimli kullanımı (VK), sanayi

(SY), otomatik üretim (OÜ), yüksek verimlilik (YV), sistemler arası entegrasyon (SE), hizmet sunumunda kalite (HK), dijitalleşme (DJ), yapay zeka (YZ), nesnelerin interneti (IoT), büyük veri (BV), makine öğrenimi (MO), eklemeli imalat (EI), blockchain (CH) ve robot teknolojileri (RT) gibi unsurlar üzerinden modellenmektedir. Bu çalışmada, içinde bulunduğumuz Endüstri 5.0 dönemi Endüstri 1.0, Endüstri 2.0, Endüstri 3.0, Endüstri 4.0'ı hem kapsayacak hem de farkını ortaya koyacak şekilde aşağıda matematiksel küme teorisi ile özetlenmektedir.

$$E_5H = E4 - (E1 \cup E2 \cup E3) = E4 - \left\{ \bigcup_{i=1}^3 E_i \right\} = E4 - E3$$
$$= \{AT, AS, BB, VK, SY, OÜ, YV, SE, HK, DJ, YZ, IoT, BV, MO, EI, CH, RT, D4\}$$

Bu kapsamda Endüstri 4.0 ve Endüstri 5.0 süreçlerinin matematiksel küme teorisi ile modellenmesi ile elde edilebilecek teorik ve pratik katkıları şu şekilde ifade edebiliriz:

Endüstri 4.0 ve Endüstri 5.0 süreçlerine dair mevcut teorik yaklaşımlara “Matematiksel Küme Teorisi” kullanılarak yeni bir analitik çerçeve sunularak, bu süreçler arasındaki ilişkiler ve etkileşimler daha net açıklanabilmektedir. Aynı zamanda Endüstri 4.0 ve 5.0'ın teknolojik bileşenlerinin, birbirleriyle olan ilişkilerinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlanmaktadır. Endüstri 4.0 ve 5.0'a dair matematiksel modellemeler üzerine literatürdeki boşlukların doldurulmasına ve teorik düzeyde, bu endüstriyel dönüşüm süreçlerinin sistematik bir şekilde ele alınması, bu alandaki araştırmalara katkı sağlamaktadır.

Küme teorisi modeli, dijitalleşme sürecinde işletmelerin karşılaştığı teknolojik unsurların sistematik olarak tanımlanmasına olanak tanımaktadır. Bu da, işletmelerin yeni teknolojileri etkin bir şekilde entegre etmesine ve kaynaklarını daha verimli kullanmasına yardımcı olabilir. Küme teorisi tabanlı analizler, işletmelerin verimliliklerini artıracak yeni yöntemler geliştirmelerine yardımcı olabileceğine sahiptir. Aynı zamanda, işletmelerin hızlı teknolojik gelişmelere uyum sağlama süreçlerinde daha esnek stratejiler geliştirmelerine olanak tanıyarak, pazarda rekabet avantajı sağlayabilir.

Bu teorik ve pratik katkılar, Endüstri 4.0 ve 5.0'ın daha derinlemesine anlaşılmasını sağlarken, aynı zamanda bu süreçlerin işletme ve sanayi dünyasına uygulanabilirliğini artırmaktadır. Böylece, Endüstri 4.0 ve Endüstri 5.0'ın “Matematiksel Küme Teorisi” ile özet olarak ifade edilmesinin konunun önemini vurgulaması ve konuya dikkat çekmesi yönüyle dijital dönüşümün etkin bir şekilde yönetilmesine katkı sağlaması beklenmektedir.

---

**Etik Beyan:** Bu çalışma için Etik Kurul iznine gerek duyulmamaktadır. Aksi bir durumun tespiti halinde Sosyal Ekonomik Araştırmalar Dergisinin hiçbir sorumluluğu olmayıp, tüm sorumluluk çalışmanın yazar(lar)ına aittir.

**Yazar Katkı Beyanı:** 1. Yazarın katkı oranı %50, 2. Yazarın katkı oranı ise %50'dir.

**Çıkar Beyanı:** Yazar(lar) herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir(ler).

**İntihal Beyanı:** İthenticate yazılımıyla makalenin benzerlik taraması yapılmıştır.

**Lisans:** Creative Commons Atf-GayriTicari 4.0 Uluslararası (CC BY-NC 4.0) Lisansı ile lisanslanmıştır.

**Ethics Statement:** Ethical Committee approval is not required for this study. In case of detection of a contrary situation, the Journal of Social Economic Research has no responsibility and all responsibility belongs to the author (s) of the study.

