

T.C
ADİYAMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İŞLETME ANABİLİM DALI
ÜRETİM YÖNETİMİ VE PAZARLAMA BİLİM DALI

**ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ İLE ENDÜSTRİ
4.0 UYUM SÜRECİ İÇİN YOL HARİTASININ BELİRLENMESİ:
GAZİANTEP TEKSTİL SEKTÖR ÖRNEĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Esra OVALI

DANIŞMAN
Doç. Dr. Mert ÖZGÜNER

ADİYAMAN, 2024

ÖZET

ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ İLE ENDÜSTRİ 4.0 UYUM SÜRECİ İÇİN YOL HARİTASININ BELİRLENMESİ: GAZİANTEP TEKSTİL SEKTÖRÜ ÖRNEĞİ

Esra OVALI

**Üretim Yönetimi ve Pazarlama Programı/ İşletme Anabilim Dalı
Adıyaman Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 09/2024, Sayfa:116
Danışman: Doç. Dr. Mert ÖZGÜNER**

Küreselleşmesinde etkisiyle adını sıklıkla duyduğumuz dijitalleşme olgusu, oldukça etkin bir kullanım alanına sahip olup endüstriyel alanda da kapsamlı bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bu olgu şirketlerin alacakları yönetim ve stratejik kararlarının arkasındaki başlıca itici güç olarak düşünülmektedir. Endüstride en yaygın dijital uygulama Endüstri 4.0 olarak da bilinen akıllı üretimdir. Endüstriyel şirketler akıllı üretimin belirgin potansiyelini kabul ederek dijital dönüşüm için gerekli olan büyük yatırımlarını bu yöne sevk etmektedirler. Modern tarihte bir değişim dalgası olarak da bilinen bu yeni kavram, üreticilerin hedeflerine daha hızlı bir şekilde ulaşmalarını sağlayan; akıllı, özerk ve merkezi olmayan fabrikaların ekosistemini mümkün kılan yeni üretim teknolojilerinin bir sentezidir. Rekabet gücünü korumak, hızlanmak ve uyum sağlamak için şirketler, bu yeni iş modelini ve teknolojilerini kendi sistemlerine entegre etmesi gerekmektedir.

İş ortamlarındaki teknolojik gelişmeler ve yenilikler firmaların hem uzun dönem hem de kısa dönem performansını etkilemektedir. Teknolojideki alternatiflerin ve yönlendirmelerin belirsizliğinden dolayı firmalar ileriye dönük planlarını, teknolojik gelişmeleri destekleyecek stratejiler formüle ederek belirlemelidir. Bu sebeple, firmalar rekabet avantajı sağlayan teknolojiler geliştirmek için mevcut teknolojilere uygun bir yol haritası kullanmalıdır. Bu nedenle, Endüstri 4.0'ın ihtiyaç duyduğu dijital dönüşüm sürecinde firmaların başarıya ulaşması için doğru teknolojik ve stratejik yol haritalarını kendi sistemlerine entegre etmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada Gaziantep ilinde faaliyet gösteren 5 önemli tekstil firmasının Endüstri 4.0'a uyum süreci incelenmiştir. Öncelikle yeni bir dijital dönüşüm olan Endüstri 4.0 terimiyle ilgili kapsamlı literatür araştırması yapılmıştır. Endüstri 4.0 teknolojileri ve temel dizayn prensipleri hakkında bilgiler verilmiştir. Firmaların, Endüstri 4.0 teknolojisi kullanımında nasıl bir stratejik yol haritası izlemesi gerektiğine dair araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalar sonucunda Endüstri 4.0'a uyum sürecinde kullanılacak olan kriterler belirlenmiştir. İlk olarak belirlenen kriterler çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan AHP Yöntemi ile ağırlıklandırılmıştır. Kriter ağırlıklarının belirlenmesinin ardından VIKOR, COPRAS, MOORA ve PROMETHEE II yöntemleri kullanılarak firmaların Endüstri 4.0'a hangi ölçüde uyum sağladığı belirlenmeye çalışılmıştır. Matematiksel veriler kullanılarak yapılan analiz sonuçlarına göre firmalar kendi aralarında sıralaması yapılarak, Endüstri 4.0'a en çok uyum sağlayan tekstil firması belirlenmeye çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Endüstri 4.0; AHP; VIKOR; COPRAS; MOORA; PROMETHEE II.



ABSTRACT

DETERMINATION OF THE ROADMAP FOR THE INDUSTRY 4.0 COMPLIANCE PROCESS WITH MULTI-CRITERIA DECISION- MAKING METHODS: THE EXAMPLE OF THE GAZIANTEP TEXTILE SECTOR
--

Esra OVALI

**Production Management and Marketing Program/ Department of Business
Administration**

Adıyaman University, Graduate Education Institute, 09/2024, Page:116

Supervisor: Assoc. Prof. Mert ÖZGÜNER

The phenomenon of digitalisation, which we often hear about with the effect of globalisation, has a very effective usage area and has started to be used extensively in the industrial field. This phenomenon is considered as the main driving force behind the management and strategic decisions of companies. The most common digital application in industry is smart production, also known as Industry 4.0. Industrial companies recognise the significant potential of smart manufacturing and are investing heavily in digital transformation. This new concept, also known as a wave of change in modern history, is a synthesis of new production technologies that enable an ecosystem of smart, autonomous and decentralised factories that enable manufacturers to achieve their goals faster. To remain competitive, accelerate and adapt, companies need to integrate this new business model and technologies into their systems.

Technological developments and innovations in the business environment affect both the long-term and short-term performance of firms. Due to the uncertainty of alternatives and directions in technology, firms should determine their future plans by formulating strategies to support technological developments. For this reason, firms should use a roadmap appropriate to existing technologies to develop technologies that provide competitive advantage. Therefore, in the digital transformation process required by Industry 4.0, companies need to integrate the right technological and strategic roadmaps into their systems in order to achieve success.

In this study, the adaptation process of 5 important textile companies operating in Gaziantep province to Industry 4.0 is analysed. Firstly, comprehensive literature research was conducted on the term Industry 4.0, which is a new digital transformation. Information about Industry 4.0 technologies and basic design principles are given. Research has been conducted on how companies should follow a strategic road map in the use of Industry 4.0 technology. As a result of these researches, the criteria to be used in the process of adaptation to Industry 4.0 were determined. Firstly, the determined criteria were weighted with the AHP Method, which is one of the multi-criteria decision-making methods. After determining the criteria weights, VIKOR, COPRAS, MOORA and PROMETHEE II methods were used to determine the extent to which the companies adapt to Industry 4.0. According to the results

of the analysis using mathematical data, the companies were ranked among themselves and it was tried to determine the textile company that adapted the most to Industry 4.0.

Keywords: Industry 4.0; AHP; VIKOR; COPRAS; MOORA; PROMETHEE II.



ÖNSÖZ

Çalışma sürecinde her türlü yol gösterici olan, olumlu tavrıyla beni cesaretlendiren, bilgi birikimiyle çalışmama farklı açılardan bakmamı sağlayan beraber çalışmaktan ve her zaman öğrencisi olmaktan gurur duyduğum değerli danışman hocam Doç. Dr. Mert ÖZGÜNER'e sonsuz teşekkür ederim.

Ayrıca tüm hayatım boyunca benim yanımda olan, aldığım kararları her zaman destekleyen, sadece bu çalışma sürecinde değil tüm hayatım boyunca beni cesaretlendiren ve moral veren sevgili eşim Sabih OVALI 'ya ve sürekli çalışmama izin verip birlikte vakit geçirmekten feragat eden biricik oğlum İsmail Ovalı 'ya ve kızım Zeynep Fatma OVALI'ya, sürekli yanımda olduğunu hissettiğim anneme ve babama sonsuz şükranlarımı sunar ve teşekkür ederim.

....../....../20....

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Adıyaman Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Esra OVALI

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
BAŞLIK SAYFASI.....	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vii
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
TABLolar DİZİNİ.....	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiv
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
2.1. Literatür Taraması.....	3
3. KAVRAMSAL ÇERÇEVE	10
3.1. Endüstri 4.0 Kavramı.....	10
3.1.1. Endüstri 4.0 faydaları.....	13
3.1.2. Endüstri 4.0 benimsenmesinde karşılaşılabilecek zorluklar	15
3.2. Endüstri 4.0 Tarihsel Gelişimi.....	19
3.2.1. Endüstri 1.0	19
3.2.2. Endüstri 2.0	20
3.2.3. Endüstri 3.0	20
3.2.4. Endüstri 4.0	21
3.3. Endüstri 4.0 Teknolojileri	21
3.3.1. Yapay zekâ (Artificial intelligence).....	23
3.3.2. Nesnelerin interneti (Internet of things)	24
3.3.3. Bulut bilişim (Cloud computing).....	25
3.3.4. Simülasyon (Simulation)	25
3.3.5. Büyük veri analitiği (Big data analysis).....	26

3.3.6. Katmanlı üretim (Additive manufacturing).....	27
3.3.7. Siber güvenlik (Cyber security).....	27
3.3.8. Artırılmış gerçeklik (Augmented reality).....	28
3.3.9. Otonom robotlar (Autonomous robots).....	29
3.3.10. Siber-Fiziksel sistem (Cyber-Physical systems)	29
3.3.11. Yatay ve Dikey entegrasyon.....	30
3.4. Endüstri 4.0 Temel Yapısı.....	30
3.4.1. Birlikte çalışabilirlik (Interoperability)	31
3.4.2. Sanallaştırma (Virtualization).....	32
3.4.3. Yerelleştirme (Decentralization):	33
3.4.4. Gerçek Zamanlı yetenek (Real-Time capability).....	34
3.4.5. Hizmet oryantasyonu (Service orientation).....	35
3.4.6. Modülerlik (Modularity).....	35
3.4.7. Siber tehlike.....	36
3.4.8. Sistem içi arıza	37
3.4.9. Teknoloji demodeliği	38
4. ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ.....	38
4.1. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) Yöntemi.....	39
4.2. VIKOR Yöntemi	43
4.3. COPRAS Yöntemi	46
4.4. MOORA Yöntemi	49
4.5. PROMETHEE II Yöntemi.....	51
5. UYGULAMA	54
5.1. Çalışmanın Konusu.....	54
5.2. Çalışmanın Amacı ve Önemi	54
5.3. Çalışmanın Kapsamı ve Sınırlılık.....	55
5.4. Yöntemlerin Uygulanması	57
5.4.1. AHP yönteminin uygulanması.....	58
5.4.2. VIKOR yönteminin uygulanması.....	65
5.4.3. COPRAS yönteminin uygulanması.....	69

5.4.4. MOORA yönteminin uygulanması	71
5.4.5. PROMETHEE II yönteminin uygulanması	74
5.4.6. Tüm analizlerin sonuçları	80
6. SONUÇ	81
KAYNAKÇA.....	86
ÖZGEÇMİŞ	



TABLÖLAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 4.1. Saaty temel ölçeği.....	41
Tablo 4.2. Rassal indeks değerleri	43
Tablo 5.1. Uygulamada kullanılan kriterler	57
Tablo 5.2. Birinci karar vericinin karar matrisi	58
Tablo 5.3. İkinci karar vericinin karar matrisi	59
Tablo 5.4. Üçüncü karar vericinin karar matrisi	59
Tablo 5.5. Dördüncü karar vericinin karar matrisi	60
Tablo 5.6. Beşinci karar vericinin karar matrisi	60
Tablo 5.7. Karşılaştırmalı üstünlük matrisi	61
Tablo 5.8. Normalize edilmiş karar matrisi	62
Tablo 5.9. Kriterlerin önem ağırlığı.....	63
Tablo 5.10. Öz değerler	63
Tablo 5.11. Tutarlılık oranı.....	64
Tablo 5.12. En iyi (fi+) ve en kötü (fi-) değerleri.....	65
Tablo 5.13. Normalizasyon matrisi.....	66
Tablo 5.14. Ağırlıklandırılmış normalize matrisi	67
Tablo 5.15. Si ve Ri değerleri	67
Tablo 5.16. Alternatiflerin sıralanması	68
Tablo 5.17. Karar matrisinin oluşturulması	69
Tablo 5.18. Normalizasyon matrisi.....	70
Tablo 5.19. Ağırlıklandırılmış normalize matrisi	70
Tablo 5.20. Alternatiflerin sıralanması	71
Tablo 5.21. Karar matrisinin oluşturulması	72
Tablo 5.22. Normalize karar matrisinin 1. aşaması	72
Tablo 5.23. Normalize karar matrisinin 2. aşaması	73
Tablo 5.24. Ağırlıklandırılmış normalize matrisi	74
Tablo 5.25. Yi değeri	74

Tablo 5.26. Karar matrisi	75
Tablo 5.27. Fayda ve maliyet değerlerin belirlenmesi.....	76
Tablo 5.28. Normalize karar matrisinin oluşturulması	76
Tablo 5.29. P_j değeri.....	77
Tablo 5.30. $\pi(i,i')$ değerinin hesaplanması.....	78
Tablo 5.31. Giriş ve çıkış akışı	79
Tablo 5.32. $Q(a)$ net geçiş akışı	79
Tablo 5.33. Firmaların tüm yöntemlere ait performans sıralaması.....	80



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Endüstri 4.0 teknolojileri.....	22
Şekil 4.1. AHP hiyerarşi yapısı	40



KISALTMALAR DİZİNİ

AHP	: Analytic Hierarchy Process (Analitik Hiyerarşi Prosesi)
VİKOR	: VİseKriterijumska Optimizacija I KOmpromisno Resenje (Çok Kriterli Optimizasyon ve Uzlaşık Çözüm)
COPRAS	: Complex Proportional Assessment (Karmaşık Oransal Değerlendirme)
MOORA	: Multi-Objective Optimization Method by Ratio Analysis (Oran Analizi İle Çok Amaçlı Optimizasyon Yöntemi)
PROMETHEE II	: Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations (Değerlendirmelerin Zenginleştirilmesi İçin Tercih Sıralaması Organizasyon Yöntemi)
CPS	: Siber-Fiziksel Sistemler
IoT	: Nesnelerin İnterneti
DEMANTEL	: The Decision Making Trial and Evaluation Lab (Karar Verme Deneme ve Değerlendirme Laboratuvarı)

1. GİRİŞ

18. yüzyılda gerçekleşen ilk sanayi devriminden bu yana yaşanan olumsuz çevre koşulları toplumun sosyal faaliyetlerini sınırlandırılırken, diğer yandan teknolojik gelişmelerle insan hayatını kolaylaştıran ürünler piyasaya sürülmeye başlanmıştır. (Beier vd. 2020: 2). Giderek küreselleşen bir dünyada, üretim için gerekli olan ve sınırlı miktarda bulunan doğal kaynakların korunacağı ve tüketicilerin sürekli değişiklik gösteren talepleri karşılanarak daha fazla rekabet edebileceği üretim sistemine ihtiyaç duyulmuştur (Bokrantz vd. 2020: 2).

2011 yılında Almanya’da ortaya çıkan ve üretim performansını artırmak için dijital teknoloji kullanımını mümkün kılan Endüstri 4.0 devrimi, üretim endüstrisinde hem yıkıcı hem de yenilikçi bir etkisi olmuştur. Ayrıca Amerika Birleşik Devletleri’nde “Akıllı İmalat”, Birleşik Krallık’ta, “Made in China 2025” ve “Üretim Geleceği” gibi Endüstri 4.0 gelişimini teşvik eden çeşitli başka girişimlerde bulunmaktadır (Kusiak, 2018: 508).

Dördüncü sanayi devrimi olarak bilinen Endüstri 4.0, ileri üretim ve dijital bilgi teknolojileri kullanımıyla ortaya çıkan yeni bir üretim anlayışının ilk adımlarını oluşturmuştur. Üretim sürecinde bulunan bileşenler (makineler-insanlar), geleneksel üretim anlayışında farklı bir boyut kazanarak otomasyonun hâkim olduğu bir üretim modeli etkin olmuştur. Çeşitli imalat firmalarına ve diğer ilgili alanlara, üretim ve dijital bilgi teknolojilerinden yararlanarak bilgi sistemi içerisinde veri toplamak, aktarmak, depolamak, analiz etmek ve uygun şekilde izlemek için otomatik bir çözüm sunmaktadır (Javaid vd. 2020: 420).

Endüstri 4.0 üretim sisteminde, izole ve optimize edilmiş hücreler üretim akışına tamamen entegre edilerek, otomatikleştirilerek ve optimize edilerek biraraya getirilmektedir. Bu şekilde daha fazla verimliliğe neden olarak üreticiler, tedarikçiler, müşteriler ve hatta makine-insan arasındaki geleneksel üretim ilişkisini değiştirmiştir. Üretim prosesi, ekipman parçalarını kendi kendine optimize edecek ve geliştirecek şekilde sistemleştirilmiş. Örneğin; otomasyonla geliştirilmiş ekipmanlar üretim aşamasında herhangi bir bitmemiş ürünü hissettiğinde sistem kendi parametrelerini ayarlayarak eksik olan ürünü tamamlayacak şekilde düzenlenmiştir. Üretim sürecindeki herbir parça, bir diğer adımlara yönlendirecek

bilgileri otonom robotlardan alarak ayrı bir tanımlama kodu veya küçük bir gömülü mikrobilgisayar şekilde dizayn edilmiştir.

(https://inovasyon.org/images/Haberler/bcgperspectives_Industry40_2015.pdf)

Endüstri 4.0 üretim sisteminde üretilen ürünler daha çok işlem gücü ve bağlantıya dayalı olan akıllı ürünlerdir. Akıllı ürünlerin arkasındaki ana fikir, kendi kendini yönetme yeteneğine sahip olmasıdır (Almada- Lobo, 2015: 17).

Nesnelerin interneti olarak da adlandırılan endüstriyel internetle kurulan akıllı fabrikalar, akıllı ürünler ve akıllı hizmetler ile bütünleşik olan Endüstri 4.0 en çok imalat sektöründe etkisi görülmüştür. Ayrıca yeni ve yıkıcı iş modelleri Endüstri 4.0 teknolojileri etrafında geliştirilmektedir. Endüstri 4.0'a yönelik bu gelişmeler, sürdürülebilir üretimi iyileştirmek için her yerde bulunan bilgi ve iletişim teknolojisi (BİT) altyapısını kullanarak muazzam fırsatlar sunmuştur (Stock ve Seliger, 2016: 536).

Endüstri 4.0'ı uygulaması, günümüz imalat sanayinde birçok boyutu etkileyen çeşitli teknolojik zorlukları da beraberinde getirmiştir. Bu nedenle firmalar değer zincirindeki tüm aktörleri içeren bir strateji geliştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca ilgili mimari ve güvenlik konuları üzerine bir fikir birliğine varılmalıdır (Mohamed, 2018: 259). Endüstri 4.0'ı etkinleştiren teknolojilerin işletme süreçlerine entegrasyonu gerek çevresel gerekse işletme içi nedenlerden dolayı oldukça zor ve maliyetli bir süreçtir. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde Endüstri 4.0'a ilişkin standart yaklaşımların yetersizliği işletmeler açısından bu süreci sancılı hale getirmiştir (Gedik, 2020: 249)

Yenilikçi bu anlayış, CPS, IoT ve Bulut Bilişim gibi üretim teknolojileriyle üretim sistemini dönüştürüp ve geliştirebileceği akıllı fabrikalar kurmayı amaçlamıştır. Fakat sistem içerisinde önceden bilinen bir sonucun olmaması ve teknolojilerin mevcut durumunda yaşanan sürekli değişiklikler uygulamada birçok zorluklarla karşılaşılmasına neden olmaktadır (Egger ve Masood, 2020: 7). Bu zorluklar arasında bilgi eksikliği, yatırım getirisinin gerçekçi bir şekilde ölçememe ve vasıflı işgücü eksikliği gibi bunlarla da sınırlı olmayan nedenler sayılabilir. Endüstri 4.0 uygulama metodolojilerinin üreticiler tarafından reddedilmesinin başlıca nedeni ise bilinmeyenden korkarak değişime direnç göstermektir. Bu nedenle Endüstri 4.0 dönüşüm uygulanmasını destekleyecek ve uzmanlık eksikliği nedeniyle işgücünün karşı çıkamayacağı bir sistematik düzen gerekmektedir. Bu noktada

işletmeler, faaliyetlerini planlamada yardımcı olabilecekleri ve teknolojik gelişmelerin potansiyel faydalarını anlayabilecekleri ve bu değişime hızla adapte olabilecekleri gibi konularda referans oluşturabilecek bir yol haritalarına ihtiyaç duyulmuştur (Butt, 2020: 3).

Çalışmanın birinci bölümünde kapsamlı bir literatür araştırması yapılarak hem Endüstri 4.0 hakkında hem de çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri hakkında örnekler verilmiştir.

İkinci blmde ise Endüstri 4.0 hakkında ayrıntılı bir araştırma yapılmıştır. Yaşanılan sanayi devrimleri hakkında kısa bilgiler verilmiştir. Endüstri 4.0'ın temel yapı taşını oluşturan teknolojilerine de değinilmiş kullanım alanları belirlenmiştir. Endüstri 4.0 teknolojisini bir firmanın benimsemesi halinde karışılacağı zorlukları ve bunların üstesinden nasıl geleceğine dair bilgiler verilmiştir. İkinci bölümün sonunda Endüstri 4.0'ın temel tasarım prensipleri araştırılmış ve bu prensipleri uygulama kısmında yapılacak olan analiz için veri olarak kullanılmıştır.

nc blmde, çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinden AHP, VIKOR, COPRAS, MOORA ve PROMETHEE II yöntemleri araştırılmıştır. Bu yöntemlerin teorik bilgileri ve analizde kullanılacak matematiksel formül adımları belirtilmiştir.

Dördüncü blmde işletmelerin Endüstri 4.0'a uyum sürecinde baz alacakları tasarım ilkelerini çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinden biri olan AHP Yöntemiyle önem ağırlıkları hesaplanmıştır. Ayrıca belirlenen 5 tekstil firmaları arasından Endüstri 4.0'a en iyi uyum sağlayan firmayı belirlemek için yine çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinden olan VIKOR, COPRAS MOORA ve PROMETHEE II yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemlerin analiz sürecinde Microsoft Excel proğramı kullanılarak hesaplama yapılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Literatür Taraması

Literatür araştırmasında, Endüstri 4.0 metodolojisi ve Endüstri 4.0'a işletmelerin adaptasyonu ile ilgili çalışmayla karışılaşmak mümkündür. Güncel olan bu konu ile ilgili örneklerin yanı sıra, çok kriterli karar verme yöntemleriyle ilgili çalışmalarda gösterilmiştir.

Ivanov vd. (2020)'de yaptığı çalışmada Ağustos 2019'da Berlin'de düzenlenen 9. IFAC MIM 2019 konferansına katılan endüstri mühendisliği, operasyon yönetimi, yöneylem

araştırması, kontrol ve veri bilimindeki araştırmacılar arasında Endüstri 4.0 konusuyla ilgili küresel bir anket yapmışlardır. Yapılan anket bulguları ve literatür analizi sonucunda, mevcut bilgi durumunu anlamak ve operasyon yönetimi için gelecekte araştırma fırsatı önermek için yapısal ve kavramsal çerçeve oluşturulmuştur.

Guo vd. (2021)'de üretim ve operasyon yönetiminin yeni paradigması olan Endüstri 4.0 üzerine yoğunlaşmışlardır. Hiper Bağlantılı olarak kurulmuş olan Fiziksel İnternet Özellikli Akıllı Üretim Platformu (HPISMP), üretim senkronizasyonunu desteklemek için teknik bir çözüm geliştirilmiştir. Önerilen konseptin etkinliğini doğrulamak için endüstriyel bir vaka yürütmüşlerdir.

Chauhan, Singh ve Luthra (2021)'de dijitalleşmenin önündeki içsel ve dışsal engellerin firmalar tarafından Endüstri 4.0'ı benimsemesini nasıl etkilediği değerlendirmiştir. Ayrıca bu engellerin dijitalleşme ve firmanın tedarik zincir ve operasyonel performansı nasıl etkilediği araştırmışlardır. Endüstri 4.0 için acil durum yaklaşımı yanı sıra kaynağa dayalı görüşlerden oluşan argümanlar geliştirmişlerdir.

Sharma vd. (2021)'de çok katmanlı üretim tedarik zincirinde Endüstri 4.0'ın uygulanmasına yönelik itici güçleri ve engelleri değerlendirerek bu sorunla başa çıkmanın sistematik bir yolunu incelemişlerdir. Uygulayıcının görüşüne dayanarak teknolojik, organizasyonel, ekonomik, çevresel ve sosyal olmak üzere beş boyut altında toplam 37 sürücü ve 21 engel tanımlanmıştır. Analiz sonucunda çevresel ve sosyal faktörler alt başlığında bulunan sürdürülebilir yönlerin en üst sırada itici güç ve nedensel değişken olarak tanımlanmıştır. Aynı zamanda organizasyonel ve çevresel boyutlar en üst sırada yer alan engeller ve nedensel faktörler olarak belirlenmiştir.

Nakagawa vd. (2021)'de Endüstri 4.0'ın mevcut mimari referansları gözden geçirerek, bu referansların Endüstri 4.0'ın süreçlerini ve çözümlerini destekleme açısından uygunluğu analiz edilmiştir. Endüstri 4.0 mimarileri sistematik olarak araştırılmış daha sonra analiz edilip karakterize edilmiştir. Ayrıca bunların kullanımını ve uygulamalarını destekleyebilecek teknolojileri de ele alınmıştır. Çalışma sonucunda mevcut Endüstri 4.0 mimarilerin gelişim evresinin daha başında olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle yakın gelecekte daha acil adımlar atılması için bu çalışma referans olmuştur.

Khanzode vd. (2021)'de küçük ve orta ölçekli işletmelerde sürdürülebilir üretim için Endüstri 4.0'ın önündeki engeller DEMANTEL tekniğini kullanılarak değerlendirmişlerdir. Bu çalışma sürdürülebilir üretim için Endüstri 4.0'ın teorik gerekliliğini idari açıdan anlamaya çalışmışlardır. Sürdürülebilir üretimde Endüstri 4.0'ı uygulamak için daha önce belirlenen sekiz engeli ele almışlardır. Bu engeller arasında nedensellik ilişkisi bulunmaktadır.

Becue, Praça ve Gama (2021)'de Endüstri 4.0'ın başlıca itici güçlerini ve ilkelerini araştırmışlardır. Ayrıca üretim sisteminde yapay zekânın ortaya çıkışı hakkında öngörüler ve oluşturduğu zorluklar dizisini belirtmişlerdir. Üretim sürecini izleme, optimizasyon ve kontrol gibi yapay zekâ tabanlı çeşitli uygulama durumlarına ilişkin görüşler hakkında öneride bulunmuşlardır.

Ghobakhloo vd. (2021)'de yaptıkları çalışmada dördüncü sanayi devriminin sürdürülebilirliği açısından itici güçlerini açıklamış ve dijital dönüşümün için gerekli başarı koşullarını tanımlamışlardır. Çalışma sonunda Endüstri 4.0 dönüşümünün sürdürülebilir kalkınma hedeflerine yönelik sorunlarına çözüm önerisinde bulunmuştur. Ayrıca bulgulardan yararlanılarak önemli teorik ve pratik çıkarımlar elde etmiştir. Yapılan bu yenilikçi çalışmayla literatüre katkı sağlamayı amaçlamıştır.

Vaidya, Ambad ve Bhosle (2018)'de Endüstri 4.0'ın uygulanmasında ortaya çıkan zorlukları ve sorunları incelemişlerdir. Endüstri 4.0'ın uygulanmasıyla ilgili 9 temel direğin anlaşılmasını sağlamışlar ve son olarak Endüstri 4.0 ile ilgili yeni trend ve bakış açısı sağlamak için genel bir görüş oluşturmayı amaçlamışlardır.

Javaid vd. (2020)'de dünyayı sarsan COVID-19 pandemisinin uygun şekilde kontrol edilmesi ve yönetilmesi için Endüstri 4.0 teknolojilerini kullanarak çözüm önerisinde bulunmayı amaçlamışlardır. COVID-19 virüsünün yaşattığı sorunların çözülmesi için Endüstri 4.0'ın 10 ana teknolojisi ele alınmıştır. Endüstri 4.0 teknolojileriyle oluşturulan Uygun Gözetim Sistemleri, enfekte olan hastaların bölge bazında, yaş bazında ve eyalet bazında günlük olarak güncellenmesi sağlanmıştır. Endüstri 4.0 teknolojileriyle yerel ve küresel tıbbi acil durumlarla nasıl mücadele edileceğine dair çözüm önerilerinde bulunmuşlardır.

Bai vd. (2020)'de Endüstri 4.0 teknolojilerinin uygulanma alanları ve sürdürülebilirlik açısından çevreye sağladığı faydaları incelemişlerdir. Birleşmiş Milletlerin kalkınma hedeflerine dayalı olarak sürdürülebilirlik için bir önlem çerçevesi oluşturmuşlardır. Ayrıca tereddütlü bulanık küme, kümülatif beklenti teorisi ve VIKOR yöntemlerini birbirleriyle entegre ederek çok durumlu karar yöntemleri geliştirmişlerdir.

Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri hakkında literatürde birçok örnek bulunmaktadır. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir;

Lu vd. (2021)'de yaptığı çalışmada, en uygun yeşil tedarikçi seçimi problemine çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan COPRAS Yöntemini PFS (Görüntülü bulanık küme)'le entegre etmiştir. Tasarlanan yöntemin uygunluğunu göstermek için pratik bir uygulama oluşturmuşlardır. Ayrıca geliştirilen yöntemin uygunluğunu ve geçerliliğini doğrulamak için birkaç karşılaştırmalı analizde yapılmıştır. Ancak karar vericilerin ve kriterlerin sayısının yeterliliği hakkında ve kriterlerin karşılıklı birbirine bağımlılığı üzerine ayrıntılı düşünülmemiştir. Bu da geliştirilen yöntemin uygulama kapsamını belirli bir dereceye kadar sınırlandığı anlaşılmıştır.

Saraji, Streimikiene ve Kyriakopoulos (2021)'de Endüstri 4.0 trendini benimsemek isteyen Fintech şirketlerinin karşılaştıkları zorlukları incelemişler ve belirlenen bu zorlukları sıralamak için yeni bulanık CRITIC-COPRAS Yöntemi geliştirilmiştir. Uygulamada belirlenen zorlukları ağırlıklandırmak ve şirketlerin performansını değerlendirmek için üç karar vericinin görüşleri almışlardır. Yapılan analiz sonucunda Endüstri 4.0'ı benimsemeye belirlenen 14 zorluktan en önemlisinin iş birliği ve koordinasyon zorluğu olduğu anlaşılmıştır. Karşılaştırmalı analiz yoluyla yöntemin etkinliği ve üstünlüğü incelemişlerdir.

Akram vd. (2021)'de Pakistan'daki Suudi petrol rafine projesini yürütecek olan firmayı belirleme problemini, çok özellikli grup kararı yöntemlerinden biri olan VIKOR yöntemiyle çözüm önerisinde bulunmayı amaçlamışlardır. Bunun için öncelikle kapsamlı teorik çalışma yapılmıştır. Bu proje, Pakistan'ın ekonomik büyümesini destekleyecek olan enerji sektörü, endüstriyel gelişme, ticaret, ulaşım gibi başarı faktörlerinin oluşmasını sağlamıştır. Bu çoklu yöntem sistem içi sistem dışı olan birkaç karmaşık bileşeni haklı çıkarmıştır. Belirlenen niteliklerin, böyle bir firmanın seçimi için yani bu sorunun birçok nitelikli grup karar verme yöntemiyle formüle edilmesi için yeterli olarak kabul etmişlerdir.

Duan vd. (2021)'de epistemik belirsizliği altında güvenilirlik kriteri üzerine etkili bir sensör yerleştirme sorununa czm nerinde bulunmuşlardır. Ayrıca ortak nedenli arızayı dikkate alan bir VIKOR algoritması önermişlerdir. Yöntem karmaşık sistemlerde ortaya cıkan iki önemli zorluğu ele almak için dizayn edilmiştir.

Siregar vd. (2021)'de Sekolah Tinggi Akuntansi Negara akademisinde Başarı Geliştirme Bursu alacak en iyi ğrenci seçme problemine czm geliştirmeyi amaçlamışlardır. Öğrencilerin akademik performanslarını değerlendirmek için GPA ile STAMINA zellikleri baz alınarak incelenmiştir. Bu problem bir karar destek sistemi olan oran analizine dayalı ck amaçlı optimizasyon yöntemi olan MOORA yöntemi ile czlmştr. Bu karar destek sisteminde kullanılan kriterler ebeveynlerin geliri, ebeveynlerin bakmakla yükümlü olduğu kişiler, dönem ve not ortalamalarından oluşmaktadır. MOORA yöntemi kullanılarak burs almaya hak kazanan en iyi ğrencinin STAMINA_Student02 alternatifi olduğuna karar verilmiştir.

Daulay, Intan ve Irvai (2021)'de öğrenim bursu alacak olan bursiyerleri belirlemek için MOORA ve WASPAS yöntemlerini kullanmışlardır. ğrenim bursu alacak öğrencileri seçmek için beş kriter belirlemişlerdir. Bu kriterler; ebeveynlerin geliri, elektrik faturaları, su faturaları, arazi ve bina vergileri ve aile masraflarıdır. WASPAS yöntemi analiz sonucuna göre 10 ğrenci alternatifi içerisinden belirlenen kriterlere en uygun alternatifin 8. sıradaki ğrenci olduğu belirlenirken MOORA Yöntemine göre 4. sıradaki öğrencinin en uygun bursiyer olduğu belirlemişlerdir.

Agrawal (2021)'de tedarikçi sayısının son zamanlarda ck cşitli kriterlere bağlı olarak büyük ölçüde arttığı ve cşitli tedarik zincir hareketlerinden dolayı tedarikçi seçiminin hassas bir süreç olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle clışmasının amacı, tedarikçi seçim problemini PROMETHEE II yönteminden faydalanılarak czmeye clışmışlardır. Yapılan hassas analiz ile farklı kriterler üzerine tedarikçi sıralamasına temel bir bakış açısı sağlamışlardır. Ayrıca PROMETHEE II yöntemini diğer ck kriterli karar verme yöntemleriyle karşılaştırmışlardır.

Kadziolka (2021)'de kripto para biriminde yaşanılan değerışimlerinin bir sıralamasını oluşturmak ve ck kriterli ve ck boyutlu analizleri karşılaştırmak için kullanılan

PROMETHEE II yöntemi ile uygulama olanaklarını sunmayı amaçlamıştır. Kriter ağırlıklarını belirlemek için bir simülasyon yöntemi önermiştir.

Mahad vd. (2021)'de 2017-2018 dönemlerini kapsayan Malezya'daki 22 hayat sigortasıyla endüstriyel şirketlerin aralarındaki etkileşimin değerlendirilmesi ve sıralaması için hibrit yöntem uygulamışlardır. Çalışmada kullanılan girdi değişkenler, ücretler ve komisyonlardan oluşurken; çıktı değişkenler net prim ve elde edilen yatırım geliri olarak belirlenmişlerdir. Çalışmanın ilk bölümünde karar verme birimleri, etkin puanlar elde etmek için Veri Zarflama Analizini kullanmışlardır. İkinci bölümde, birimleri en uygun şekilde sıralamak için PROMETHEE II yöntemi uygulanmıştır. Bu hibrit yöntem, tüm sigorta şirketlerini başarılı bir şekilde sıralanmıştır.

Alidrisi (2021)'de uluslararası otomotiv araçlar ve yedek parça şirketlerine ait dokuz dağıtım merkezlerinin verimliliği değerlendirmek için model geliştirmiştir. Geliştirilen model çok kriterli karar verme yöntemlerinden PROMETHEE II ve Veri Zarflama Analizini entegre ederek oluşturmuştur. Araştırma sonucunda geliştirilen hibrit model, bir değerlendirme modelinde pratik ve kavramsal olarak istenilenleri toplu olarak sunmaktadır. Ayrıca sonuçlar, dağıtım merkezlerine gelecekteki potansiyel girişimleri anlayabilmek için merkezlerin bulunduğu konumlarının değerlendirilmesi yoluyla altı farklı strateji belirlenmiştir.

Yüksel (2023)'de demir yolu yük treni işletme şirketlerinin performans değerlendirilmesi için Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerini kullanarak analiz etmiştir. Öncelikle değerlendirmede kullanılacak Temel Performans Göstergeleri (TPG) belirlenmiştir. Belirlenen TPG'lerin önem ağırlıkları AHP ve bulanık AHP yöntemiyle belirlenmiştir. Son aşamada Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinden TOPSİS, PROMETHEE II ve COPRAS yöntemleri kullanılarak Türkiye'de faaliyet gösteren yük tren işletmelerinin performansları değerlendirilmiştir.

Kocadüz (2023)'de Borsa İstanbul'da (BİST) işlem gören otomotiv firmalarının 2017-2021 yılları arasında finansal performanslarını Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle analiz etmiştir. Bu analiz için 15 finansal oran aracı kullanılmıştır. Firmaların finansal oranları için gerekli veriyi KAP'tan elde edilmektedir. Çalışmada Entropi Yöntemi kullanılarak belirlenen 15 finansal oranların önem ağırlıkları oluşturulmaktadır.

Ağırlıklandırma işleminden sonra firmalar finansal performansları TOPSİS, ARAS ve COPRAS yöntemleri kullanılarak yıllara göre başarı sıralaması yapılmaktadır.

Şahin Macit (2023)'de Gümüşhane ilinde faaliyet gösteren bir süpermarketin süt ve süt ürünleri için tedarikçi seçimi problemine Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle çözüm bulmaya çalışılmıştır. Öncelikle problem çözümde kullanılacak olan kriterler AHP yöntemiyle ağırlıklandırılmıştır. Ağırlıklandırma işlemi sonucunda 5 tedarikçi alternatifi belirlenen kriterler baz alınarak MAIRCA yöntemiyle analizi yapılmıştır. Bu şekilde en iyi alternatif firma belirlenmiştir.

Yılmaz C. ve Yılmaz T. (2023)'de Endüstri 4.0'ın İnsan Kaynakları Yönetiminde nasıl bir etkiye sahip olduğunu anlatmaya çalışmışlardır. İKY'nın dijitalleşmesiyle ortaya çıkan İKY 4.0'ı derinlemesine analiz ederek İKY süreçlerine nasıl entegre olacağı açıklamaya çalışmışlardır. Yapılan inceleme sonucunda dijitalleşmenin yeni insan kaynakları yönetim yaklaşımının firmalar tarafından başarılı bir şekilde yürütebileceği ortaya konulmuştur.

Gerger (2023)'e Yalın Üretim anlayışına “aşağıdan yukarıya” metodu veya “yukarıdan aşağıya” metodundan birisini uygulanarak dijital dönüşümün gerçekleşebileceğini belirtmiştir. Ülkemizde Endüstri 4.0'a dönüşümünde kullanılacak her iki metotla ilgili literatürde herhangi bir kaynak tespit edilememiştir. Bu nedenle hem literatüre katkı sağlamak hemde Endüstri 4.0'a uyum sağlamak için “aşağıdan yukarıya” metodunun neden tercih edilmesi gerektiğini ayrıntılı bir şekilde anlatmaya çalışmıştır.

Kurt ve Akçacı (2024)'de Endüstri 4.0 uygulamalarının tedarik zinciri yönetimine nasıl bir etkisi olduğunu anlatmaya çalışmışlardır. Çalışmada kullanılacak veriler 103 firmadan yapılan anket sonucunda elde edilmiştir. Bu veriler açımlayıcı faktör analizi, frekans ve regresyon analizi yapılarak bazı bulgular elde edilmiştir. Bu bulgulara göre Endüstri 4.0 olumlu ve anlamlı etkisi olduğu belirtmiştir.