**Author Contributions Statement:** 1st author's contribution rate 50%, 2nd author's contribution rate 50%.

**Conflict of Interest:** The author(s) declare/declares that there is no conflict of interest.

**Plagiarism:** A check for plagiarism on this article was conducted by using Ithenticate Software.

**License:** Licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0).

---



## EXTENDED ABSTRACT

### The Modeling of Industry 4.0 and 5.0 Applications Using Mathematical Set Theory

#### INTRODUCTION AND PURPOSE

Industry 4.0 refers to the technological revolution taking place in industries, business models, strategies, and processes through the application of technologies such as big data analytics, artificial intelligence, the Internet of Things, and digital twins. The aim of these technologies is to enhance production and improve the quality of products and services. Despite the need for the conceptualization and mapping of existing digital technologies in the market and society today, Industry 4.0 research has largely focused on the impact of technology on industry and production rather than broadening the perspective to include sustainability and well-being. To address the limitations of the Industry 4.0 approach, the Industry 5.0 paradigm was introduced.

Industry 5.0 emphasizes the need to integrate a human-centered perspective into how we think about "machines" (a symbol of technology) to consider the social and environmental impacts of technology while also enhancing competitiveness and innovation. This focus on human-machine interaction highlights the necessity of empowering people to create personalized products and services (Troisi et al., 2024). The presentation of ideas in a coherent and precise manner can be better understood when we learn the fundamental mathematical language and presentation methods. In this context, "set theory" forms the basis of mathematical thinking and language (Choudhary et al., 2019).

Modeling the technological era of Industry 4.0 and Industry 5.0 using set theory has the potential to provide a different perspective to both the theory and the periods of Industry 4.0 and Industry 5.0. This study focuses on analyzing the application of Industry 4.0 and 5.0 through the representation of mathematical sets and, after explaining the transformations from Industry 1.0 to Industry 5.0 within a theoretical framework, expresses them through modeling with set theory.

This approach aims to provide a structured and mathematical view of the ongoing technological revolutions, offering insights into how the advancements of Industry 4.0 and Industry 5.0 can be systematically understood and modeled.

#### CONCEPTUAL FRAMEWORK

The industrial revolutions have significantly utilized technological innovations to enhance the production efficiency of manufacturing companies. The first three industrial revolutions, namely Industry 1.0, Industry 2.0, and Industry 3.0, respectively focused on the use of steam and hydropower, the adoption of electrical energy, and the development of information technology in industrial processes. In recent years, the introduction of technologies such as cyber-physical systems, the Internet of Things, and cloud systems has marked the beginning of the fourth industrial revolution, known as Industry 4.0, which was first introduced at the Hannover Messe (Sharifabadi et al., 2024). The previous industrial revolutions were driven by singular technological inventions, such as the steam engine (1.0), electricity (2.0), and computers (3.0). In contrast, the ongoing fourth industrial revolution is propelled by current technological advancements and the ability to process large amounts of data. In this context, the integration of the physical and cyber-physical domains is expected. The German research community shaped and introduced the process following mechanization (1.0), mass production (2.0), and automation (3.0) industries as the next industrial revolution (4.0) (Rupp et al., 2021). Industry 4.0 was first introduced in 2011 at the "Hannover Festival" in Germany by Siegfried Dais and Henning Kagermann. Both names were among the founding fathers and driving forces behind this project, which directed the German government's high-tech strategy. The aim of the project was to promote the computerization of production. This festival was modeled after an industrial exhibition and fair that attracted a large crowd (Rupp et al., 2021). The German government later adopted this idea, incorporating it into the core of the country's industrial strategy and using it for the development of the industry (Raj et al., 2024). While the terms Industry 4.0 and the fourth industrial revolution are often used interchangeably, Industry 4.0 is only a subset of the fourth industrial revolution (Rupp et al., 2021).

The fourth industrial revolution, commonly known as Industry 4.0, is transforming the global economic landscape by integrating digital technologies into business and production operations. "Industry 4.0" was launched in Germany in 2011 as a technological transformation aimed at addressing existing issues and enhancing the competitiveness of Germany's industrial sector (Yadav et al., 2024). German industries began evolving toward Industry 4.0 in 2011, and the German government subsequently incorporated these principles into the core of the country's industrial planning process (Raj et al., 2024). After recognizing the significance of Industry 4.0 technologies, different countries launched their own programs to develop the applications and concepts of Industry 4.0. Consequently, in the technological transformation process, Industry 4.0 encompassed diverse ideas and technologies due to the involvement of multiple technologies in numerous projects worldwide (Yadav et al., 2024, early view). The primary goal of implementing Industry 4.0 is to make industries more efficient in meeting the demands of a complex market. Therefore, Industry 4.0 primarily focuses on integrating advanced digital technologies and sophisticated network systems to make industries smarter. While making businesses smarter, Industry 4.0 also helps them utilize limited resources in the most efficient way possible (Raj et al., 2024).

In recent years, Industry 5.0, which complements Industry 4.0 and has emerged as a value-driven concept, has begun to attract attention (Eriksson et al., 2024). The fifth industrial revolution was introduced in 2017, six years after the fourth industrial revolution (Tunji-Olayeni et al., 2024). It is said that the concept of Industry 5.0 was introduced by Michael Rada on social media platforms in 2015. Documented records related to Industry 5.0 date back to 2017. However, it gained official recognition in 2021 by the European Union. This was done to prioritize environmental, social, and economic sustainability for companies and industries in Europe. Moreover, Industry 5.0 aims to integrate the human and environmental dimensions into industrial activities (Tunji-Olayeni et al., 2024). Building upon the previous industrial revolutions, Industry 5.0 emphasizes placing humans at the center to guide the development of products and services (Agarwal & Alathur, 2023).

## RESEARCH DESIGN AND METHOD

The world can be considered a universal set, and many elements developed by humanity are expressed as subsets of this universal set. The elements of these subsets include the most fundamental aspects that have continued to evolve throughout human history, such as economy (E), agriculture (I), education (G), transportation (U), health (S), logistics (L), marketing (P), energy (J), social life (SH), steam (B), mechanization (M), urbanization (K), production (Ü), technological development (TG), motor (R), and others (D1). A summary of these elements is presented below using mathematical set theory:

$$E1 = \{E, T, G, U, S, L, P, J, SH, B, M, K, \ddot{U}, TG, R, D1\}$$

In addition to the elements of the Industry 1.0 era, the Industry 2.0 era introduced new elements into human life, such as mass production (MP), electricity (EL), standardization (ST), internal combustion engine (IC), power grids (PG), telephone (N), telegraph (F), radio (Y), and others (D2). A summary of these developments in the Industry 2.0 era is presented below using set theory:

$$E2 = \left\{ \bigcup_{i=1}^2 E_i \right\} = E1 \cup \{MP, EL, ST, IC, PG, N, F, Y, D2\} = E1 \cup (E2 - E1)$$

Building on the developments from Industry 2.0, additional innovations such as automation (A), electronics (ET), the internet (IN), data (D), and others (D3) formed the set of Industry 3.0.

$$E3 = \left\{ \bigcup_{i=1}^3 E_i \right\} = E2 \cup \{A, ET, IN, D, D3\} = E2 \cup (E3 - E2)$$

The progression continued with the advent of the Industry 4.0 era, during which, in addition to all the existing technologies and developments, innovations such as smart technologies (ST), network systems (NS), cloud computing (CC), efficient use of limited resources (ER), industry (IN), automated production (AP), high efficiency (HE), inter-system integration (ISI), quality in service delivery (QD), digitalization (DI),

artificial intelligence (AI), the Internet of Things (IoT), big data (BD), machine learning (ML), additive manufacturing (AM), blockchain (BC), robotics (RT), and others (D4) further advanced all elements that existed from Industry 1.0 to Industry 3.0. These advancements are summarized below within the framework of mathematical set.