Börü ve Tahsin (2023)'de Türkiye'nin Endüstri 4.0'ı benimsemeye karşılaştıkları engelleri anlatmışlardır. Nitelikli işgücü eksikliği, finansal sorunlar, ulusal dönüşümün zayıflığı, firmaların teknoloji kapasitesinin yetersizliği, kullanılacak teknolojilerin yabancı kaynaklardan tedarik edilmesi gibi engeller belirtmişlerdir. Bu doğrultuda Türkiye'nin teknoloji kapasitesi diğer ülkelerle karşılaştırılarak belirlenmeye çalışmışlardır. Yapılan

araştırma sonucunda Türkiye'nin Endüstri 4.0 benimseme konusunda diğer ülkelerden geride olduğu anlaşılmıştır.

Ekin ve Dolanbay (2024)'de Kırıkkale'nin belirlenen 4 ayrı ilçenin herhangi birinde kütüphane yapılması için en uygun yer seçimi problemine AHP yöntemi temelli TOPSİS yöntemi analiz edilerek çözüm elde etmişlerdir.

Erik ve Kuvvetli (2021)'de 24 imalat firmasının Endüstri 4.0'a entegre olma yeteneklerini incelemişlerdir. Değerlendirme kriterleri bilgi teknolojilerinden ar-ge yönetimine, finans yönetiminden müşteri ilişkilerine kadar birçok konu başlığı altında toplanmıştır. Değerlendirme sonucuna göre 24 firmanın 13'ünün Endüstri 4.0'a entegre olmada etkin olduğunu tespit etmişlerdir.

Machado vd. (2019)'da araştırmalarında yedi firmanın öz kontrol aracı uygulaması yoluyla dijital dönüşüme hazır olma durumunu incelemişlerdir. Dijitalleşmeye yönelik nedenleri, zorlukları ve benimseme nedenleri üzerine bir vaka çalışması yapmışlardır.

3. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

3.1. Endüstri 4.0 Kavramı

Endüstri 4.0, akıllı ve otonom üretimin yeni bir paradigması olarak öne çıkmış ve üretim sistemlerini iletişim ve bilgi teknolojileriyle daha derinden bütünleştirmiştir (Wang vd. 2017: 311). Son birkaç yılda, bilgi ve iletişim teknolojilerinde yaşanan hızlı gelişmeler ve bu gelişmelerin tedarik zincirine entegrasyonu ile dördüncü sanayi devriminin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Ayrıca İnternete dayalı Bilgi Teknolojisi ve otomasyonun kullanılması, insanların ve makinelerin bilgi ve veri alışverişinde bulunma olasılığını arttırmıştır (Ardito vd. 2018: 323).

Üretim sistemlerin işletilmesi ve kontrolü son yıllarda önemli ölçüde değişmiştir. Farklı süreçleri merkezden kontrol eden geleneksel yaklaşım, endüstriyel uygulamaların mevcut seviyesine ulaşabilmesi için birkaç önemli gelişmeler yaşamıştır. Şu anda mevcut olan ve akıllı üretim sisteminin gelişimini destekleyen siber-fiziksel sistemler, bilgi teknolojilerini fiziksel süreçlerle bütünleştirmiştir. Ayrıca Nesnelerin İnterneti (IoT), Hizmetlerin interneti (IoS), Bulut Bilişim ve Büyük Veri Analitiği gibi ortaya çıkan

teknolojiler Endüstri 4.0'a girişimleri desteklemekte ve üretim sistemleri için yeni bir paradigma sağlamaktadır (Jasko, 2020: 2).

Endüstri 4.0 kavramının keşfi ile firma içi ve firma dışı tüm dağıtım kanallarının dijital dönüşümünü kapsaması ile klasik üretim süreçlerinin dışına çıkılarak akıllı üretim tekniklerine geçiş başlamıştır (Branca vd. 2019: 1). Tüm küresel manzarayı çarpıcı biçimde değiştirecek bir sosyal ve teknolojik dönüşümün yolunu açmaktadır. Endüstri 4.0 teknolojileri üretim hatları, iş süreçleri ve ekipmanların konumu, saat dilimi, ağ ve diğer yönlerden bağımsız olarak iş birliği yapmasını sağlamaktadır. Ayrıca bu yeni trend kablosuz ağ teknolojileri ve IoT yeteneğiyle üretim ve verimlilik sürecini izlemekten sorumlu kişilerle makineleri, sensörleri ve diğer cihazları birbirine bağlamaktadır (Lu, 2017: 1).

Üretimdeki en son teknik gelişmeleri içermekte olan Endüstri 4.0, Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Hizmetlerin İnterneti (IoS) gibi siber-fiziksel yapıları birleştirmiştir. Bu dönüşüm karar sürecini insan etkisi olmaksızın, işletim sürecini ve sistem içi koordinasyonları karşılıklı akıllı ilişki içerisinde tamamlamaktadır. Endüstri 4.0'ın amacı mevcut mimariyi, üretim ve hizmet süreçlerini değiştirmektir. Operatör ve distribütör belirsizliğini azaltmak ve dağıtım performansını arttırmak için bu teknolojik gelişmeyi kullanmıştır. Ekipmanların dijitalleştirilmesi yalın modernizasyona ve teknolojideki yeni gelişmelere neden olmaktadır. (Huang vd. 2017: 711).

Üretim ekipmanları, yüksek düzeyde otomatikleştirilmiş istasyonlar ve robotlar olarak tekrar karakterize edilmiştir. Bu şekilde bu ekipmanlar, işletmeye değer katan diğer faktörlerle birlikte değişimlere esnek bir şekilde uyum sağlayabilecektir. İmalat sektöründeki mevcut işler, büyük ölçüde otomatikleştirildiği için işçi sayısının azalması işsizliğin artması gibi olumsuzluklarla karşı karşıyadır. İşçiler, daha fazla otomatikleşmiş ekipmanları izleyerek ve merkezi olmayan karar alma süreçlerine entegre olarak makineleşmiş sistemin bir parçası haline gelmiştir. Üretim sisteminde artan organizasyonel karmaşıklık nedeniyle belirli bir merkezi noktadan sistemin yönetilmesi imkansızlaşmıştır. Bu yüzden karar alma, merkezi mesafeden merkezi olmayan mesafeye doğru değişim göstermiştir. Karar verme mekanizması yerel bilgileri otomatik olarak düşünülerek ve kararlar işçiler veya yapay zekâ alanındaki ekipmanlar tarafından alınmaya başlanmıştır (Bai, 2020: 3).

Endüstri 4.0 paradigması, bir fabrikadaki tüm birimleri ve sınıfları etkileyen tamamen sayısallaştırılmış, karmaşık bir sistem olduğu varsayılmıştır. Mevcut bir fabrikanın Endüstri 4.0'ın gerektirdiklerini karşılayabilmesi için dijital dönüşümlerini yeniden yapılandırmalı ve yatırımlarını bu alana yoğunlaştırması gerekmektedir. Dönüşüm dereceleri fabrikaların gelişmişlik düzeyine bağlı olarak farklılık göstermiştir. Fabrikalar fiili durumları hakkında etkili bir şekilde değerlendirme yaparak nihai hedefe yönelik yapılacak hizmet yolculuğunda küçük iyileştirmeler sonucu dijital dönüşümden verimlilik elde edilecek ve yatırım maliyetlerini zamana yayacaktır (Branca, 2020:19).

Endüstri 4.0 çağında üretim, bilgi ve iletişim sistemleriyle sıkı bir şekilde bağlantılı olması onu daha çok ölçeklenebilir; rekabetçi ve akıllı hale getirmiştir. Endüstri 4.0, yeni ve mevcut fabrikaların kurulumu için bir dizi ilkeler, talimatlar ve teknolojiler gerekmiştir. Üreticilere üretim alanlarında ölçeklenebilir robotik ve bilgi ve iletişim teknolojileriyle farklı modellerin seçilmesine imkân sağlamıştır. Ayrıca akıllı bir fabrikada ürün çıktısını yukarı ve aşağı ölçeklendirmek daha hızlı olmaktadır. Bu şekilde ölçeklendirmek, bir üretim tesisi için daha yüksek gelirler elde edilmesine neden olmuştur (Javaid vd. 2022: 203).

Endüstri 4.0 üretim anlayışı, imalat şirketlerinin geleneksel yaklaşımını bozabilecek yeni fırsatlar sunmuştur. Artan sayıda yeni dijital teknoloji sayesinde, Endüstri 4.0'ın tüm ana süreçlerde yansıma ve uygulama alanına sahip olmuştur. Aynı zamanda, teknolojiler çeşitli süreçleri farklı bir şekilde etkilemiş; tüm süreçler üzerinde çapraz etkileri olan bazı teknolojiler olabilirken, bazı teknolojiler yalnızca tek bir sürece odaklanmıştır (Zheng vd. 2021: 1923).

Endüstri 4.0 amacı (Masood ve Sonntag, 2020: 2);

- Üretilen ürünlerin bilgi teknoloji destekli toplu özelleştirilmesini sağlamak,
- Üretim zincirinin otonomlaşması,
- Üretim prosesindeki tüm bileşenlerin etkileşimini kolaylaştırmak,
- Üretimde nesnelerin interneti teknolojisi ile üretim optimizasyonunu sağlamak,

Endüstri 4.0'a uyum sağlamaya çalışan firmalar uzun dönemde maliyeti azaltarak etkinlik ve verimliliği arttırmayı; aynı zamanda operasyonların karmaşıklığını azaltarak

gerçek zamanlı veri ve bilgilerin amacına uygun toplanmasını ve uygulanmasını hedeflemiştir (Santos vd. 2017: 973).

Endüstri 4.0 dijital dönüşümü, ürün yaşam döngüsünde tüm değer zincirinin dijitalleşmesini ve entegrasyonunu içermiştir. Akıllı üründen tedarikçilere kadar kapsayan, küresel ölçekte ve gerçek zamanda birbiriyle iletişim kurma gibi yatay ve dikey olarak entegre edilmiş dijital tedarik ağının tüm değer fonksiyonunu içermektedir (Frank, Dalenogare, Ayala, 2019: 15).

Tipik bir kullanıcı perspektifinden bakıldığında, Endüstri 4.0'ın hem profesyonel hem yerel hem de sosyal alandaki etkisinin daha net bir görüntüsü bulunmaktadır. Bu yeni paradigmayla hayatımıza giren akıllı evler, akıllı şehirler ve e-sağlık gibi dijital sistemler dünyanın nasıl devrim yaratacağına dair olası senaryolarından sadece birkaçını oluşturmaktadır (Strange ve Zucchella, 2017: 174).

3.1.1. Endüstri 4.0 faydaları

Endüstri 4.0'ın sunduğu faydalardan yararlanmak isteyen işletmeler, piyasada rekabet edebilmek ve pazar paylarını artırabilmek için işletme stratejilerini dijital dönüşüme entegre edecek şekilde planlamışlardır. Fakat bu oldukça zor bir süreçtir ve geleneksel yaklaşımdan dijital yaklaşıma geçişin başarılı bir şekilde yapılabilmesi için uzun vadeli bir taahhüt gerektirmektedir. Endüstri 4.0'ın benimsenmesi, yalnızca bir üretim şirketinin yenilik yapma kapasitesini zorlamakla kalmayacak, aynı zamanda organizasyon içi modeller, fiziksel altyapı, organizasyon çapında değişiklikler, üretim teknolojileri, insan kaynakları, uygulama ve değişiklik yönetimi gibi yeni stratejiler gerekecektir (Dalenogare vd. 2018: 384).

Ayrıca Endüstri 4.0'ın işletmelerin hem içsel hemde dışsal sürdürülebilir tüm fonksiyonlarına olumlu etkisi bulunmaktadır;

➤ Endüstri 4.0'ın tasarım ilkeleriyle yeni ürünlerin ve hizmetlerin sunuş şeklini büyük ölçüde değiştirmiştir. Önemli ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik fırsatları sunan yeni iş modelleri uygulanmaya başlanmıştır (Jiang, Ding ve Leng, 2016: 20).

➤ IIoT ve Yapay Zekâ bazlı üretim, esnekliği ve verimliliği arttırmıştır. Kitle üretimden kitlesel özelleştirme hatta ürün bireyselleştirme gibi değişen yeni iş modelleriyle tüketici pazarlarını optimize edebilmiştir (Jin vd. 2017: 69).

➤ Endüstri 4.0 teknolojileri ve tasarım ilkeleriyle, malzeme akışı optimizasyonu, ürün pazarlama, üretim alanı ve tesis optimizasyonu, kaynakların verimliliği, israfın azaltılması, üstün ürün yeniliği ve kalite, geliştirilmiş üretim kapasitesi ve güvenilirlik konularda olumlu etkisi bulunmaktadır. Endüstri 4.0 birçok düşük yetenekli işler yerine sayısız dijitalleşmiş iş imkânı sunmaktadır (Kamble, Gunasekaran ve Dhona, 2019: 1323).

➤ Endüstri 4.0, toplumların üretim, tüketim, ticaret ve yaşam biçimlerini değiştirmiştir. Kablosuz ağlar ve Blok Zincir teknolojisi gibi enerji sistemlerinin dijitalleşmesi enerji sektörüne katkı sağlamıştır. Üretim için önemli olan zaman kavramı etkin bir şekilde kullanılmıştır (Huang vd. 2017: 710).

➤ Endüstriyel Simülasyon, Dijital İkiz ve Büyük Veri Analitiği gibi Endüstri 4.0 teknolojileri, üreticilerin karşılaştıkları talep belirsizliği, ürünleri kişiselleştirme talepleri ve ürünlerin kullanım ömrünün azaltılması gibi sorunlara daha hızlı cevap verebilmiştir (Kusiak, 2018: 513).

➤ Endüstri 4.0 ortamında endüstriyel robotların, otomatik araçların ve akıllı makinelerin stok takibi, kalite kontrol, ürün dağıtımı gibi alanlarda insanların yerine ikame edilmesi amaçlanmıştır. Bu şekilde uzmanlar, düşük ve orta vasıflı işlerin Endüstri 4.0'la ortadan kaldıracağını düşünmüşlerdir (Ghobakhloo ve Fathi, 2019: 3).

İşletme ekosisteminin değerini artıran yenilikler daha yüksek düzeyde uzmanlık gerektirmektedir. Son zamanların en büyük yeniliği olan Endüstri 4.0'ı benimseyen firmalar, üretim sistemini teknolojik altyapı üzerine kurarak dijitalleşme serüvenine önemli adımlar atmışlardır. Endüstri 4.0 üretim sistemi, sürdürülebilir otomasyon ve veri akışı sağlayabilen akıllı fabrika ortamında yerleşik bir düzene sahip olması gerekmektedir. Endüstri 4.0 üretim anlayışıyla müşteri taleplerini optimize edecek esnekliğe sahip olan firmalar, gelişmiş rekabet gücü, çok yönlülük, artan karlılık gibi avantajlara sahip olmuşlardır. (Santos, 2017: 973).

Endüstri 4.0 uygulaması, üretim sürecine getirdiği esneklik ve toplu özelleştirme imkânı gibi birçok alanda fayda sağlaması beklenmektedir. Bu şekilde işletmeler, pazara

giriş süresi azaltılmış ve bireyselleştirilmiş ürünler üretebilmişlerdir. Aynı zamanda bu teknolojik üretim sistemi üretkenliği arttırmayı, kaynak tüketimini azaltmayı, kalite ve verimliliği arttırmayı da vaat etmiştir (Asif, 2020: 5).

Endüstri 4.0'ın faydaları aşağıda daha kapsamlı bir şekilde açıklanmıştır (Kusiak, 2018: 515);

- Ürün teslim süresinin azalması
- İşgücü verimliliğinin artması
- Süreç görselleştirme ve kontrolün artması
- Maliyetlerin azalması
- İş süreçlerinde esnekliğin artması
- Daha iyi talep tahmini
- Risk yönetimini iyileştirme
- Küresel rekabet
- Daha hızlı büyüme
- Etkin ürün yaşam döngüsü
- Gerçek zamanlı bilgi
- Sürdürülebilirliği artırma
- Rekabet avantajı sağlama

Endüstrini dijitalleşmesi ile artan üretim miktarı ve enerji tüketimi gibi etkenleri artırarak endüstriyel kaynaklı çevresel sorunlara neden olmuştur. Aynı zamanda dijital dönüşüm ve endüstrinin yeniden yapılanması işgücü piyasasının bozulmasına neden olmuştur. Ancak Endüstri 4.0 ile otomasyon ve yazılım mühendisliği gibi çeşitli alanlarda da iş imkanı sağlamıştır. Ayrıca uzmanların dijitalleşmesi ve emek tasarrufu sağlayan teknolojilerin ortaya çıkması düşük vasıflı işlerin çoğunu ortadan kaldıracaktır (Ghobakhloo, 2020: 2).

3.1.2. Endüstri 4.0 benimsenmesinde karşılaşılabilecek zorluklar

Endüstri 4.0'ın benimsenmesi ve uygulanmasına yönelik bazı endişeler bulunmaktadır. Endüstri 4.0'ı uygulama adına mevcut standart yaklaşımların olmadığı

düşünüldüğünde, Endüstri 4.0'ı benimsemeye karar vermek ile onu uygun bir şekilde uygulamak tamamen farklı görevlerdir. Öncelikle yapılması gereken Endüstri 4.0'ın benimsenmesinde karşılaşılabilecek zorluklar vurgulanmalı ve ardından uygulamaya geçilmelidir (Pereira ve Romero, 2017: 1208).

Endüstri 4.0'ın etkilerinin düşük düzeyde anlaşılması, bilgi eksikliği ve birleşik liderlik, yatırım getirisinin doğru bir şekilde tahmin edememe, yasal sorunlar, veri sahipliği, dijital kültür eksikliği, dijital olarak yetkin işgücü eksikliği, organizasyon kültürünü değiştirme zorunluluğu, altyapı ve internet tabanlı hizmetlerin eksikliği, Endüstri 4.0'a yönelik isteksiz davranışlar, güvenlik sorunları ve finansal kısıtlamalar gibi etkenler Endüstri 4.0'ın benimsenmesinde büyük engeller olarak görülmüştür (Luthra ve Mangla, 2018: 171).

Teknik engeller

➤ Bilgi iletişim teknoloji (BİT) altyapısı; Birçok imalat işletmeleri için yatay, dikey ve uçtan uca entegrasyonu amaçlayan mevcut BİT altyapıları, Endüstri 4.0'ın dijital dönüşümünü desteklemek için tamamen halihazırda bulunmamaktadır. Yeni BİT ve hatta yeni iş modelleri hem kurum içi hem de kurumlar arası seviyelerde geliştirilmesine ihtiyaç duyulmuştur (Liao, 2017: 3616).

➤ Ölçeklenebilirlik; Endüstri 4.0 çevrelerinde büyük bir zorluk olarak görülmektedir. Daha fazla nesne birbirine bağlandığında üretim ağındaki ölçeklenebilirlik sorunu ortaya çıkmaktadır. Üretim ağları, yüksek hızda büyük hacimli işlemsel veri ve bilgi çeşitliliği için kullanılmıştır (Li, Li, ve Zhao, 2014: 1498).

➤ Kalifiyeli çalışanların eksikliği; Endüstri 4.0 teknolojilerini yürütebilmek ve yönetebilmek için kalifiyeli çalışanlara ihtiyaç vardır. Bu teknolojiler, sürekli eğitim gerektiren ve rotasyon uygulaması olmayan iş ortamlarında çalışma zorunluluğu, işgücünün memnuniyetsizliğine neden olmuştur. Bu koşullara dayanarak çalışanlarda, yüksek maaş talebi gibi özlük haklarında iyileştirmeler yapılmasını istemektedir (Raj vd, 2020: 8).

Organizasyonel engeller:

➤ Finansal kaynak eksikliği; Akıllı araç ve sensör teknolojilerinin geliştirilmesi ve altyapı düzeneğinin dijital hale getirilmesi için büyük yatırımların yapılması

gerekmektedir. Yatırım maliyetlerinin yüksekliği ve finansal kaynak kıtlığının yaşanması, uygulama için önemli bir engel teşkil etmiştir (Çıkmak ve Yazgan, 2023: 2068)

➤ Değişime direnç; Endüstri 4.0 teknolojilerinin sisteme girişiyle yönetim fonksiyonlarını değiştirmesi, organizasyon kültürünü etkilemesi ve çalışanlardan yeni üretim sistemine gerekli yetkiyi sağlaması beklenmiştir. Bu nedenlerden dolayı yönetimin ve çalışanların değişime direnç göstermesi gözlemlenmiştir (Horvath ve Szabo, 2019: 121).