$$E4 = \left\{ \bigcup_{i=1}^4 E_i \right\} = E3 \cup \{ST, NS, CC, ER, IN, AP, HE, ISI, QD, DI, AI, IoT, BD, ML, AM, BC, RT, D4\}$$

$$= E3 \cup (E4 - E3)$$

In addition to these advancements, new elements such as the Internet of Everything (IoE), society-centered (SC) approaches, communication technologies, human-centric approaches, and mass personalization (MP) (D5) characterize the Industry 5.0 era. A summary of these elements based on mathematical set theory is presented below:

$$E5 = \left\{ \bigcup_{i=1}^5 E_i \right\} = E4 \cup \{IoE, SC, MP, D5\} = E4 \cup (E5 - E4)$$

Since all these developments are present in today's world, the world itself is considered the universal set. When analyzing all these elements, it is evident that a mathematical relationship exists between these sets as follows:

$$E1 \subset E2 \subset E3 \subset E4 \subset E5 \subset E$$

This relationship highlights the continuous expansion and integration of elements across the industrial revolutions.

## FINDINGS

Mathematically, the "E1.0" period can be represented as a set containing the fundamental elements of that era. The set of key elements present during the Industry 1.0 period can be expressed as follows:

$$E1 = \left\{ \bigcap_{i=1}^5 E_i \right\}$$

can be expressed as: "All components existing during this period have continued to develop through the industrial revolutions, driven by both technological innovations and advancements in energy sectors. For example, education, which was an element in Industry 1.0, has continued its progression throughout all industrial periods. This progression can be mathematically represented as:"

$$E5 = \left\{ \bigcup_{i=1}^5 E_i \right\}$$

In Industry 2.0, with the introduction of computers into society, all the components from Industry 1.0 continued to develop in direct proportion to this technology. This, in turn, initiated the process of preparing these various elements for the Industry 3.0 period. Accordingly, the factors that triggered the start of Industry 3.0 are the differences between the elements of Industry 2.0 and those of Industry 1.0. That is, the factors that triggered the start of the Industry 3.0 era are represented as E3H, and they can be expressed as:

$$E_3H = E2 - E1 = \{KÜ, EL, ST, IR, EŞ, N, F, Y, D2\}$$

The factors that triggered the start of Industry 3.0 are formed from the difference between the elements of the set E1 and the developments of its components. If the modeling continues, the elements that initiated the Industry 4.0 period can be represented as E4H, and they can be expressed as:

$$E_4H = E3 - (E1 \cup E2) = E3 - \left\{ \bigcup_{i=1}^2 E_i \right\} = E3 - E2 = \{O, ET, IN, V, D3\}$$

The factors that triggered the developments in E2 are formed by the difference between the elements of the set E1 and the union of the sets E1 and E2, expressed as. This difference highlights the advancements in the elements of E2 compared to E1. Extending this model allows for generalization, where we can represent the factors initiating Industry 5.0 as E5H, and express it as:

$$E_5H = E4 - (E1 \cup E2 \cup E3) = E4 - \left\{ \bigcup_{i=1}^3 E_i \right\} = E4 - E3$$

$$= \{AT, AS, BB, VK, SY, OÜ, YV, SE, HK, DJ, YZ, IoT, BV, MO, EI, CH, RT D4\}$$

The developments in the elements of E3 will begin with the difference between the elements of the set  $E3 = E1 \cup E2 \cup E3$ .

Mathematical modeling, with the development of industrial revolutions, allows us to easily model the advancements that will lead to the beginning of the next industrial period. According to this, the preparation phase for Industry 6.0 can be represented as E6H, and it can be expressed as:

$$E_6H = E5 - (E1 \cup E2 \cup E3 \cup E4) = E5 - \left\{ \bigcup_{i=1}^4 E_i \right\} = E5 - E4 = \{HI, TO, IIT, D5\}$$

When modeled in this way, the preparation phase for Industry n.0 can be expressed as E<sub>n</sub>H, and it can be represented mathematically as:

$$E_nH = E(n-1) - \left\{ \bigcup_{i=1}^{n-2} E_i \right\} = E(n-1) - E(n-2)$$

This general formula shows that the advancements leading to **Industry n.0** are derived from the differences between the elements of the previous industrial revolution  $E_{\{(n-1).0\}}$  and the cumulative innovations from all preceding industrial periods. This model highlights how each new industrial revolution builds upon the previous ones, marking distinct technological shifts that prepare for the next phase of industrial evolution.

This model can be generalized as follows:

$$E_{10}H = E9 - \left\{ \bigcup_{i=1}^8 E_i \right\} = E9 - E8$$

The preparation phase for Industry 10.0 will begin as a result of the differences between the elements of Industry 9.0 and the cumulative elements from all preceding industrial periods.

## CONCLUSION AND DISCUSSION

Industry 2.0 in the 19th century, Industry 3.0 in the 20th century, Industry 4.0 in the 21st century, and today Industry 5.0 have followed a continuous path of progress. It is evident that these advancements will continue in the coming years. These developments have profoundly impacted the production and operations of businesses across all sectors and will continue to do so. Businesses that fail to adapt to these changes will face a loss of productivity and a decline in their competitive advantage in the market. The rapid pace of technological innovations necessitates the development of flexible strategies by businesses to adapt to these changes. Otherwise, the risk of losing technology-driven competitive power increases. Today, business models operated through digital platforms have replaced traditional ways of doing business, creating a need for flexible business models. Particularly, adapting to technological advancements requires not only the integration of technology but also the training of employees to adapt to this transformation. Additionally, businesses that adopt sustainable business models will not only aim for value creation and profitability but also strengthen their reputation through a sense of social responsibility.

Given the evident importance of Industry 4.0 and Industry 5.0, expressing these concepts through a mathematical language and presentation methods can significantly contribute to modeling and implementing the development processes in different sectors through alternative approaches like set theory. Industry 5.0 is modeled through elements such as smart technologies (ST), network systems (NS), cloud computing (CC), efficient use of limited resources (ER), industry (IN), automated production (AP), high efficiency (HE), inter-system integration (ISI), quality in service delivery (QD), digitalization (DI), artificial intelligence (AI), the Internet of Things (IoT), big data (BD), machine learning (ML), additive manufacturing (AM), blockchain (BC), and robotics (RT). This study presents a summary of the current Industry 5.0 era using mathematical set theory, encompassing the developments of Industry 1.0, Industry 2.0, Industry 3.0, and Industry 4.0 while highlighting its distinct characteristics.

Industry 2.0 in the 19th century, Industry 3.0 in the 20th century, Industry 4.0 in the 21st century, and today Industry 5.0 have followed a continuous path of progress. It is evident that these advancements will continue in the coming years. These developments have profoundly impacted the production and operations of businesses across all sectors and will continue to do so. Businesses that fail to adapt to these changes will face a loss of productivity and a decline in their competitive advantage in the market. The rapid pace of technological innovations necessitates the development of flexible strategies by businesses to adapt to these changes. Otherwise, the risk of losing technology-driven competitive power increases. Today, business models operated through digital platforms have replaced traditional ways of doing business, creating a need for flexible business models. Particularly, adapting to technological advancements requires not only the integration of technology but also the training of employees to adapt to this transformation. Additionally, businesses that adopt sustainable business models will not only aim for value creation and profitability but also strengthen their reputation through a sense of social responsibility.

Given the evident importance of Industry 4.0 and Industry 5.0, expressing these concepts through a mathematical language and presentation methods can significantly contribute to modeling and implementing the development processes in different sectors through alternative approaches like set theory. Industry 5.0 is modeled through elements such as smart technologies (ST), network systems (NS), cloud computing (CC), efficient use of limited resources (ER), industry (IN), automated production (AP), high efficiency (HE), inter-system integration (ISI), quality in service delivery (QD), digitalization (DI), artificial intelligence (AI), the Internet of Things (IoT), big data (BD), machine learning (ML), additive manufacturing (AM), blockchain (BC), and robotics (RT). This study presents a summary of the current Industry 5.0 era using mathematical set theory, encompassing the developments of Industry 1.0, Industry 2.0, Industry 3.0, and Industry 4.0 while highlighting its distinct characteristics."

$$E_5H = E4 - (E1 \cup E2 \cup E3) = E4 - \left\{ \bigcup_{i=1}^3 E_i \right\} = E4 - E3$$

$$= \{ST, NS, CC, ER, IN, AP, HE, ISI, QD, DI, AI, IoT, BD, ML, AM, BC, RT, D4\}$$

In this context, the theoretical and practical contributions that can be obtained through the modeling of Industry 4.0 and Industry 5.0 processes using mathematical set theory can be expressed as follows: By providing a new analytical framework to existing theoretical approaches regarding Industry 4.0 and Industry 5.0 through the use of 'Mathematical Set Theory,' the relationships and interactions between these processes can be more clearly explained. Additionally, it contributes to a better understanding of the interrelations among the technological components of Industry 4.0 and Industry 5.0. This study fills the gaps in the literature concerning mathematical modeling of Industry 4.0 and 5.0 and offers a systematic approach to these industrial transformation processes at a theoretical level, thus contributing to research in this area.