➤ Anlamsal olarak birlikte çalışabilirlik; İki veya daha fazla makineler arasındaki veri işlemini etkili ve verimli bir şekilde yürütebilmek için bir iş protokolu gerekmektedir (Elhusseiny ve Crispim, 2022: 869). Bazı protokolların birbiriyle işlem yönünden çakışması sistemlerin birbirine entegre olmasını engellemiştir.

➤ İşsiz kalma korkusu; Endüstri 4.0'ın üretim sistemine girmesiyle emek yoğun üretim yerine robotların ve makinelerin kullanılmaya başlanması, bu teknolojik gelişmeye karşı endişe duyulmasına neden olmuştur (Yılmaz ve Öncel, 2023: 406)

➤ Endüstri 4.0 teknolojilerinin başarısız olması korkusu; Geleneksel üretim anlayışından Endüstri 4.0 konseptli fabrikalara geçiş için büyük yatırımlar gerekmektedir. Teknolojik gelişmeler devam ederken kurulan yeni fabrikaların demode olma riskinin yüksek olması, yatırım yapılan fabrikaların amorti edilmeden yeni teknolojik gelişmelerin yaşanması, yeni iş modellerin ortaya çıkması ve pazara yeni rakiplerin girmesi şirketlerin gelirini önemli ölçüde azaltacaktır. (Dalenogare, 2018: 386).

➤ Uygulamayla ilgili bilgi eksikliği; Endüstri 4.0 ile sağlanan uygun bir teknolojiyi desteklemek için gerekli altyapının olması gerekmektedir (Sung, 2018: 43).

➤ Yönetici eksikliği; Endüstri 4.0'a geçişte bir vizyon ve strateji formüle etmek için gerekli olan planlama ve stratejik yönetim yeteneği olan uzmanlaşmış üst ve orta düzey yönetici gerekmektedir (Tortorella, 2019: 286)

Teknolojik engeller:

➤ İleri hizmet teknolojilerini kullanmak için bilgi eksikliği; Uygun yetenek ve uzmanlaştırılmış işgücünün eksik olması hedeflerin, adımların ve ihtiyacı duyulan kaynağın belirleme konusunda bilinçli planlamanın yapılamıyor olmasıdır (Fındık, 2022: 126)

➤ Söz konusu uygulamaların bakım ve kullanım karmaşıklığı; Birleştirilmiş iletişim protokolü eksikliği, süreçleri içeren standartların eksikliği gibi nedenlerden dolayı bazı karmaşıklıklar ortaya çıkmaktadır (Çam, 2023: 12)

Yasal engeller:

➤ Yönetici ve departmanlar arasındaki iş birliği ve entegrasyon eksikliği; örgütsel yapının yetersizliği, süreç organizasyonu eksikliği ve farklı organizasyonel birimlerin çıkar çatışmaları Endüstri 4.0'a entegre olmayı engellemiştir (Oruçoğlu, 2022:

➤ Gizlilik endişesi; Endüstri 4.0'da veri alışverişi için yoğun internet kullanımı gerekmektedir. Bu da veri-sistem gizliliği konusunda endişe duyulmasına neden olmuştur (Raj vd, 2020: 8).

Fiziksel dünya ile sanal alan bütünleştikçe, Endüstri 4.0 ekosisteminde güvenlik sorunları giderek daha ciddi hale gelmektedir. Endüstri 4.0, bilgi güvenliği ve gizliliğin korumasını talep etmektedir. Kurumsal bilgi güvenliğini korumak için mevcut teknolojiler bulunmaktadır. Fakat bu teknolojilerinde kendi güvenlik kurallarına ve gereksinimlerine sahip güvenlik uygulamaları yeterli sayıda bulunmamaktadır (Xu, L. Xu ve Li, 2018: 2954).

Müşteri taleplerine hızlı cevap vererek verimliliği arttırmaya çalışan firmalar, süreç entegrasyonu ve iş birliği konularında sistem içerisinde gerekli dijital düzeni oluşturulmalı ve herhangi bir aksaklıkta sistem kendini form edecek şekilde tasarlanmalıdır. Endüstri 4.0 teknolojilerinde hem işletme içi hem de işletme dışı sistem entegrasyonu gerekmektedir. Tüm tedarik zinciri boyunca teknolojik entegrasyonu sağlamak için birleştirilmiş iletişim protokolü geliştirmek bu açıdan önem arz etmiştir. Bu nedenle firmaların ortak düşüncesi, üretim süreçlerinde ortaya çıkan büyük miktarda verilerin işlenmesini desteklemek için iş zekasına sahip sistemlerin geliştirilmesi bir amaç haline gelmiştir (Horvath ve Szabo 2019: 121).

Örgütsel direnç ve bunun yetersiz yönetimi de önemli bir engel teşkil etmektedir. Çoğu durumlarda, örgütsel birimler arasındaki çelişkili çıkarlar, yeni teknolojinin anlaşılmasını engellemiş ve bilinmeyen korkusu gibi endişeler yaşanmıştır. Örgütsel direnç hem alt düzey çalışanlarda hem de orta düzey yöneticilerde görülebilir. Çalışanlar artan dijitalleşmeyle işlerini kaybetmekten korkabilir ve yeni teknolojilerle başa çıkmakta uygun becerilere sahip olamayabilir. Orta düzey yöneticilerin faaliyet kapsamı tamamen değişebilir

ve rolleri daha fazla uzmanlık gerektiren bazı yeni görevleri içerecek şekilde yeniden konumlandırılabilir (Beier, 2020: 9).

3.2. Endüstri 4.0 Tarihsel Gelişimi

3.2.1. Endüstri 1.0

1760'lı yıllarda su ve buhar gücünün kullanımı ve üretimin makineleşmesi, Endüstri 1.0 devrimini başlatmıştır. Yaşanılan bu yenilikler üretim sürecinde de önemli değişiklikleri beraberinde getirmiştir. Bu sanayi devriminde, insan ve hayvan gücüyle çalışan makineler ile buharla çalışan makineler yer değiştirerek yeni model üretim tesisleri kurulmuştur. İnsanların fiziksel çabasının makinelerle yer değiştirmesi sonucu ürün miktarı ve üretkenlik konularında olumlu yönde artış yaşanmıştır (Lezoche vd. 2020: 2).

Endüstri 1.0'ın en temel özelliği tarıma odaklanan insan faaliyetlerini sanayi toplumuna çevirmiş olmasıdır. Endüstri 1.0'daki endüstriyel ürünler için talep, sadece tek boyut olan ürün hacmi boyutudur. Bu talep ortamına basit piyasa olarak adlandırılmıştır. Bu dönemde arzlar taleplerden daha küçük ve endüstriyel ürün çıktıları toplumun talep ettiği miktarı karşılayamamıştır. Endüstri 1.0'ın merkezi fikri, Adam Smith'in ulusların zenginliği ekonomisinde anlatıldığı gibi, fiyatlar arz ve talebin arasındaki uyumsuzluğu düzeltmek için bir otomatik araç olarak tanımlanmıştır. Eğer arzlar taleplerden küçükse fiyatlar yükselir; eğer arzlar taleplerden büyükse, fiyatlar düşer. Ürün çeşitliliği oldukça düşük ve çoğu mallar sadece tarım ürünlerini kapsamaktadır. Bu yüzden fiyat düzenlemesi, arz ve talebin arasındaki dengeyi sağlamada en iyi araçtır (Yin, Steckle ve Li, 2017: 848).

Ayrıca müşteri üretimi olarak da adlandırılan Endüstri 1.0'da ürünler yüksek maliyetli ve sınırlı sayıda kullanıcıların gereksinimleri baz alınarak üretilmiştir. Müşteri üretim, tamamen manuel üretimden makineli üretime geçen yeni üretim paradigma değişikliğini ortaya koymuştur. İngiltere'de 1770'de dokuma ve pamuk eğirme fabrikaları ilk kez müşteri üretiminden etkilenecek üretilmiştir (Wang, 2017: 311).

19. yüzyılın son on yılına kadar sürmüş olan bu dönemde önemli değişiklikler olmuştur. Fabrika üretimi, İngiltere dışındaki diğer ülkelere yayılmıştır. 19. yüzyılın ortalarında telgraf ve demiryollarının yayılması gibi ulaşım ve iletişim devrimlere tanıklık etmiştir (Ahuett-Garza ve Kurfess, 2018: 60).

3.2.2. Endüstri 2.0

Yaklaşık 1800’lü yıllarda elektrik ve çelik endüstrisinde yaşanan gelişmeler seri üretime olanak sağlayan ikinci sanayi devrimine (Endüstri 2.0) neden olmuştur (Hsu, Chen ve Chien, 2020: 1). Endüstri 2.0 veya seri üretim olarak bilinen bu dönemde, büyük ölçekli üretim sistemi kullanılarak düşük maliyetli ürünler üretilmeye başlanmıştır. Bu dönemde seri üretim çeşitliliği çok küçük ve sınırlı sayıda yapılmıştır. Henry Ford, “herhangi bir müşteri istediği renge boyanmış bir arabaya sahip olabilir, siyah olduğu sürece” diyerek bu döneme dikkat çekmiştir (Sharma ve Singh, 2020: 67).

Birçok alanlarda olduğu gibi kimya, enerji, petrol ve çelik gibi alanlarda da lider durumunda olan Almanya, Amerika, Fransa ve Birleşik Krallık gibi endüstriyel ülkelerin Endüstri 2.0 dönemine de öncülük etmiştir. Amerika’da ikinci sanayi devrimi, genellikle Frederick Winslow Taylor tarafından incelenen ve uygulanan bilimsel yöntemle ilişkilendirilmiştir. (Carvalho ve Cazarini, 2020: 3).

Endüstri 2.0, tüm teknolojik ekipmanların ve makinelerin üretim sistemi içerisindeki işgücü ile entegre olarak ortaya çıkan üretim modelidir. Geliştirilen üretim modeli gelişmiş ülkelerin genelinde bölgenin kentselleşmesine ve sanayileşmesine neden olmuştur. Endüstri 2.0’ın avantajlarının yanı sıra uzun tedarik zinciri gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Ayrıca Endüstri 2.0 üretimi için gerekli olan ham maddelerin çeşitli yerlerden tedarik ediliyor olması, maliyetleri yüksek ve verimliliği düşük olarak ölçülen nihai üretim hattı bağlantısının sağlanmasına yol açmıştır (Dobrzanski ve Dobrzanska- Danikiewicz, 2019: 343).

3.2.3. Endüstri 3.0

1970’lerde meydana gelen üçüncü sanayi devrimi, üretim süreçlerinde bilgisayar ve otomasyonun kullanılmasıyla ortaya çıkmıştır. Endüstri 3.0 devriminde üretim hattının modernizasyonu, üretim için bilgisayar desteğinin kapsamlı kullanımıyla gerçekleşmiş ve üretim süreçlerinde yaygın bir şekilde elektronik cihazlar kullanılmaya başlanılmıştır (Dobrzanski ve Dobrzanska- danikiewicz, 2019: 343).

Üçüncü sanayi devri olarak da bilinen bu dönemde ekonomi yönetiminin farklı boyutları vurgulanmıştır. Şirketler ekonomik eylem ve kesin başarılar elde etmek için

konsolide ederek daha yatay ve daha esnek görüşler benimsemişlerdir. Ayrıca bu dönemde, piyasa ekonomisi olarak adlandırılan finansal ekonomi enstrümanlarının rolleri geliştirilmiştir (Carvalho ve Cazarini, 2020: 3).

Endüstri 3.0 veya başka bir ifadeyle toplu özelleştirme üretim anlayışı, müşteri taleplerinin artmasıyla ürün yelpazesinde genişlemenin yaşanmasını da beraberinde getirmiştir. Bu yeni devrim ayrıca bilgi otomasyonuna, teknoloji ve bilgisayar gelişimine dayanması, süresiz kontrol edilen makinelerin kullanımına yol açmıştır. Destek programlar sayesinde sistemler yüksek verimlilik, düşük maliyet ve en fazla ürün çeşitliliği olarak bu dönemi zenginleştirmişlerdir (Christy, 1993: 282). Üçüncü sanayi devriminde kullanılmaya başlanan otomasyon ve mikro elektronik teknolojileri ile Bilgi ve İletişim Teknolojileri (BİT) yakından ilişkilendirilmiştir. Bu sanayi devriminde Bilgi ve İletişim Teknolojileri, üretim paradigmasındaki her büyük değişimin merkezinde yer almıştır (Da Xu, Xu ve Li, 2018: 2942).

3.2.4. Endüstri 4.0

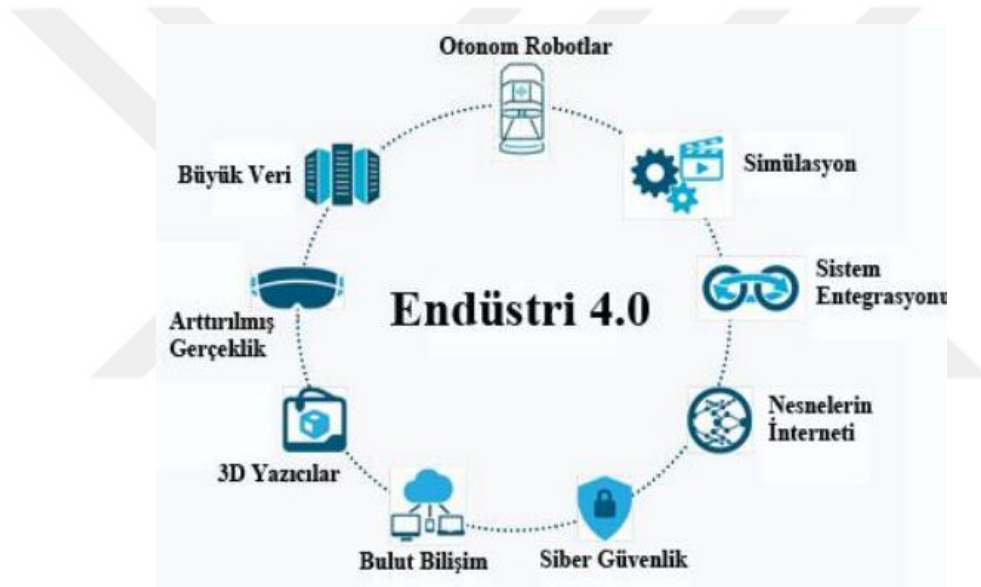
Bir Alman stratejik girişimi olan Endüstri 4.0, ilk kez 2011 yılında düzenlenen Hannover Fuarı sırasında tanıtılmış ve tüm dünyaya resmi bir şekilde ilan edilmiştir. Bu yeni trend, şu anda imalat sektöründe devrim yaratan endüstrilerde öncü bir rol üstlenmiştir (Li, 2018: 68).

Çoğu şirketler yıllarca değerlerini ve karlarını maksimize etmeye odaklanmıştır. Fakat bu eğilim zamanla değişim göstermiş ve şirket değerinden müşteri talebine değişen bir trend haline gelmiştir. Müşteri talepleri, yeni endüstriyel devrime neden olan temel etkidir. Bilgi ve iletişim teknolojileri (BİT), hayatımızın ve işimizin tüm yönlerini etkilemektedir. Gömülü yazılımın, küresel iletişim ağına entegre edilmesi ile çevremizdeki sistemleri ve cihazları birbirine bağlamıştır. Bu şekilde gerçek ve sanal dünya arasındaki sınırlar birbirleriyle örtüşmüştür (Rachinger vd. 2018: 6).

3.3. Endüstri 4.0 Teknolojileri

Son yıllarda literatürde çok tartışılan ve birçok çalışmada adını sıklıkla duyduğumuz Endüstri 4.0'ı etkinleştiren teknolojileri ve uygulama alanları analiz edilmiştir (Ghobakhloo,

2018: 911). Endüstri 4.0'ın başlangıcından bu yana, şirketler performanslarını ve üretkenliğini arttırmak için yeni sanayi devriminin ilke ve teknolojilerini benimsemişlerdir. Endüstri 4.0, şirketlerin bu zamana kadar benimsemiş oldukları geleneksel yaklaşımları bozacak yeni fırsatlar sunmuştur. Endüstri 4.0 ile hayatımıza giren yeni dijital teknolojiler üretimin tüm ana süreçlerinde etkin olabilmekte aynı zamanda farklı şekillerde etkileyebilmektedir. Tüm süreçler üzerinde çapraz etkileri olan bazı teknolojiler bulunurken, bazı teknolojiler ise yalnızca tek bir sürece odaklanmaktadır (Zheng vd. 2020: 1924). Dijital teknolojiler temel olarak Bulut Bilişim, Büyük Veri Analitiği ve Simülasyon gibi modern bilgi ve iletişim teknolojilerini ifade etmektedir (Liao vd. 2017: 2)



Şekil 3.1. Endüstri 4.0 teknolojileri (Kaynak: Frank, Dalenogare ve Ayala, 2019: 6)

Endüstri 4.0 teknolojilerinin uygulanması, üretim değer zincirine önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu avantajlar arasında, bunlarla sınırlı olmamak üzere, artan üretkenlik ve verimlilik, artan bilgi paylaşımı ve ortak çalışma, esneklik ve çeviklik, düzenlemelere daha kolay uyum, iyi müşteri deneyimi, düşük maliyet ve daha yüksek gelir bulunmaktadır (Kıral vd. 2017: 8)

Endüstri 4.0 teknolojileri, gelecekteki inovasyon ve iş büyümesi için kritik bakış açıları sağlamaktadır. Endüstri 4.0 teknolojilerinin benimsenmesi, imalat şirketlerin çeşitli üretim süreçleri üzerinde potansiyel etkilere sahip olmuştur. Süreci etkileyen liste, ürün

tasarımından üretime, servise ve son olarak geri kazanıma kadar tüm üretim akışını kapsamaktadır. Bu nedenle tanımlanan tüm prosesler ürünün yaşam döngüsü boyunca ürün üzerinde bir etkiye sahip olmaktadır (Zheng vd. 2020: 1924).

Teknolojik yenilikler ve iş ortamlarındaki değişiklikler hem firmaların kısa vadeli performansını hem de uzun vadeli sürdürülebilirliği etkilenmektedir. Teknolojinin gelecekteki durumu ve seçenekleri belirsiz olduğunda firmalar Endüstri 4.0 gibi gelecekte teknolojik gelişmelerle etkileşime girme planlarını desteklemek için uygun bir strateji formüle etmelidir (Bai vd. 2020: 2).

3.3.1. Yapay zekâ (Artificial intelligence)

Yapay Zekâ, 1950’li yıllardan beri var olan bir bilgisayar bilimi alanıdır. Sezgisel ve olasılıksal yaklaşımları kullanarak bilgisayar bilimcileri tarafından düşünülen zorlu problemleri ele almak için kullanılmıştır (Narayan, Keedwell ve Olsson, 2002: 2). Yapay Zekâ’nın uygun tanımı tartışmalıdır. İngiliz matematikçi Alan Turing, bir bilgisayarın zekâsını Turing testi ile özdeşleştirmiştir. Eğer bir bilgisayar başarılı bir şekilde bir insanı taklit edebilir veya başka insanları kandırabilirse, yapay zekâyâ sahip olduğu fikrini öne sürmüştür (Hanson ve Marshall, 2001: 427). Yapay Zekâ (Artificial Intelligence), problem çözme ve öğrenme gibi insan zekasını taklit eden makine eylemlerini ifade etmektedir. Bu teknoloji, makinelerin ve sistemlerin karar vermesini ve insan gibi davranmasını sağlamaktadır (Misawa, 2018: 5).

Makinelerin düşünmesini, öğrenmesini ve karar vermesini sağlayan Endüstri 4.0’ın ana bileşenlerinden biri olan Yapay Zekâ (Artificial Intelligence), otomatik akıl yürütme, bilgi temsili, makine öğrenimi, bilgisayarla görme, robotik ve doğal dil işleme dâhil altı ana disiplinle birlikte insanca düşünen bir sistemdir. İnsanlar var olduklarından beri yeteneklerini ve gücünü geliştirmeye çalışmaktadır. Bu teknolojiler, gelişmiş araştırmalar için güvenilir ekipmanları sağlamaktadır (Pham, 2019: 4).

Yapay Zekâ terimi, basit programlardan daha çok karmaşık görevleri yapabilen bilgisayar sistemlerine ve programlarına denilmiştir. Yapay zekâ; uzman sistemler, yapay sinir ağları, genetik algoritma, bulanık mantık ve ikiden fazla birleşimi olan hibrit sistemler gibi birçok daldan oluşmaktadır (Mellit, 2009: 407).

Yapay Zekânın üretim süreci boyunca iş yükünü hafifleten, hızlı çözümler elde eden ve kontrol sağlamak gibi birçok konuda verimliliği arttırıcı özelliği bulunan bilgisayar programıdır. Ürünleri inceleyen, toplayan veya sınıflandıran çalışanlar, sürekli olarak farklı nesneleri tanımalı ve bunları doğru şekilde kategorilere ayırmalıdır. Bu zihinsel olarak yorucu ve yanlış seçilmiş ve yerleştirilmiş ürünlerle sonuçlanabilmektedir. Görüntüleri veya nesneleri tanıyan Yapay Zekâ, çalışanların sınıflandırma becerilerini arttırabilir veya alternatif olarak robotların bu tür örüntü tanıma görevlerini otomatikleştirmesini sağlayabilmektedir (Hamet ve Tremblay, 2017: 37).

3.3.2. Nesnelerin interneti (Internet of things)

IoT teknolojisi, dünya çapındaki nesnelerin internet aracılığıyla belirli bir protokole bağlı kalarak etkileşim içinde olması anlamına gelmiştir. Etkileşim kurabilen birbirine bağlı cihazlar, nesneler ve insanlardan oluşan bir sistemdir. Ayrıca IoT, otomasyonu geliştiren, insan ara yüzünü azaltan ve cihazlar arasında yüksek hızlı etkileşimi sağlamıştır (Patel vd. 2016: 6122).

Radio frekans tanımlama (RFID) sensörleri ve akıllı telefonlar gibi nesneleri de içermektedir. Radio frekans tanımlama sensörleri depolama, süreç ve analiz bilgilerini göndererek ve akıllı telefonlar akıllı bileşenlerle birleşecek birbirleriyle etkileşime girmektedir (Roblek, Mesko ve Krapez, 2016: 5).

IoT teknolojisi, birlikte çalışabilen mevcut ve gelişmekte olan bilgi ve iletişim teknolojilerine dayalı sanal ve fiziksel nesneleri birbirine bağlayarak gelişmekte olan hizmetleri etkinleştiren bilgi toplumu için küresel bir altyapıyı oluşturmaktadır (Kerin ve Pham, 2019: 2).

Fiziksel nesnelerin (sensörler, makineler, arabalar, binalar ve diğer eşyalar) bilgi ağı, bu nesnelerin etkileşimine ve iş birliğine izin vererek, verilerin toplanmasını ve değiş-tokuşunu sağlamaktadır (Madakam, Ramaswamy ve Tripathi, 2015: 165).

IoT, bilgisayar ağları ve hızlandırılmış kablosuz ağlarla bağlantılar kullanarak fiziksel nesnelerden bilgi toplama olarak tanımlanmıştır. Ürünlerden, makinelerden ve üretim hatlarından elde edilen bilgileri, analiz ve değiş tokuş etmek için önemli miktarda istatistiksel verileri oluşturmaktadır (Dilberoğlu, 2017: 546).

3.3.3. Bulut bilişim (Cloud computing)

Bulut Bilişim, yüksek performans sağlayan ve düşük maliyet sunan bir bilgi işlem teknolojisidir. Büyük miktarda veri, bir bulut işlem merkezinde depolanmak ve hesaplanmak için yüklenmektedir. Bu teknoloji, uzaktan erişim yoluyla kolayca kurtarılabilen bir internet servis sağlayıcısında veri saklama kapasitesine sahiptir. Ayrıca sanallaştırma teknolojisi, kaynak paylaşımı, dinamik tahsis, esnek uzatma ve sayısız diğer avantajlara sahiptir (Frank, Dalenogare ve Ayala, 2019: 19).

Bulut Bilişim, yapılandırılabilir bilgi işlem kaynaklarının (ağlar, sunucular, depolama, uygulamalar ve hizmetler) paylaşılan ortak havuza erişim sağlaması olarak tanımlanmaktadır. Herhangi bir kurulum gerektirmeden, sanal bir sunucuda tüm veriler, uygulamalar ve programlar için çevrimiçi depolama hizmetleri sağlayan sistemdir. Bulut Bilişim veri depolama, sunucular ve yazılım gibi internet tabanlı kurumsal hizmetler ve uygulamalardır. Fiziksel bir ağ ve sunuculardan gelişmiş bulut tabanlı altyapıya geçmek isteyen şirketler için ortaya çıkan bir teknolojidir. Bulut Bilişim, bilgi teknolojilerinin yazılım ve donanım kaynaklarının internet üzerinden paylaşılmasına olanak tanımaktadır. Böylece bilgi, çeşitli aktörler tarafından uzaktan erişilebilmekte ve kolayca depolanabilmektedir (Bhardwaj, 2020: 2474).

3.3.4. Simülasyon (Simulation)

Simülasyon, sistemin davranışlarını açıklama ve analiz etmek için gerçek ve varsayımsal bir sistem modelinin tasarlanmasıdır. Bu tanımın temel bileşenleri; modelleme (bir model oluşturma süreci), model (bir sistemin soyut ve basitleştirilmiş temsili), sistem (analiz edilen süreç), süreç (birbiriyle ilişkili öğelerin bir koleksiyonu) ve simülasyon (bir modelin zaman içerisinde çalışması)dur. Simülasyon, gerekli bir problem-çözüm metodolojisi ve karmaşık üretim sistemlerin analizi için birincil bir teknolojidir. Simülasyon kullanmanın bir nedeni, bir fiziksel modelin inşa edilmesi veya gerçek dünyada süreç davranışlarını gözlemlemek yüksek maliyetlere neden olmaktadır. Simülasyon yaklaşımını kullanmanın gerçek sistemi bozmadan ucuz ve hızlı testler yapmak (risksiz ortam), belirli bir gözlem için zamanı dikkatli kullanmak ve modelleri doğrulama veya iletişimi

kolaylaştırmak için animasyon kullanımı (dinamik sistemlerin görselleştirilmesi) gibi avantajları içermektedir (Ferreire, 2020: 6)

Simülasyon, karar vermeyi optimize etmek için planlama ve keşif modelleri geliştiren karmaşık ve akıllı üretim sistemlerinin tasarımı için bir anahtar teknolojidir. Ayrıca Simülasyon riskleri, maliyetleri, uygulama engelleri ve operasyonel performansı gibi kritik alanları değerlendirerek şirketlere yardımcı olabilmektedir. Başka bir ifadeyle, bir ürün veya sürecin görsel temsilini sağlayarak ve sanal bir ortamda farklı koşulların etkilerini gösteren son derece faydalı bir amaca hizmet etmektedir. Bu işlem, süreç akışı özelliklerini optimize ederek ve farklı matematiksel modellere dayalı gelecek durumları varsayarak maliyetleri minimize etmektedir. Bu şekilde yatırım etkilerini değerlendirmek, üretimi planlama, optimizasyon ve çizelgeleme, tesis dizaynı, üretim kapasitesi planlaması, darboğaz analizi ve kaynak tahsisi gibi yaygın üretim zorluklarını çözmeye yardımcı olmaktadır (Butt, 2020: 4)

3.3.5. Büyük veri analitiği (Big data analysis)

Büyük Veri Analitiği, birden fazla özerk kaynaktan oluşturulan karmaşık, büyük ve çeşitli bir veri kümesidir. Veri bilimcileri, kullanacak oldukları bu karmaşık verileri dönüştürmek için belirli yöntemler kullanırlar. Verilerin yüksek hacim ve hızlarda öngörülerini raporlamak, elde etmek ve filtrelemek için birçok teknolojileri kullanarak büyük ölçüde verileri toplamak ve analiz etmektedir. Bu teknoloji, yanıt süresini önemli ölçüde azaltan öngörücü bakım anlamına gelmektedir (Javaid vd. 2022: 203).

Büyük Veri Analitiği, literatürde hacim, çeşitlilik, hız, doğruluk ve değer gibi kavramlarla karakterize edilmiştir. Büyük Veri Analitiği, büyük miktarda veriden bilgi çıkarımına dayanmaktadır. Veri analizi büyük verilerin gerçek değerini gösterdiği için doğruluk ve değer özellikleri bulunmaktadır (Lee, Kao ve Yang, 2014: 4).

Endüstri 4.0 kapsamında, büyük miktarda veriler üretim ekipmanı ve sistemleri, tedarik zincir aktörleri ve müşteri yönetim sistemleri gibi birçok farklı kaynaktan gelmektedir. Büyük Veri Analitiği, büyük veri setlerini analiz etmeye izin veren ve gerçek zamanlı karar vermeyi destekleyen teknolojik çözümleri içermektedir (Ardito vd. 2018: 6)

3.3.6. Katmanlı üretim (Additive manufacturing)

3D baskı olarak da bilinen katmanlı üretim, bir nesneyi oluşturmak için bilgisayar kontrolü altında malzemeleri katmanlı şekilde ekleyerek nesneleri üç boyutlu hale getirme işlemine denilmektedir. Başka bir tanımla, Katmanlı Üretim, bilgisayar kontrolü altında kademe kademe üç boyutlu nesneleri geliştirmek için bir dizi teknolojileri yansıtmaktadır. Bu alanda en temsili teknoloji 3D baskılardır

(https://tr.wikipedia.org/wiki/%C3%9C%C3%A7_boyutlu_bask%C4%B1).

Bu yöntem, eksiltmeli üretim yöntemlerinin aksine malzemelerin katman katman birleştirilmesi işlemidir. Katmanlı üretim, yakın gelecekteki bazı mevcut engelleri aşmayı sağlayan bu yeni çağa olması beklenen muhtemel gelişmeler için büyük bir potansiyel teknoloji olmaktadır. Katmanlı üretimin sunmuş olduğu kalite, esneklik, hız ve az maliyet gibi avantajlar operasyon stratejilerinde temel değişikliklere yol açmaktadır. Az sayıda fabrikaları bir araya getirerek sınırlı ürün çeşitliliğini sağlayan seri üretim yerine, dağınık haldeki birçok fabrikayı bir araya getirerek düşük hacimli üretim sağlayan bu teknoloji giderek daha çekici hale gelmektedir (Butt vd. 2019: 1).

Bir katmanlı üretim makinesi, üretim talimatı verilen şekle kayıtsızdır ve bu nedenle geometrileri farklı olan nesnelerin üretimi arasında geçiş yaparken yeni bir kurulum gerektirmez. Alan kısıtlamalarına tabi olarak bazı katmanlı üretim makineleri aynı anda farklı nesneler üretebilmektedir. Bu nedenle, katmanlı üretim teknolojileri doğası gereği esnektir ve teorik sınırları içinde çeşitli üretim ekonomilerini ortadan kaldırmaktadır (Olsen ve Tomlin, 2020: 114).

3.3.7. Siber güvenlik (Cyber security)

Paylaşılan Bilgi Teknolojilerinin kullanımı ve bağlantı kurulabilirlik gibi nedenlerden dolayı bilgileri koruma ihtiyacı çarpıcı biçimde artmaktadır. Böylece siber güvenlik tehditlerinden kaçınan ve güvenilir iletişim sağlayan teknolojiler gerekmektedir (Thakur, 2015: 307).

İnternet üzerinden bir organizasyonun içine ve dışına muazzam veri setlerinin akışının olması, siber güvenliği Endüstri 4.0'ın önemli bir unsuru haline getirmektedir. Siber Güvenlik teknolojisi, siber tehditlerden önemli endüstriyel alanları, üretim hatlarını ve

birbirine bağılı sistemleri korumak için büyüyen bir talep haline gelmektedir. Veriler, bireysel verilerden üretim planlarına ve yeni ürün dizaynından gelecekteki girişimlere kadar kapsayan farklı türlerde olabilmektedir (Butt, 2020: 6).

Firmaların veri tabanlarından bireysel verilerin ihlali oldukça yaygındır. Bu nedenle Siber Güvenlik bazı sektörler için verileri yanlış kişiler tarafından kullanımını ve yapılan işlerin aksamasını engellemek için kritik öneme sahiptir. Bu nedenle tüm dünyada Genel Veri Koruma Yönetmeliği (GDPR) ve Birleşik Krallık Veri Koruma Yasası gibi veri koruma kanunu düzenlemeleri bulunmaktadır. Ayrıca bir kullanıcı, firmalara güven aşlamak için siber güvenlik protokol standardizasyona ihtiyaç duymaktadır. En yaygın olanı ISO/IEC 27001, 27002 ve ayrıca Uluslararası Elektroteknik Komisyonu ve Standardizasyonu için Uluslararası Organizasyonu tarafından yayınlanan ISO/27000'dir (<https://www.iso.org/isoiec-27001-information-security.html>).

3.3.8. Artırılmış gerçeklik (Augmented reality)

Gerçek dünyada (fiziksel ortamda) zenginleştirilmiş nesnelerin sanal ortamda bilgisayar tarafından oluşturulan varlığıdır. Bu teknoloji, dijital bilgi katmanları aracılığıyla fiziksel dünya deneyimini genişletmiştir (Pelargos vd. 2017: 2).

Fiziksel dünyanın sanal ortamını oluşturarak görsel ve verilerle geliştirdiği Artırılmış Gerçeklik teknolojisi sadece eğlence sektöründe değil endüstriyel alanlarda da uygulanmıştır. Sistemde, herhangi bir hata oluştuğunda operatöre haber vermekte veya bir sonraki adıma yönlendirmektedir (Oslen ve Tomlin, 2020: 120)

Bu teknoloji ilk kez oyun endüstrisinde uygulanmıştır. Şimdi ise, eğitim ve yüksek riskli endüstriler gibi birçok sektörde uygulanmaktadır. Bu teknoloji ile bireyler fiziksel müdahalede bulunmadan sanal ortamda tehlikeli operasyonların izlenmesi ve kontrol edilmesini sağlamıştır. Ayrıca pahalı ve hassas ekipmanlı eğitimlerde bu teknoloji kullanımıyla gider maliyetine katkı sağlamıştır (Luck, Gosling ve Saour, 2021: 129).

3.3.9. Otonom robotlar (Autonomous robots)

İmalatta endüstriyel robotlara olan talep daha düşük kusur oranı, daha yüksek kalite, gelişmiş güvenilirlik, daha az atık ve daha iyi taban alanı kullanımı gibi avantajlarından dolayı son yıllarda kullanım oranı artmıştır (El Zaatri, 2019: 162).

Robotlar, otomasyonun neden olduğu yeni alanlarda geleneksel makineler ile uzman kişiler arasındaki boşlukları doldurmak için tasarlanmıştır. Robotların bilgiyi iletmek ve analiz etmek için ek kapasiteyle insan gibi çalışması amaçlanmıştır. Uluslararası Robotik Federasyonuna göre dört tür işbirlikçi üretim uygulamaları bulunmaktadır. Bunlar; birlikte işbirlikçi üretim (robot ve insan birlikte çalışırlar), sıralı işbirlikçi üretim (insan ve robot bir parça üzerinde farklı zamanlarda çalışırlar), eş zamanlı işbirlikçi üretim (bir parça ve makine üzerinde aynı anda çalışan insan ve robotlar) ve duyarlı işbirlikçi (robot, insan hareketlerine gerçek zamanlı olarak yanıt vermesi) üretimdir (Esmaeilian, Behdad ve Wang, 2016: 82).

3.3.10. Siber-Fiziksel sistem (Cyber-Physical systems)

Siber-Fiziksel Sistem teknolojisi, fiziksel süreçleri algılamak, kontrol etmek ve izlemek için kurulan entegre bir hesaplama ve bilgisayar sistemidir. Bir bilgi işlem ve iletişim sistemi tarafından operasyonlar izlenmekte, koordine, kontrol ve entegre edilmektedir (Hopkins, 2021: 4). Bu sistemin amacı, insan etkileşimini en aza indirmek ve sistemi özerk olarak çalıştırmaktır. Siber- Fiziksel Sistem, fiziksel dünya ile etkileşim halinde olan ve sensörler, aktüatörler, kontrol işlem birimleri ve iletişim cihazları gibi bir dizi ağlarla bağlantılı birimlerden oluşmaktadır (Barreto, 2017: 1247)

Gelişen bir teknoloji olan Siber-Fiziksel Sistem (CPS), mevcut birçok endüstriyel sistemlerin rolünü ve operasyonunu dönüştürmek için umut verici çözümler sunması beklenmiştir. Asıl amacı, bir sanal kopyası oluşturarak fiziksel sistemleri izlemektir. CPS'nin tanıtılmasıyla makinelerin birbiriyle iletişim kurabilmiş ve merkezi olmayan kontrol sistemleri üretimi optimize etmiştir. CPS'leri bir başka yönden üretim tesisleri, depolama sistemleri ve makineleri bir araya getiren firmalar için fiziksel ve dijital dünyanın yakınsaması olarak küresel ağları kurmuştur. CPS, bilgi ve materyalleri birleştirdiği için ademi merkezilik ve özerklik gibi bileşenler genel endüstriyel performansı geliştirmede önemli rol oynamıştır. CPS, verimliliği artırmak, büyümeyi teşvik etmek, işgücü

performansını değiştirmek ve daha dūřuk maliyetle daha kaliteli mal üretmek gibi özellikler bu teknolojinin kullanım alanlarını genişletmiştir. (Xu, Xu ve Li, 2018: 2943).

3.3.11. Yatay ve Dikey entegrasyon

Yatay ve Dikey Entegrasyon, kusursuz bilgi paylaşımı için organizasyonel stratejilerini geliştirmeyi ve otomatikleştirilmiş tedarik ve değer zinciri için temel oluşturmayı amaçlamıştır. Yatay Entegrasyon, tüm değer ve tedarik zinciri genelinde veri alışverişine ve birbirine bağlı bilgi sistemlerine odaklanan dijitalleşme olarak ifade edilmiştir. Bu şekilde bilgi teknoloji sistemlerinin kablosuz entegrasyonuna ve üretim boyunca bilgi akışlarına ve malzeme tedarikçilerinden distribütör ve müşterilere kadar geniş kapsamlı iş planlama prosedürlerine izin vermiştir. Yatay Entegrasyon, yatay koordinasyonlu iş birliği, maliyet tasarrufu, değer oluşturma, bilgiye dayalı yatay ekosistemler oluşturma gibi imkanlar sunmuştur (Liao vd. 2017: 3621)

Diğer taraftan Dikey Entegrasyon, çeşitli hiyerarşik üretim ve imalat seviyelerine Bilgi Teknolojilerini entegre ederek ayrıntılı çözüm elde etmektedir. Alan, kontrol, kalite yönetimi ve üretim planlama gibi hiyerarşik seviyeleri kapsamaktadır. Bu iki entegrasyonun birleşimi kuruluşlara dijitalleştirilmiş geleceğin anahtarını sunmuştur (Shafiq vd. 2015: 1154).

3.4. Endüstri 4.0 Temel Yapısı

Endüstri 4.0 kavramının anlaşılabilirliğini kolaylaştırmak için bilim insanları bu fenomenin altında yatan tasarım ilkelerini ve teknoloji trendlerini temel alarak tanımlamaya çalışmışlardır. Tasarım ilkeleri, Endüstri 4.0 bileşenlerini tanımlayan ve bir bilgi sistemi sağlayarak Endüstri 4.0'ın belirsizliği konusunu açıkça ele alan talimatlar olarak ifade edilmiştir. Ayrıca bu tasarım ilkeleri, Endüstri 4.0'a uyum sürecini tahmin etme ve Endüstri 4.0'a geçiş için gerekli çözümleri ve gelişmiş uygun prosedürleri nasıl yapacağı hakkında üreticilere bilgi vermektedir (Ghobakloo, 2019: 3).

Endüstri 4.0 kavramı, tasarım ilkeleri ve teknoloji trendleri olmak üzere iki yapı taşından oluşmakta ve dijital dönüşümün bir referans mimarisi olarak tanımlamaktadır.