The set theory model enables the systematic identification of technological elements encountered by businesses during the digitalization process. This allows companies to integrate new technologies more effectively and to use their resources more efficiently. Set theory-based analyses have the potential to assist businesses in developing new methods to enhance their productivity. Moreover, it enables businesses to develop more flexible strategies during their adaptation to rapid technological advancements, thus providing a competitive advantage in the market.

These theoretical and practical contributions not only facilitate a deeper understanding of Industry 4.0 and Industry 5.0 but also enhance the applicability of these processes in the business and industrial world. Therefore, summarizing Industry 4.0 and Industry 5.0 through 'Mathematical Set Theory' is expected to emphasize the importance of the subject and draw attention to it, thereby contributing to the effective management of digital transformation

## KAYNAKÇA

- Agarwal, A. & Alathur, S. (2023). Metaverse revolution and the digital transformation: intersectional analysis of Industry 5.0. *Transforming Government: People, Process and Policy*, 17(4): 688-707. <https://doi.org/10.1108/TG-03-2023-0036>
- Alizon, F., Shooter, S. B. & Simpson, T. W. (2009). Henry Ford and the Model T: Lessons for Product Platforming and Mass Customization. *Design Studies*, 30 (5): 588-605.
- Batra, I., Sharma, C., Malik, A., Sharma, S., Kaswan, M.S. & Garza-Reyes, J.A. (2024). Industrial revolution and smart farming: a critical analysis of research components in Industry 4.0. *The TQM Journal*, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/TQM-10-2023-0317>
- Crespo, R., Tohmé, F. (2016). The Future of Mathematics in Economics: A Philosophically Grounded Proposal. *Found Sci* 22: 1-17. <https://doi.org/10.1007/s10699-016-9492-9>
- Eriksson, K.M., Olsson, A.K. & Carlsson, L. (2024). Beyond lean production practices and Industry 4.0 technologies toward the human-centric Industry 5.0. *Technological Sustainability*, 3(3):286-308. <https://doi.org/10.1108/TECHS-11-2023-0049>
- Gagnidze, I. (2023). Industry 4.0 and industry 5.0: can clusters deal with the challenges? (A systemic approach). *Kybernetes*, 52(7): 2270-2287. <https://doi.org/10.1108/K-07-2022-1005>
- Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Fathi, M., Rejeb, A., Foroughi, B. & Nikbin, D. (2024). Beyond Industry 4.0: a systematic review of Industry 5.0 technologies and implications for social, environmental and economic sustainability. *Asia-Pacific Journal of Business Administration*, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/APJBA-08-2023-0384>
- Görçün, Ö. F., (2017). Dördüncü endüstri devrimi “Endüstri 4.0. İstanbul: Beta Basım A.Ş.
- Kaswan, M.S., Chaudhary, R., Garza-Reyes, J.A. & Singh, A. (2024). A review of Industry 5.0: from key facets to a conceptual implementation framework. *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-01-2024-0030>
- Khanuja, A., Sreedharan, R. and Sharma, N. (2024). Bibliometric analysis on usage of Industry 4.0 technologies in healthcare. *The TQM Journal*, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/TQM-08-2023-0252>
- Koca, D., (2020). Sanayi Devrimlerinin Tarihsel Arka Planı ve İşgücü Becerileri Üzerindeki Yansımaları. *Uluslararası Toplum Araştırmaları Dergisi*, 16 (31): 4531-4558.
- Kotler, P. (1963). The Use of Mathematical Models in Marketing. *Journal of Marketing*, 27(4): 31-41
- Kumar, U., Kaswan, M.S., Kumar, R., Chaudhary, R., Garza-Reyes, J.A., Rathi, R. & Joshi, R. (2024). A systematic review of Industry 5.0 from main aspects to the execution status. *The TQM Journal*, 36(6): 1526-1549. <https://doi.org/10.1108/TQM-06-2023-0183>