Endüstri 4.0'ın tasarım ilkeleri, dijital endüstriyel dönüşümün benzersiz avantajlarını sunmasını sağlayan gerekli koşulların bir toplamıdır (Culot vd. 2020: 6).

Bu tasarım ilkeleri, üreticilerin Endüstri 4.0'a geçiş için gerekli olan uygun prosedürü ve sorunlara karşı çözümler geliştirmede onlara "nasıl yapılır" bilgisi vermektedir (Ghobakhloo, 2018: 922).

Endüstri 4.0 senaryolarını belirleme ve uygulama konusunda firmaları destekleyebilecek tasarım ilkeleri şunlardır.

3.4.1. Birlikte çalışabilirlik (Interoperability)

Bir işletmedeki sistemler ile işgücünün birbirleriyle iletişim kurması anlamına gelmektedir. Birlikte çalışabilirlik, Endüstri 4.0'ın etkin hale getiren çok önemli dizayn prensibidir. Siber- Fiziksel Sistemler (CPS) ve insanlar, IoT üzerinden birbirine bağlanmaktadır (Hermann, Otto ve Pentek, 2016: 11).

Birlikte çalışabilirlik, iki sistemin birbirleriyle iletişim kurması, anlaması ve birbirlerinin işlevlerini kullanabilme yeteneği olarak ifade edilmektedir. Çeşitli teknolojilerin, bileşenlerin ve etkenlerin endüstriyel sınırlar dâhilinde sorunsuz entegrasyonunu sağlamıştır. Birlikte çalışabilirlik, Endüstri 4.0'ın temel avantajlarından biridir. Çünkü birlikte çalışabilirlik çeşitlendirilmiş otonom prosedürü boyunca ürünler, makineler ve insanlar arasında bağlantı ve iletişim sağlamıştır. Birlikte çalışabilirlik, operasyonel, sistematik, teknik ve anlamsal olmak üzere dört seviyede sonuca varmıştır. Operasyonel seviyede, sistem içinde ilişkiler, mimariler, diller, standartlar ve kavramlar olarak belirtilmiştir. Sistematik seviyede, metodolojiler, standartlar ve modeller olarak tanımlanmıştır. Teknik seviyede, teknik gelişmeler için çeşitli araçlar, platformlar ve altyapılar olarak kabul edilmiştir. Son olarak anlamsal seviyede, değişen bilgilerin farklı gruplar arasında kolay anlaşılması olarak tanımlanmıştır. Birlikte çalışabilirlik bir üretim sistemi içerisinde güvenilir bir ortam oluşturmaktadır. Bu ortamlarda bilgiler doğru ve hızlı bir şekilde ortaklar arasında paylaşılmıştır. Bunun sonucunda, daha yüksek üretkenlikle, daha yüksek maliyet tasarrufu sağlanmaktadır (Lu, 2017: 5).

Birlikte çalışabilirlik prensibi, veri paylaşmak ve iletişim kurmak için insanların, ekipmanların, cihazların ve diğer nesnelerin yeteneğiyle ilişkilendirilmektedir. Yeni

teknolojilerin uygulanması, uygun bir bilgi alışveriş sistemi olmadan pek mümkün gözükmemektedir. Bu nedenle birlikte çalışabilirlik insan ve insan, makineler ve insan, makineler ve makineler arasında sistematik bir iletişim sağlayarak bu ihtiyacı karşılamaktadır. Ayrıca birlikte çalışabilirlik, Nesnelerin İnterneti (IoT), İnsanların İnterneti (IoP), Her şeyin İnterneti (IoE) gibi farklı araçlar yoluyla da sağlanabilmiştir (Dikhanbayeva vd. 2020: 5)

3.4.2. Sanallaştırma (Virtualization)

Birden çok fiziksel kaynaktan bir sanal kaynak ya da bir fiziksel kaynaktan birden çok sanal kaynak oluşturulması ve bu sanal kaynaklardan fiziksel süreçlerin izlenmesi anlamına gelmektedir. Böylece bir fiziksel dünyanın bir sanal eşleniği veya kopyası oluşturulması işlemine denilmiştir. Sanal veriler, gerçek zamanda ekipmanların durumunu izleme, ‘ya olsaydı’ senaryosunu gerçekleştirmiş ve sistemlerdeki sıkıntıları belirleme imkânıyla karar vericilerin algısını zenginleştirmiştir. Dijital veri sensörleri Arttırılmış (AR) ve Sanal gerçeklik (VR) gibi etkinleştiricilerle elde edilmektedir. Böylelikle veri toplama ve onu yönetme maliyeti azaltılmış ve üçüncü kişi aracı ve uygulamalardan kaçınılmıştır (Nee ve Ong: 2013: 16).

Sanallaştırma sayesinde herhangi bir arıza durumunda yetkili kişiler önceden haberdar olabilmektedir. Bu sayede, çalışanlar artan teknik karmaşıklığın çözümlenmesinde sistem tarafından desteklenmiştir. Kısaca, fiziksel dünyanın sanal bir kopyası, sanal tesislerin ve simülasyon modellerin Siber-Fiziksel Sistemlerin bağlanmasıyla oluşmuştur. Bu şekilde, Siber-Fiziksel Sistemler fiziksel süreçleri izleyerek çalışanları bilgilendirmiştir (Sultanova, 2022: 16).

Endüstri 4.0’ın sanallaştırma ilkesi, üretim operasyonlarının optimizasyonu ve tahmini için önemli katkılar sağlamaktadır. Fiziksel ürünlerin gerçek kullanımını simüle etmek için yeni ürünlerin dijital ikizini kullanabilirler veya yaşam döngüleri boyunca ürünlerin dijital ayak izlerini değerlendirebilirler. (Tao vd. 2018: 8).

Sanallaştırma, süreçleri izlemek ve makineler arası iletişimi sağlamak için kullanılmaktadır. Cihazların fiziksel süreci izleme yeteneğine sahip olması, fiziksel nesnenin sanal kopyasını oluşturmakta kolaylık sağlamaktadır. Her bir cihazın sanallaştırılması,

kurulacak olan tesis modelinin temel bir parçası haline gelmiştir. Sanal modeller, daha önce izlenmiş olan çeşitli verileri baz alarak birçok senaryo geliştirmektedir. Böylece potansiyel riskler ve arızalar, sanal modellerde tespit edilerek operatörlere bilgi verilmektedir. Operatörler firmanın çıkarları doğrultusunda önleyici tedbirler alarak gerçek hata oranını azaltmaktadır (Brettel vd. 2014: 40).

3.4.3. Yerelleştirme (Decentralization):

Bireysel ürünlere yönelik taleplerin artması, sistemlerin merkez tarafından kontrol etmesini giderek zorlaştırmaktadır. Gömülü bilgisayarların, kendi kararlarını kendisi verebilmesi için Siber-Fiziksel Sistemler etkinleştirilmiştir. Siber-Fiziksel Sistemler (CPS) otonom olarak karar alabilir ve eylemleri gerçekleştirebilir. CPS, IoT, Akıllı aktüatörler ve sensörler, Yapay Zekâ gibi bilgi paylaşabilen, iletişim kurabilen ve tüm üretimi kontrol edebilen teknolojiler yerleşmeyi desteklemektedir. Böylece sistemler tüm küçük değişikliklere karşı duyarlı olmuş, sabit planların daha kolay ve daha esnek bir şekilde yeniden düzenlenmesine izin vermiş ve potansiyel çözümler sunabilmiştir. Kalite güvencesi ve izlenebilirlik açısından istenilen bir zamanda tüm sistemi takip etmek önemli olmuştur (Efe, 2021: 131).

Ademi merkeziyetçiliğin başka bir tanımına göre riskleri azaltarak üretken olabilen ve operasyonların esnekliğini sağlayabilen merkezi bir sistemden ziyade karar alma yetkisini sistem bileşenlerine geçmesi olarak ifade edilmiştir. Her sistem modülü özerktir (ortak hedefleri yürütmek ve organizasyonel uyum sağlamak için diğer benzer modüller birlikte çalışırken) ve gerçek zamanlı kararlar vermiştir (Mohammed, 2018: 259).

Başka bir ifadeyle Ademi merkeziyetçilik, üretimde bir fiil aktif halde bulunan operasyon personellerinin ve hatta makinelerin merkezi karar alma mekanizmasına bağlı kalmak yerine bağımsız karar alma yetkisinin olması olarak ifade edilmiştir. Operasyon personelinin veya cihazların bireysel kontrol ve bağımsız karar verme yeteneği sağlayan gömülü bilgisayarların kullanımıyla ademi merkeziyetçilik başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Özelleştirme ve ürün çeşitliliğini geliştirme, esnek üretim hattının yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır. Gömülü kontrol sistemi, her bir cihazın veya cihaz

birimlerinin bağımsız karar alma yetkisi vermekte ve böylece daha fazla esnek ve etkin karar vermeyi sağlamaktadır (Marques vd. 2017: 303).

3.4.4. Gerçek Zamanlı yetenek (Real-Time capability)

Gerçek zamanlı yetenek, verilerin gerçek zamanlı olarak toplanması ve analiz edilmesi anlamına gelmektedir. Bu da sistemin bilinçli ve zamanında karar vermesini sağlamaktadır. Bu şekilde sistem, herhangi bir makine arızası durumunda hemen tepki verebilmekte ve ürünleri başka bir istasyona yönlendirebilmektedir (Hermann, Otto ve Pertek, 2016: 12).

Gerçek zamanlı yetenek, veri toplama ve analizin aciliyetine ve gerçek zamanlı veri iletimine atıfta bulunmaktadır. Akıllı fabrikalar, gerçek zamanlı veri izleme ve analizi etme, hataları zamanında tespit etme ve yeni talepleri karşılayabilme şekilde dizayn edilmelidir. Gerçek zamanlı veri toplama, büyük veri teknolojilerine dayanmaktadır. Makineler, ekipmanlar ve ürünlerle ilgili büyük miktarda veriler fabrikalardan; müşterilerle ilgili veriler sosyal medya veya piyasalar gibi çoklu kaynaklardan toplanmaktadır. İvedilikli karar verme yöntemiyle gerçek zamanlı yetenek, Endüstri 4.0'ı uygulayan şirketlerin karlılığına büyük etkisi bulunmaktadır. Ayrıca gerçek zamanlı bilgileri ve verileri alarak, analiz ederek ve paylaşarak içsel ve dışsal uyaranlara karşı en iyi tepki süresiyle müdahale edilmektedir (Gabriela Pereira Carvalho ve Walmir Cazarini, 2020: 6).

Gerçek zamanlı yetenek, Endüstri 4.0'ın yanıt verme, güvenilirlik ve hata tolerans yapılarını kullanabilme, sürdürebilme ve işlevsel güvenliği gibi faktörlerde tercih edilmektedir. Bu faktörler, optimize edilmiş üretim süreçlerini kolaylaştırırken, artan esneklikle bu sistemlerin sürdürebilirliğini sağlamaktadır (Habib ve Chimsom, 2019: 5)

Gerçek zamanlı yetenek, hızlı veri toplayabilen, analiz edebilen, izleyebilen ve paylaşabilen bir yetenek anlamına gelmektedir. Gerçek zamanlı veri işleme ve analiz, karar almayı hızlandırabilir, üretim prosesini izlemeye yardımcı olabilir, anormal durumları belirleyebilir, optimizasyon fırsatlarını belirleyebilir ve hatta mikro trendleri gözlemleyebilmektedir. Tarayıcılar, robotlar, Radyo Frekansları Tanımlama (RFID) ve IoT'ye bağlı diğer cihazlar gerçek zamanlı verileri toplayabilen teknolojiler arasındadır. Genel olarak bu yaklaşım, gerekli bakımları, optimize eden süreçleri, artan üretkenliği hatta

başarısızlıkları tahmin edebilme gibi özellikleri bulunmaktadır (Habib ve Chimsom, 2019: 5).

3.4.5. Hizmet oryantasyonu (Service orientation)

Günümüzde yeni iş stratejileri, sadece ürünleri sunmak yerine müşterilerin üreticilerle ilgili sorunlarına karşı yeni ve tam bir çözüm sunmayı amaçlamıştır. Bu nedenle işletmeler hem ürünlere hem de hizmet oryantasyonuna odaklanması gerekmektedir. Başka bir deyişle, şirketlerin CPS bağlantısıyla sunduğu hizmetleri diğer şirketlere, insanlara ve hatta sistemlere faydalı olan yeni bir hizmet türü oluşturmuştur (Dikhanbayeva vd. 2020: 5).

İşletmeler, ürünlerinden müşterilere ve seri üretimden özel hizmetlere odaklarını değiştirerek farklılık gösteren müşteri ihtiyaçlarını hizmetlerine uyarlamıştır. Hizmet oryantasyonu, müşterilere hem ürünleri hem de hizmetleri satın almak için üretim organizasyonuna erişim için izin vermektedir. Ürün satan kuruluşlar entegre ürün-hizmet modeli aracılığıyla daha fazla kar elde etmek için hizmetlerini satabilmektedirler. Özellikler imalat sanayi, diğer sanayilere bir hizmet türü olan iş süreçlerini satabilecek bir pozisyonda olmuşlardır (Trappey vd. 2017: 595).

Hizmet Oryantasyonu, tahmine dayalı müşteri ihtiyaçlarını analiz eden büyük veri analitiği kullanma becerisine denilmektedir. Hizmet oryantasyonunda kullanıcılar ihtiyaçlarını internet hizmeti yoluyla karşılayabilen araçlara ihtiyaç duymuştur. Hizmet oryantasyonuyla, şirketler piyasa değişikliklerine karşı hızlı cevap verebilecek esnekliğe ve çevikliğe sahip olmuşlardır (Kamble, Guneseakaran ve Gawankar, 2018: 420).

3.4.6. Modülerlik (Modularity)

Modülerlik, işletmelerin değişen gereksinimlerine ve endüstri ihtiyaçlarına esnek bir şekilde uyum sağlama yeteneği olarak ifade edilmiştir. Modüler sistemler, değişen bireysel ihtiyaçlara uygun olarak üretim bileşenlerinin parçalanması ve farklı kombinasyonlarda tekrar birleştirilmesi özelliğine denilmiştir. Modüler sistemler, mevsimsel dalgalanmalara veya ürün özelliklerinin değişmesi durumunda üretim prosesini kolaylıkla ayarlayabilmesidir. Standartlaştırılmış yazılım ve donanım sistemlerinin aksine, yeni

modüler sistemler otomatik olarak tekrar tanımlanarak yeni iş süreçlerinde kullanılmıştır (Bauernhansl, 2014: 75).

Modülerlik, sistem bileşenlerinin verimli bir şekilde eklenerek ve kaldırarak üretim kapasitesini arttırmıştır. Bu özelliği dalgalı üretim siparişleri, özelleştirilmiş ürün geliştirme veya yeni teknolojileri dâhil etme gibi konuları ele alındığında oldukça faydalıdır. Sistem bileşenleri serbest bir şekilde bağlanmıştır ve tak-çalıştır ilkesiyle yeniden yapılandırılmaktadır. Bu tasarım özelliği, müşteri ihtiyaçlarına hızlı cevap vermek için sistemin gerekli modülleri hızla entegre etmesini sağlamakta ve modüllerin değiştirilebilirliği sayesinde sistem arızalarının üstesinden gelmektedir (Gupta, 2019: 158).

Modülerlik, bir cihaz veya cihaz bileşenlerin standartları takip ederek üretilmesini ele almaktadır. Modüler üretim sisteminde bu cihazlar müşteri ihtiyaçlarına göre adapte olabilir, değiştirilebilir ve genişletilebilir. Bu durumda modülerlik, sezonsal dalgalanmaları ve değişiklikleri ele alan, daha düşük maliyette ve kapasiteye uyum sağlayabilen akıllı fabrikaları ön plana çıkarmıştır (Kamble, Guneseckaran ve Gawankar, 2018: 420).

Modülerlik, işletmelerin iç ve dış ihtiyaçlarının neden olduğu farklı durumlara adapte olması ve değişebilmesi yeteneğidir. Modüler yapıya sahip işletmeler değişiklikleri uygulama ve benimseme süresinde tasarruf edebilmesine yardımcı olmuştur. Hatta hızlı ve etkili bir şekilde talep dalgalanmalarına cevap verebilmektedir. Ayrıca modüler yaklaşım üretim, ürün tasarımın ve hatta teslimat süreçlerin sürdürülebilirliğini olumlu şekilde etkileyebilir ve arttırabilir. Endüstriyel robotlar, eklemeli üretim, Arttırılmış Gerçeklik (AR) ve Sanal Gerçeklik (VR) gibi teknolojiler modüler sistemi geliştirebilir ve çeviklik ve esnekliğini arttırabilmiştir. Fakat müşterileri ve piyasa eğilimini analiz eden büyük veri, IoP ve simülasyon araçları tarafından desteklenen modüler sistem, şirketlerin diğer gelir kanallarıyla olan özelleştirme sürecini basitleştirmiştir (Ilankovic, 2020: 25)

3.4.7. Siber tehlike

Endüstri 4.0 ne kadar çığır açıcı bir yenilik olursa olsun siber güvenlik hususları konusunda büyük bir endişe bulunmuştur. Dünyanın her yerindeki endüstriler, eğer uygun dijital güvenlik önlemleri mevcut değilse olabilecek risklere fazlasıyla maruz kalmışlardır. Bunlara örnek olarak gösterilmek gerekirse, endüstriyel casusluk ve endüstriyel sabotaj gibi

konular hassas ve özel verilerin bulunduğu endüstriler için son derece ciddi konulardır. Başka bir örnek ise bilgisayar hackerları tarafından üretim süreçlerini kasıtlı olarak kesintiye uğratarak üretim tesislerine zarar vermişlerdir (Prinsloo, Sinha ve Solm, 2019:2).

Teknolojinin gelişmesi sonucunda yoğun veri kullanımı birbirine bağlı dijital ekosistemini arttırmıştır. Dijital verilerin mevcut olduğu her yerde siber saldırı tehdidi altındadır ve siber güvenlik önlemlerine ihtiyaç artmıştır. Endüstri 4.0'ın temel yapısının veri olması, siber saldırı riskinin artarak devam edeceğini göstermiştir.

Endüstri 4.0, sanal ve fiziksel dünya arasında iletişim ve koordinasyonu sağlayan akıllı üretim sistemlerini içeren yapılar bütünüdür. Bu akıllı üretim sistemleri hayatımızda ciddi kolaylıklar sağlarken aynı zamanda siber saldırılar gibi önemli riskleri ortaya çıkarmıştır. Tüm akıllı sistemler kendi kimlikleriyle kablolu veya kablosuz ağlarla birbirine bağlanmaktadır. Bu ağlara yapılacak siber saldırıların telafisi mümkün olmayan üretim arızalarına veya ciddi hasarlara neden olmaktadır (Süzen, 2020: 1).

3.4.8. Sistem içi arıza

Modern sanayinin ekonomik açıdan rekabetçi kalabilmesi için verimliliğini arttıracak ve üretim kaybının azaltacak önemli üretim hedefleri belirlemelidir. Bunun için etkin arıza yönetimine ve üretim hatlarındaki arızaların hızlı bir şekilde karşılanabilme ihtiyacı doğmuştur. Arızaların önceliklendirilmesi, arıza düzeltme sürecini hızlandırmakta ve önceki arıza tespiti ve sınıflandırılmasına bağlıdır. Üretim hatlarında makinelerin sağlık durumunu izlemek için sensörlerin artan kullanımı, büyük miktarda veriye ve yüksek karmaşıklığa yol açmıştır (Webert vd., 2022:1).

Akıllı fabrikalar, farklı teknoloji türlerini sekronize ederek bir araya getirilmesi sonucu oluşmuştur. Bu teknolojiler arasında çeşitli yazılımlar, gelişmiş işbirlikçi robotlar, modüler ve uyarlanabilir yapılar, veri aktarımı için yüksek hızlı sistemler bulunmaktadır. Tamamen akıllı bir sistem elde etmek için akıllı tedarik zincirlerine, akıllı bakım sistemine, akıllı iş gücüne vb. ihtiyacımız vardır. Bu tür bir sistem teknik açıdan çeşitli zorlukları beraberinde getirmektedir. Sistem içinde oluşabilecek engel tüm sistemin durdurma noktasına kadar gidebilmekte ve rekabet ortamında firmayı geri düşürmektedir. Ayrıca

sistemin birbiriyle etkileşim içerisinde olması en küçük bir arıza durumunda sistemi domino çapanıyla olumsuz etkilemiştir (Farsi, 2019: 24).

3.4.9. Teknoloji demodeliği

Endüstri 4.0 teknolojisinin hayatımıza girmesiyle birlikte mühendislik ürünlerinin tasarlanması ve üretimde yapıcı-teknolojik yaklaşımların gelişmesine neden olmuştur. İşletmelerde başarılı bir politika izlemesi için inovasyon stratejisi geliştirilmeli ve küreselleşme karşısında teknoloji alanında yeniliklerin hızla eskimesine karşı alternatif çözüm yöntemleri geliştirilmelidir (Güngör, 2018: 33)

İşletme içi yapılacak olan üretim dizaynı en iyi sonucu alacak ve optimum fayda sağlayacak şekilde düzenlenmelidir. Üretim çeşitliliğinin sağlanması için birçok üretim dizaynında neden-sonuç yapısı ve niceliksel gibi gözlemlerin istatistiksel analizi yapılmalıdır. Yeni ürün için teknolojik uygunluk hâkim olduğunda üretime başlanmalıdır. Üretimde kullanılacak olan teknolojiler, yaşanılacak olası inovasyonla işletme içi üretim dizaynının eskimesine ve rekabet piyasasında gerilemeye neden olmaktadır (Petrova vd. 2023: 181).

4. ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ

Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV), hem nicel hem de nitel faktörleri içeren karmaşık bir karar verme aracı olarak kabul edilmektedir. Son yıllarda ÇKKV teknikleri ve yaklaşımları optimal olası alternatifleri seçmek için geliştirilmiştir. Ayrıca ÇKKV, karar vericiler tarafından performans kriterlerinin öznel değerlendirilmesini desteklemek için hesaplama ve matematiksel araçlar tasarlayan yöneylem araştırmasının bir parçası olarak ifade edilmektedir (Zavadskas, Turkis ve Kildiene, 2014: 165).

1960'lerden beri ÇKKV, aktif bir araştırma alanı olmuş ve birçok teorik ve uygulamalı makaleler ve kitaplar üretilmiştir. ÇKKV yöntemleri, tercih edilen bir alternatifi belirlemek veya öznel bir tercih sıralamasında alternatifleri sıralamak için dizayn edilmiştir. ÇKKV, birden fazla çelişen kriterlerin olduğu durumlarda insanların tercihlerine göre karar vermelerine yardımcı olan tüm yöntemleri kapsayan genel bir terimdir. ÇKKV yöntemlerini kullanma, problemleri çözerek karmaşık problemlerle başa çıkmanın bir yolu olduğu da belirtilmiştir (Mardani vd. 2015: 517)

Başka bir ifadeyle karar vermek, tüm muhtemel seçenekler arasından en iyi alternatifi belirleme süreci olarak tanımlanmıştır. Karar vericiler sık sık çeşitli karar verme problemiyle karşılaştıkları için optimize edilmiş bir sonuca ulaşmak zor olabilmektedir. Bu sorunu çözmeye çalışan Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri, en önemli karar teorilerinden biridir (Huang, Chen ve Chang, 2015: 109).

Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinden biri olan AHP yöntemiyle karmaşık konuları daha hızlı ve yalın bir şekilde çözüm elde edilmektedir. VIKOR Yöntemi ise karar vericilerin fikir ayrılıklarını uzlaşarak ideal çözüme en yakını çözümü kabul etmektedir. COPRAS Yöntemi, tüm alanlarda kullanılabilir bir esnekliğe sahiptir. MOORA Yöntemi, alternatifler ile amaçlar arasını etkileyen tüm unsurları değerlendirmeye almaktadır. PROMETHEE II Yöntemi, analizin ilk aşamasında kullanılan ağırlık puanlarının değiştirilebilir olması, etkin sonuçlar vererek kullanımının kolay olması ve her bir değerlendirmede farklı fonksiyon tiplerinin kullanılması gibi belirgin özellikleri bulunmaktadır. Bu nedenle çalışmada bu 5 yöntem kullanılarak analiz yapılmış ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

4.1. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) Yöntemi

Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri arasında en yaygın olarak kullanılan AHP (Analytic Hierarchy Process) Yöntemi, Saaty (1980) tarafından çok kriterli ve karmaşık yapıları analiz ederek sağlıklı karar verebilmek için karar mekanizmasının çalıştırılmasını sağlayan geliştirilmiş bir yöntemdir (Darko vd. 2019: 437). Saaty, AHP Yöntemini planlama, önceliklendirme, alternatif kararlar, kaynak tahsisi, risk değerlendirme, sistem dizaynı, performans ölçme, sistem sürdürülebilirliği, optimizasyon, çatışma çözümü, karar ve politikalar gibi konularda kullanmak için tasarlamıştır (Wang vd. 2021: 5).

AHP Yöntemi kullanımı kolay, etkin, tarafsız ve güvenilir bir yöntem olduğu için birçok alanlarda kullanılmıştır (Igwe, Ikenna ve Onwuka, 2020: 5). Ayrıca karar verme sürecinde çeşitli değerlendirme faktörlerini (hem niteliksel hem de niceliksel) birbirleriyle entegre etme esnekliğine sahip olması yöntemin başlıca özelliğidir (Lyu vd. 2020: 2). AHP süreci, karara varabilmek için matematiksel ve mantıksal akıl yürütmeye dayanmıştır.

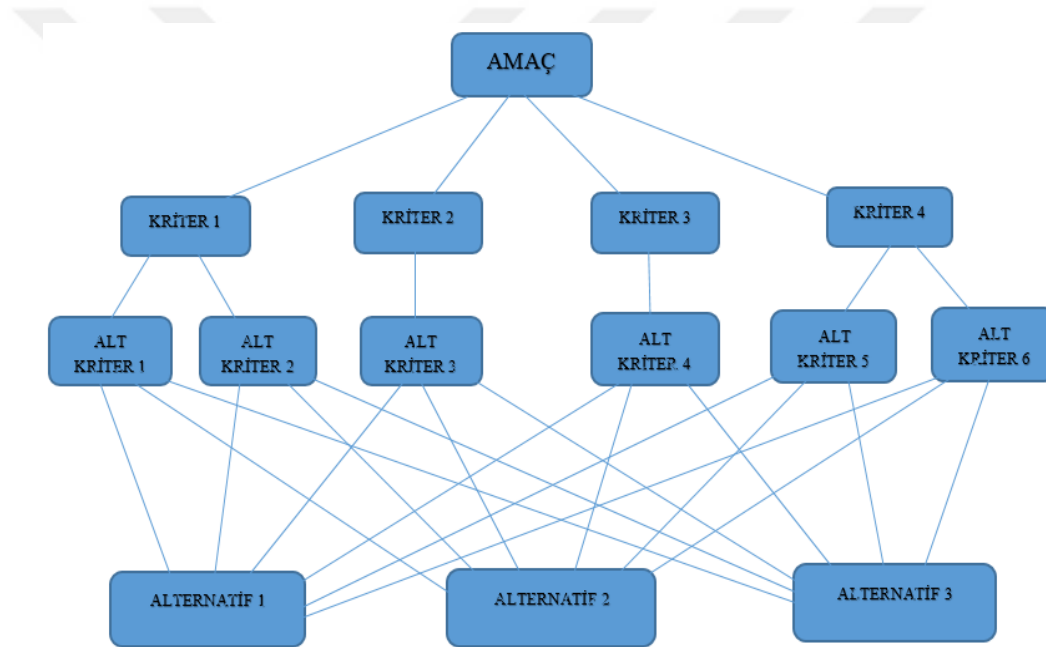
Çelişkili kriterlerin varlığında bile yöntemin tutarlılığı ölçülebilmekte ve kontrol edilebilmektedir (Deng ve Dong, 2019: 683).

AHP Yönteminin uygulama adımları aşağıda sıralanmıştır (Ahmadi vd. 2014: 205), (Aygün ve Sevim, 2024: 293), (Bostancı, Kabaş ve Aksoy, 2024: 192), (Düzdar ve Cengiz, 2024: 70), (Düzdar ve Kolçak, 2024: 1001)

1. Adım Problemin Tanımlanması ve Amacın Belirlenmesi

2. Adım Hiyerarşi Formatı Oluşturulması;

Bu adımda en üst seviyeden en alt seviyeye kadar olan hiyerarşik yapı oluşturulmuştur.



Şekil 4.1. AHP hiyerarşi yapısı (Kaynak: Ekin, 2022: 63)

AHP Yöntemi kullanılarak herhangi bir problemi birkaç alt probleme yani hiyerarşik seviyelerine göre ayrılabilir. Hiyerarşide her seviye bir kriter setini ve her alt problemle ilgili nitelikleri temsil eder. Her hiyerarşinin zirve noktası probleminin amacını, orta seviyeler stratejik ve operasyonel faktörleri ve son seviye genellikle amaca ulaşabilmek için düşünülmüş eylem veya alternatifleri temsil eder (Ekin, 2022: 63).

3. Adım İkili Karşılaştırma Analizi;

AHP yönteminde, en iyi alternatifi belirlemek ve ilgili kriterlere sahip mevcut alternatifleri karşılaştırmak için ikili karşılaştırma matrisi kullanılmıştır. Hiyerarşinin her seviyesindeki faktörlerin ikili kıyaslama yapılarak birbirleri karşısındaki değeri gösterilmiştir. Örneğin i değeri, j değerine hangi oranda dominant bir ölçüye sahip olduğu belirlenmiştir (Wang vd. 2022: 5).

İkili karşılaştırma matrisinde karar vericilerden Saaty'nın 9 puanlık dereceleme ölçeğini referans almalarını ve görüşlerini ifade etmeleri istenmiştir. Sonraki aşamada her bir karar vericinin oluşturduğu ikili karşılaştırma matrisi geometrik-logaritmik ortalama yöntemiyle tek bir matris haline getirilmiştir (Chin, Chiu ve Rao Tummala, 1999: 347).

Tablo 4.1. Saaty temel ölçeği (Kaynak: Chin, Chiu ve Rao Tummala, 1999: 347)

Önem Yoğunluğu	Tanımlama	Açıklama
1	Eşit Önem	İki faktör amaca eşit olarak katkıda bulunur
3	Biri diğeri üzerinde az öneme sahip	Deneyim ve yargı biri diğerine göre hafifçe tercih edilir
5	Gerekli ve güçlü önem	Deneyim ve yargı biri diğerine göre güçlü bir şekilde tercih edilir
7	Çok güçlü önem	Bir faktör kuvvetle tercih edilir ve hâkimiyeti pratikte gösterilir
9	Kesin önem	Bir faktörü diğerine tercih etme sebebi mümkün olan en yüksek doğrulama derecesine sahip olmasıdır
2,4,6,8	Ara değerler	Uzlaşma gerektiğinde kullanılır

A matrisi gerçek bir $n \times n$ matrisidir. n dikkate alınan değerlendirme kriterlerin sayısıdır. a_{ij} , i kriterinin j kriteri ile karşılaştırıldığında göreceli önemi karşılaştırma karar matrisinde (i,j) konumuna atanır. (j,i) otomatik olarak (i,j) konumuna atanan sayının tersi pozisyonuyla ilişkilendirilir ve a_{ij} karşılık değeri $1/a_{ij}$ olarak karşılaştırma matrisine yazılır. Aynı kriterlerin birbirleri üzerinde eşit önem düzeyine sahip olduğu için (i,i) konumu her zaman 1 kabul edilir.

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & 1 & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$A = [a_{ij}]_{n \times n} \quad i = 1 \dots n \quad j = 1 \dots n \quad a_{ij} \neq 0$$

4. Adım Normalize Edilmiş Karar Matrisi;

Matristeki her değer kendi sütunundaki değerler toplamına bölünerek normalize karar matrisi elde edilir. Normalize karar matrisinde her sütunun toplamı 1'e eşittir.

$$a'_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (4.2)$$

5. Adım Öncelik Vektörünün Hesaplanması:

Normalize edilmiş karar matrisi, her bir satır toplamının matris boyutuna bölünmesi yani aritmetiğinin hesaplanması işlemine denir. Bu ağırlık değerler, her bir kriterin göreceli önemini göstermektedir. Bu değerleri tavsiye ederken göreceli tercihleri belirlemek için kullanılır (Shahabi vd. 2021: 3).

$$w_j = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n a'_{ij}. \quad (4.3)$$

6. Adım Tutarlılığın Doğrulanması:

AHP yönteminde ikili karşılaştırma matrisinin oluşturulması aşamasında karar vericiler her bir kriterin göreceli önemini sübjektif olarak belirlemektedir. Bu noktada uzmanların kişisel fikirleri yönteme uygulanırken aynı zamanda yöntemin objektif yapısı devreye girmelidir. Bu doğrultuda yapılan analizin tutarlılığının doğrulanması, optimize edilmiş sonucun sağlaması için gereklidir (Topçu vd. 2023: 239)

Hesaplanan Tutarlılık oranı 0,1'den az ve eşit olması beklenmektedir. Tutarlılık oranı 0,1'i aşıyorsa karar vericilerden ilk kararlarını gözden geçirmesi istenmektedir (Kayan, 2022: 26). İstenilen seviyeye inene kadar ikili karşılaştırma matrisi revize edilmektedir. Tutarlılığının hesaplanması öz değer ($\lambda_{\max}$) kullanılarak belirlenir.

$$CI \text{ (Tutarlılık indeksi)} = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1) \quad (4.4)$$

n: matris boyutu

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j}{w_i} \right) \quad (4.5)$$

$$CR \text{ (Tutarlılık oranı)} = CI / RI \quad (4.6)$$

Tutarlılık oranının hesaplanması için Rassal indeks (Random index) değerinin hesaplanması gerekir (Karaca ve Tülüce, 2023: 278). Matris boyutlarına göre rassal indeks (RI) değerleri tabloda gösterilmiştir.

Tablo 4.2. *Rassal indeks değerleri* (**Kaynak:** Karaca ve Tülüce, 2023: 278)

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
RI	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,53

4.2. VIKOR Yöntemi

VIKOR yöntemi son yıllarda yaygın olarak kullanılan ve farklı niteliklere sahip alanları bir araya getirerek ölçüm yapan Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinden biridir (Aminijarahi, 2021: 286).

VIKOR (VIseKriterijumska Optimizacija I KOmpromisno Resenje) yöntemi, Opricovic tarafından 1998’de karmaşık ve ölçülemeyen kriterlerin varlığında ayrık kriter problemini çözmek için geliştirilmiş bir yöntemdir (Narayanamoorthy vd. 2019: 29). VIKOR yönteminde, birden fazla farklı özelliklere sahip kriterlerle, karar sonucunu belirlerken son derece etkili ve verimli alternatifleri seçebilmekte ve sıralayabilmektedir (Imandasari vd. 2019: 3)

VIKOR yönteminde çözümler, maksimum grup faydasını ile rakiplerin bireysel pişmanlığını bir araya getirerek karar vericileri nihai sonuca yönlendiren uzlaşmacı çözüm formundan elde edilir. VIKOR yöntemi karmaşık sistemlerin çoklu durum optimizasyonu için geliştirilmiştir. Yöntem, uzlaşmacı sıralama listesine, uzlaşmacı çözüme ve tercih

çözümü için stratejik ağırlık aralığına odaklanır (Shumaiza, 2019: 2). Bu yöntemin en belirgin özelliği, ideal çözüme özel yakınlık ölçüsüne dayanan çok kriterli sıralama indeksi oluşturmastır. En üst sırada yer alan alternatifin ideal çözüme en yakın olduğunu gösteren doğru bir sıralama listesi oluşturmaktadır (Chakraborty, Chatterjee ve Prasad, 2018: 67).

VIKOR yöntemin uygulama adımları aşağıda sıralanmıştır (Kumar, A, Gupta, 2020: 6), (Darvishi, 2019: 1094), (Hocaoğlu ve Tosun, 2023: 109), (Özağrı, 2023: 658), (İnam ve Murat, 2023: 116).

1. *Adım*: Tüm kriterlerin En iyi (f_i^+) ve En kötü (f_i^-) değerleri belirlenir. Kriterlerin özellikleri baz alınarak en iyi değerde istenilen, en kötü değerde istenilmeyen değerler belirlenmektedir.

$$\begin{aligned}
 f_i^+ &= \{(max f_{ij} | j \in J) or (min f_{ij} | j \in J') | i = 1, 2, \dots, m\} \\
 &= \{f_1^+, f_2^+, \dots, f_j^+, \dots, f_n^+\} \\
 f_i^- &= \{(min f_{ij} | j \in J) or (max f_{ij} | j \in J') | i = 1, 2, \dots, m\} \\
 &= \{f_1^-, f_2^-, \dots, f_j^-, \dots, f_n^-\} \\
 &\quad (i=1,2,3,\dots,n) \text{ kriterleri} \quad (j=1,2,3,\dots,m) \text{ alternatifleri}
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

2. *Adım*: Her bir alternatif için fayda ölçümü (S_i) ile pişmanlık ölçümü (R_i) hesaplanması yapılmaktadır

$$\begin{aligned}
 S_i &= \sum_{j=1}^n w_j (f_i^+ - f_{ij}) / (f_i^+ - f_i^-) \\
 R_i &= \max [w_j (f_i^+ - f_{ij}) / (f_i^+ - f_i^-)] \\
 W_j &= i. \text{ Kriterin ağırlığıdır.}
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

S_i değeri maksimum grup faydasına ve R_i minimum bireysel pişmanlığa dayanmaktadır.

3. Adım: Her Bir Alternatifin Vıkor Değeri (Q_j) Hesaplanması

$$Q_i = v \left[\frac{S_i - S^+}{S^- - S^+} \right] + (1 - v) \left[\frac{R_i - R^+}{R^- - R^+} \right] \quad (4.9)$$

$$S^+ = \max S_i \quad S^- = \min S_i \quad R^+ = \max R_i \quad R^- = \min R_i$$

v = maksimum grup faydasını elde etmede kullanılacak stratejinin ağırlığı

$v=1$ = Bireysel pişmanlığın ağırlığı ($v=0,5$)

Eğer;

$v > 0.5$ ise; Q_j değeri çoğunluğun anlaşmasına meğilli olacaktır.

$v < 0.5$ ise; Q_j değeri çoğunluğun negatif tutumunu gösterir.

4. Adım: S_j , R_j , Q_j değerleri baz alınarak alternatifler küçükten büyüğe sıralanır ve sıralama listesi oluşturulur.

5. Adım: Alternatif ($A^{(1)}$), minimum Q değerine sahip olan birinci en iyi alternatif olması aşağıdaki iki koşul bağlıdır.

1. Koşul: Kabul edilebilir avantaj (C1)

$$Q(A^{(2)}) - Q(A^{(1)}) \geq DQ$$

$A^{(2)}$: Minimum Q değerine sahip olan en iyi ikinci alternatif

$$DQ = 1/(J-1)$$

2. Koşul: Karar vermede kabul edilebilir durum (C2)

$A^{(1)}$ alternatifi, S ve R değerlerinin en az birinde en iyi puanı almış olmalı

4.3. COPRAS Yöntemi

COPRAS (Complex Proportional Assessment) yöntemi ilk kez 1994’de Zavadskas ve arkadaşları tarafından çok kriterli karar verme sorunlarına çözüm üretebilmek için geliştirilmiş son derece etkili yöntemlerden biridir. COPRAS yönteminin kilit noktası ideal çözüm ve ideal olmaya çözüm oranlarını eş zamanlı olarak ele almaktadır. Yöntem ideal çözüm ve ideal olmayan çözümü ilişkilendirerek optimal sonuç elde etmeye çalışmaktadır. Ayrıca yöntem, deterministik koşullarda da karar vermek için kullanılmaktadır (Mishra, Rani ve Pardasani, 2018: 436).