- Löffler, A. & Kruschwitz, L. (2019). *The Brownian Motion A Rigorous but Gentle Introduction for Economists*. Springer Texts in Business and Economics, ISBN 978-3-030-20102-9 ISBN 978-3-030-20103-6 (eBook).
- Özdemir, A., Nursaçan, N. N. & Nursaçan İ. C., (2018). 2014-2018 Yılları arasında Nesnelerin İnterneti (IOT) üzerine bir literatür taraması. *Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi*, 1 (2): 1-22.
- Sharifabadi Morovati, A., Ziaecian, M., Mirfakhradini, S.H. &Zanjirchi, S.M. (2024). Toward Industry 4.0 in home appliance industry: challenges and future perspectives. *Journal of Advances in Management Research*, 21(3): 354-375. <https://doi.org/10.1108/JAMR-03-2023-0070>
- Schultz, J., A. (1979). The Development of Set Theory and its Application to Economic Analysis. *Studies in Economics and Finance*, 3(1): 27 – 48.
- Sneha, V. & Kavitha, R. (2024). Exploring the economy of creativity and culture in the light of Industry 5.0: a systematic literature review of the setup of creative industries. *Journal of Strategy and Management*, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/JSMA-05-2023-0095>
- Pamuk, N. S. & Soysal, M., (2018). Yeni Sanayi Devrimi Endüstri 4.0 üzerine bir İnceleme. *Verimlilik Dergisi*, 1: 41-66.
- Raj, R., Kumar, V., Sharma, N.K & Verma, P. (2024). Industry 4.0 readiness: the impact of effective implementation of I4.0 on marketing performance. *Journal of Business & Industrial Marketing*, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/JBIM-05-2023-0289>
- Redclift, M. (2005). Sustainable development (1987–2005): An oxymoron comes of age. *Sustainable development*, 13 (4): 212-227.
- da Rocha, L.T.V., Pereira, L.R.M., Fernandes, R.M., Melo, A.C.S., da Silva, D., Rampasso, I.S., Anholon, R. & Batista Martins, V.W. (2024).Industrial engineer and Industry 4.0? Empirical evidence from the Brazilian context considering the relation between competences and Technologies. *Higher Education, Skills and Work-Based Learning*, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/HESWBL-11-2023-0305>
- Rodríguez-Martín, M., Domingo, R. & Ribeiro, J. (2024). Mapping and prospective of additive manufacturing in the context of Industry 4.0 and 5.0. *Rapid Prototyping Journal*, 30(7):1393-1410. <https://doi.org/10.1108/RPJ-11-2023-0410>
- Rupp, M., Schneckeburger, M., Merkel, M. Börret, R. & Harrison, D.K. (2021). Industry 4.0: A Technological-Oriented Definition Based on Bibliometric Analysis and Literature Review. *Journal of Open Innovation Technology, Market and Complexity*, 7(68): 1-20. <https://doi.org/10.3390/joitmc7010068>
- Talaie, H., Ziaecian, M. & Malekinejad, P. (2024). Towards quality 4.0 in home appliances: definitions, deployment scenarios, and future perspectives. *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/JMTM-02-2023-0044>
- Troisi, O., Visvizi, A. & Grimaldi, M. (2024). Rethinking innovation through industry and society 5.0 paradigms: a multileveled approach for management and policy-making. *European Journal of Innovation Management*, 27(9): 22-51. <https://doi.org/10.1108/EJIM-08-2023-0659>



Tunji-Olayeni, P., Aigbavboa, C., Oke, A. & Chukwu, N. (2024). Research trends in industry 5.0 and its application in the construction industry. *Technological Sustainability*, 3 (1): 1-23. <https://doi.org/10.1108/TECHS-07-2023-0029>

Yadav, A., Yadav, G. & Desai, T.N. (2024). Unlocking the potential of Industry 4.0 in BRICS nations: a systematic literature review and meta-analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-06-2023-0180>

Yalçın, O. (2012). Son Bin Yılda Doğu ve Batı Medeniyetlerinin İktisadi Yapılarının Değişimi Üzerine Bir Deneme. *The Journal Academic Social Science Studies*, 5 (5): 281-324.

<https://smallbusiness.chron.com/> : 10.08.2024

<https://egyankosh.ac.in/> : 15.06.2024