Son yıllarda kullanım alanı oldukça genişleyen ve terim anlamı ‘karmaşık oransal değerlendirme’ olarak da bilinen COPRAS yöntemi, kriterleri faydalı ve faydasız kategorilere göre ayırarak belirlenmiş olan alternatifleri sıralamaktadır. Kısaca alternatifler göreceli önem değerlerine (fayda derecesine) ve sayısal faydalarına göre sıralanmaktadır. En iyi alternatifin fayda derecesinde en yüksek değere sahip olduğu düşünülmektedir (Narayanamoorthy vd. 2021: 14).

COPRAS yöntemi, diğer ÇKKV yöntemlerine kıyasla final sonucunu elde etmede oldukça basit ve kolay yöntemlerden biridir. Bu yöntem, elde edilen verileri farklı açıdan ele aldığı gibi aynı zamanda alternatifler arasında bulunan farklılıkları (ideal ve ideal olmayan alternatifleri) göstermektedir (Lu vd. 2021: 370).

COPRAS yöntemi ile SAW (the Simple Additive Weighting) yöntemi birçok açıdan birbirine benzemektedir. Fakat bu iki yöntemi karşılaştırarak elde edilen araştırma sonuçlarına bakıldığında, COPRAS yönteminden elde edilen analiz sonuçlarının doğruluk yüzdesi SAW yöntemine göre oldukça yüksek olduğu anlaşılmaktadır. COPRAS yöntemi maksimum ve minimum kriter değerlendirmesini ayrı ayrı yapmaktadır. Yapılan değerlendirmeden elde edilen sonuçlar, pozitif ideal çözüm ve negatif ideal çözüm şeklinde oluşturulmaktadır. Böylece seçilen alternatifler en yüksek pozitif ideal çözüm değerine ve en düşük negatif ideal çözüm değerine sahip olmaktadır. Ayrıca analiz aşamasında oluşabilecek veri tutarsızlığını önlemek için alternatiflerin verileri standartlaştırılmaktadır.

COPRAS yöntemin uygulama adımları aşağıdaki şekilde sıralanmıştır (Kustiyahningsih, ve Aini, 2020: 2), (Tsaqila, Winiarti ve Widaningrum, 2024: 19), (Altın, 2021: 141), (İnam ve Murat, 2023: 180)

1. Adım Karar Matrisinin (D) Oluşturulması:

Yöntemin ilk adımında karar vericiler, i alternatifini j kriterine göre performans değerlendirmesi yaparak karar matrisini (D) oluştururlar.

$$D = X_{ij} = \begin{bmatrix} x_{01} & x_{02} & \cdots & x_{0n} \\ x_{i1} & x_{ij} & \cdots & x_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}; \quad (4.10)$$

$$i=1,2,\dots,m \quad j=1,2,\dots,n$$

2. Adım Normalize Edilmiş Karar Matrisinin Oluşturulması:

Normalize edilmiş $\overline{x}_{ij}$ karar matrisi aşağıdaki denklemlerle hesaplanmaktadır.

$$\overline{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \quad (4.11)$$

$$i=1,2,\dots,n \quad j=1,2,\dots,m$$

3. Adım Ağırlıklandırılmış Normalize Karar Matrisinin Hesaplanması:

Bu adımda önceden hesaplanmış olan ağırlık değerler, normalize edilmiş karar matrisiyle birleştirilerek $\widehat{x}_{ij}$ matrisi elde edilmektedir. Ağırlıklandırılmış karar matrisi aşağıdaki formülle elde edilir.

$$\widehat{x}_{ij} = \overline{x}_{ij} * w_j \quad (4.12)$$

4. Adım Fayda Kriterleri ile P_i Miktarının Hesaplanması:

Bu adımda ağırlıklandırılmış karar matrisinde bulunan fayda kriterler toplanarak P_i miktarı hesaplanır.

$$P_i = \sum_{j=1}^k \widehat{x}_{ij} \quad (4.13)$$

k: fayda kriterlerin sayısı

5. Adım Faydasız Kriterleri ile R_i Miktarının Hesaplanması:

Ağırlıklandırılmış karar matrisinde bulunan faydasız kriterler toplanarak R_i miktarı hesaplanır.

$$R_i = \sum_{j=k+1}^M \widehat{x}_{ij} \quad (4.14)$$

M: faydasız kriterlerin sayısı

6. Adım Minimum R_j Değerinin Hesaplanması:

$$R_{min} = \min_i R_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

7. Adım Her Alternatif Ait Göreli Önem Ağırlığının (Q_i) Hesaplanması:

Alternatiflerin göreli önem aşağıdaki formulu kullanarak Q_i değeri hesaplanır.

$$Q_i = P_i + [(R_{min} \sum_i^m R_i) / (R_i \sum_i^m (R_{min}/R_i))]$$

Veya

$$Q_i = P_i + \left[(\sum_i^m R_i) / \left(R_i \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{R_i} \right) \right) \right] \quad (4.15)$$

8. Adım Optimizasyon K Kriterinin Belirlenmesi:

$$K = \max_i Q_i \quad i: 1, 2, \dots, n$$

9. Adım Alternatiflere Göre Önceliklerin Belirlenmesi:

Alternatiflerin önceliklerini belirlemek için Q_i değerine bakılmalıdır. En yüksek Q_i değerine sahip olan alternatif sıralamada öncelik hakkına sahip olmaktadır.

10. Adım Her Alternatifin Fayda Derecesinin Hesaplanması:

N_i değeri hesaplanarak alternatifler sıralanabilmektedir. En yüksek N_i değerine sahip olan alternatifler sıralamada da en yüksek seviyede yer almaktadır.

$$N_i = Q_i * 100\% Q_{max} \quad (4.16)$$

4.4. MOORA Yöntemi

MOORA (Multi-Objective Optimization Method by Ratio Analysis) yöntemi, ilk kez Brauers tarafından endüstriyel uygulamalardaki çeşitli problemleri çözmek için başarılı bir şekilde tasarlanmış çok kriterli karar verme yöntemlerinden biridir (Fadli ve Imtihan, 2019: 130).

MOORA yöntemi, iki veya daha fazla çakışan özelliği eş zamanlı olarak optimize eden çok amaçlı bir sistemdir. MOORA yöntemi, en iyi değere uyumlu, yararlı, etkili ve profesyonel kararlar üretebilmektedir (Ranjith ve Vimalkumar, 2021: 2). Ayrıca mevcut alternatifler arasında en üstün alternatifi seçmek için karmaşık matematiksel hesaplamalarla problemleri çözmek için kullanılan bir yöntemdir (Sinaga, Marpaung ve Sianipar, 2021: 235).

MOORA yöntemi en iyi alternatifi seçmek için istatistiksel analiz tekniğini kullanan nispeten yeni olan ÇKKV yöntemidir. Yöntem yüksek seviyede esnekliğe sahip olması, kolayca uygulanabilir ve anlaşılabilir olması ayrıca neredeyse kesine yakın bir sıralama yapabilmesi yöntemin kullanım alanının genişlemesine yardımcı olmuştur (Awathankar, Rukmini ve Raut, 2020: 385). MOORA yöntemi yönetim, inşaat, müteahhitlik, yol tasarım ve ekonomi gibi alanlarda yaygın olarak uygulanmaktadır (Soni, Das ve Sarma, 2022: 119).

MOORA yönteminde fayda ve maliyet kriteri olmak üzere iki tür kriteri bulunmaktadır. Fayda kriteri, maliyet kriterinden daha yüksek değere sahip olmaktadır. MOORA yöntemi hesaplama basitliğinden dolayı birçok karar verme yöntemlerine kıyasla uygulanması ve kavranması kolaydır. MOORA yönteminin diğer önemli avantajı ise matematiksel hesaplama sürecinin herhangi bir ekstra parametrenin girmesinden etkilenmemesidir. Bu sebeplerden dolayı MOORA yöntemi çeşitli karar verme problemleri için oldukça kullanışlıdır (İç, 2019: 2035).

MOORA Yönteminin uygulama adımları (Utamı ve Ruskan, 2020: 707), (Moslem ve Çelikkilek, 2020: 7), (Dabbagh ve Yousefi, 2019: 115), (Keleş, 2023: 55), (Gürler, 2024: 372), (Hocaoğlu ve Tosun, 2023: 110);

1. Adım Karar Matrisi Oluşturulması:

X karar matrisi, m alternatifler ve n kriterlerle birlikte aşağıdaki formül yoluyla elde edilmektedir. x_{ij} , i. alternatifin j. kriterindeki performans ölçüsünü göstermektedir.

$$X = [x_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{01} & x_{02} & \cdots & x_{0n} \\ x_{i1} & x_{ij} & \cdots & x_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}; \quad (4.17)$$

$$i=1,2,\dots,m \quad j=1,2,\dots,n$$

2. Adım Normalize Karar Matrisinin Hesaplanması:

Karar matrisinde bulunan her ölçü birimi aynı olmamaktadır. Normalizasyon işlemi ile matriste bulunan tüm elementler aynı ölçü birimine çevrilmektedir. Yapılan bu işlemler sayesinde işlem kolaylığı sağlamaktadır.

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (4.18)$$

$$(j=1,2,\dots,n)$$

3. Adım Ağırlıklı Normalize Karar Matrisi:

Elde edilen normalize karar matrisini başka bir yöntemle (AHP yöntemi) hesaplanan kriter ağırlıklarını birbirleriyle entegre ederek ağırlıklı normalize karar matrisi elde edilmektedir. w_j değeri, j kriterinin ağırlığını göstermektedir.

$$v_{ij} = w_j \times x_{ij}^* \quad (4.19)$$

4. Adım Alternatiflerin Nihai Ağırlık Sonuçlarının Hesaplanması:

Alternatiflerin nihai ağırlık sonuçları, pozitif kriterlerin toplamından negatif kriterlerin toplamından çıkartılarak hesaplanmaktadır.

$$Y_i = \sum_{j=1}^g v_{ij} - \sum_{j=g+1}^n v_{ij} \quad (4.20)$$

Y_i = i. alternatifin MOORA puanı

$j= 1,2,...,g$ maksimize edilecek (fayda kriterleri)

$j= g+1, g+2,...,n$ minimize edilecek (maliyet kriterleri)

5. Adım Alternatiflerin Değerlendirilmesi ve Sıralanması:

Bu son adımda yöntemin tüm aşamalarından elde edilen veriler doğrultusunda alternatifler sıralanmaktadır. En iyi alternatif, en yüksek final değeri (Y_i); en kötü alternatif, en düşük final değerine (Y_i) sahiptir. Final değeri (Y_i) maksimum (fayda) değeri ve minimum (maliyet) değerine bağlı olarak pozitif ve negatif değerler belirlenmektedir.

4.5. PROMETHEE II Yöntemi

PROMETHEE yöntemi (Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations) J.P. Brans tarafından 1982’de geliştirilmiştir. Bu yöntem, karar seçeneklerinin sıralanmasını sağlayan çok kriterli karar verme araçlarının özel bir türüdür (Fatmawati vd. 2019: 2).

PROMETHEE II yöntemi, çok kriterli problemlerde başarılı bir şekilde uygulanan açık ve basit bir yöntemdir (Jiang, Zhan ve Chen, 2020: 1283).

PROMETHEE II yönteminin amacı, sıralama seçenekleri oluşturmaktır. Değerlendirilen seçenekler en çok tercih edilenden en az tercih edilene doğru sıralandırılmaktadır. Bu yöntemin uygulanması için ilk olarak kriter ağırlığı ve ikinci olarak karar vericinin tercih fonksiyonu gerekmektedir (Dachowski ve Galek, 2020: 3).

PROMETHEE II yönteminin ilk adımında mevcut farklı alternatiflerin ikili karşılaştırılması yapılmaktadır. i. alternatifin j. kriterlerle tercih indeksi tanımlanır. İşlem sırasında karşılaştırmalı alternatifler eklenir ve silinirse, tekrar ikili karşılaştırma analizi yapılmasına gerek yoktur. PROMETHEE II yönteminin bu özelliğinden dolayı diğer yöntemlere göre farklılık göstermektedir (Agrawal, 2021: 8).

PROMETHEE yönteminin birçok versiyonu geliştirilmiştir. En çok yaygın kullanılan PROMETHEE I ve II’dir. Bu iki yöntem bazı noktalarda birbirinden farklı işlem tekniği kullanılmaktadır. PROMETHEE I yöntemi, girdi ve çıkış tercih akışlarını kısmi bir

sıralama oluşturmak için belirlemektedir. Aksine PROMETHEE II yönteminde bireysel değişkenler için net tercih akış değerini, girdi ve çıktı tercih akışını baz alarak hesaplanmaktadır. Net değerlere dayalı olarak, tam değişken sıralaması yapılmaktadır (Salabun, Watrobski ve Shekhovtsov, 2020: 6).

PROMETHEE II yönteminin işlem adımları (Fadlina vd. 2017: 22) (Maity ve Chakraborty, 2015: 1541), (Gökdemir ve Gökay Emel, 2023: 606), (Yılmaz ve Yakut, 2023: 260), (Avşar, 2023: 753)

1. Adım Normalize Karar Matrisinin Oluşturulması:

Fayda kriterler için;

$$R_{ij} = \frac{[x_{ij} - \min(x_{ij})]}{[\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})]} \quad (4.21)$$

$$(i= 1,2,...,n; j= 1,2,...,m)$$

Maliyet kriterler için;

$$R_{ij} = \frac{[\max(x_{ij}) - x_{ij}]}{[\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})]} \quad (4.22)$$

$$(i= 1,2,...,n; j= 1,2,...,m)$$

x_{ij} : j. kritere göre i. alternatifin performans ölçüsünü ifade eder.

R_{ij} : x_{ij} 'nin normalleştirilmiş değeri

n : Değerlendirme kriterlerin sayısı

$\max(x_{ij})$: x_{ij} 'nin maksimum değeri

$\min(x_{ij})$: x_{ij} 'nin minimum değeri

Bu normalleştirme prosedürünün amacı, kriterleri karşılaştırılabilir forma dönüştürmektir. Normallizasyon işleminden sonra tüm kriter değerleri 0 ile 1 arasında olması beklenmektedir.

2. Adım Alternatifleri Kıyaslama:

Bu adımda her bir alternatifin diğer bir alternatifle kıyaslaması yapılmaktadır. i. alternatifin değerlendirilmesi diğer alternatiflere göre belirlenmektedir. Farklı alternatifler arasındaki kriter değerindeki farklar ikili olarak hesaplanmaktadır.

3. Adım Tercihleri Hesaplama:

$$P_j(i, i) = 0 \quad \text{if } R_{ij} \leq R_{i'j}$$

$$P_j(i, i') = 1 \quad \text{if } R_{ij} > R_{i'j}$$

4. Adım Ağırlıkları İçeren Toplu Tercih Fonksiyonunu Belirleme:

$$\pi(i, i') = \sum_{j=1}^m P_j(i, i') w_j \quad (4.23)$$

w_j, j . kriterin göreceli önem ağırlığıdır.

5. Adım Çıkış Ve Giriş Geçiş Akışı Belirleme:

$$\text{Çıkış akışı: } \varphi^+(i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i'=1}^n \pi(i, i') \quad (i \neq i')$$

$$\text{Giriş akışı: } \varphi^-(i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i'=1}^n \pi(i', i) \quad (i \neq i') \quad (4.24)$$

6. Adım Her Bir Alternatif İçin Net Geçiş Akışı $\varphi(i)$ Belirleme:

$$\varphi(i) = \varphi^+(i) - \varphi^-(i) \quad (4.25)$$

7. Adım Alternatifleri Sıralama:

Bu aşamada alternatifler sıralanmaktadır. En yüksek $\varphi(i)$ değeri, en iyi alternatif olarak kabul edilmektedir.

5. UYGULAMA

5.1. Çalışmanın Konusu

Dijital çağ olarak da adlandırılan bu dönemde, bilişim teknolojilerinin yaygınlaşması ve internet ağların gelişmesi sonucu insan gücü yerine birbirleriyle etkileşim içerisinde olan, merkeze bağlı kalmadan erken karar verme yetkisine sahip ve veri analizi yaparak risk yönetimi yapabilen makinalardan oluşan akıllı fabrikalar kurulmuştur. Endüstri, teknolojik gelişmelerin sonucunda otomatikleştirilmiş mallar üreten bir ekonominin parçası haline gelmiştir.

Sanayileşme sürecinin başından beri gerçekleşen teknolojik sıçramalar üretim yönetiminde de birçok gelişmelere neden olmuştur. Akıllı makineler ve ürünler alanında gerçekleşen geleceğe yönelik teknolojiler ile internet teknolojilerinin kombinasyonu, endüstriyel üretimde yeni bir paradigmaya neden olmuştur (Lasi vd. 2014: 242)

Bu bağlamda yapılan bu araştırmayla zengin literatür içeriğine sahip olan Endüstri 4.0 üretim sistemine firmaların uyum sağlamayabilmesi için gerekli kriterlerin belirlenmesi ve Gaziantep ilindeki firmaların belirlenen kriterleri baz alarak Endüstri 4.0'a hangi ölçüde entegre olduğu yapılan analizler sonucunda belirlenmesi amaçlanmaktadır.

5.2. Çalışmanın Amacı ve Önemi

Genç bir trend olan Endüstri 4.0 disiplini firmalar tarafından benimsenmesi ve uyum sağlaması konusunda Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle sürecin ne ölçüde başarılı olduğu anlaşılmaya çalışılmıştır.

Araştırmanın amacı, son yıllarda yoğun olarak çalışılan Endüstri 4.0 üretim sisteminin temel tasarım ilkelerini ve teknoloji trendlerini vurgulamak ve mimari dizaynını

belirlemektir. Ayrıca Endüstri 4.0'a geçiş süreci için üreticilere ve firma sahiplerine basit bir kılavuz olan stratejik bir yol haritası sunulması amaçlanmıştır. Uygulayıcılar, geleneksel üretim anlayışından insansız üretim anlayışı olan Endüstri 4.0'a başarılı bir geçiş yapabilen ayrıntılı bir stratejik yol haritası geliştirmesi rakipleri karşısında avantaj sağlamaktadır. Fakat tüm işletmelerin ve sektörlerin temel yetenekleri, amaçları, öncelikleri, bütçeleri gibi faktörlerin farklılık göstermesi standart bir strateji yol haritasının hazırlamasını mümkün kılmamaktadır. Bu doğrultuda işletmelerin Endüstri 4.0 teknolojisine adapte olabilmesi için genelgeçer hazırlanmış yol haritasında kullanılacak tasarım ilkelerini, Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle analiz ederek işletmelerin Endüstri 4.0'ın uygulanabilirliğini göstermeyi amaçlamaktadır.

Yapılan analiz sonucu tekstil firmaların bu yeni üretim sistemine ne kadar adapte olduğu veya eksik yanlarını belirleyerek firmaların gelecek strateji planlarını iyileştirme yönünde yeniden yapılandırmaları amaçlanmaktadır. Ayrıca araştırma sonucu belirlenen Endüstri 4.0 tasarım ilkelerini karşılaştırmalı üstünlük matrisiyle önem dereceleri belirlenmiş ve Endüstri 4.0'ı ilk kez benimseyecek firmalara bu önem derecelerine göre stratejilerini belirlemesi yönünde yol haritası olması amaçlanmıştır.

Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle ilgili birçok konuda yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Fakat Endüstri 4.0'ın genel tasarım ilkelerini baz alarak Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle yapılan tekstil firmalarının uyum süreci analiziyle ilgili yapılmış çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle yapılan bu çalışmanın literatüre katkı sağlaması hedeflenmektedir.

5.3. Çalışmanın Kapsamı ve Sınırlılık

Çalışmada Gaziantep ilindeki tekstil sektöründe faaliyet gösteren 5 firmanın Endüstri 4.0 uyum süreci incelenmiştir. Yapılan literatür araştırması sonucunda Endüstri 4.0 üretim sisteminin kapsamlı metodolojisi hakkında bilgi verilmiştir.

Firmalar hakkında kısa bilgiler aşağıda verilmiştir.

1.Firma 1978 yılında faaliyete girmiştir. Kalite odaklı üretim yapmıştır.

2.Firma 1983 yılında kurulmuştur. Müşteri memnuniyetinden daha çok, çalışanlarına eğitim ve sürekli gelişim sunmaktadır. Ürün ve tasarım gelişimi için 9 tasarımcı, renklendirme ve ebatlama için 24 tasarımcı bulunmaktadır. Türkiye'nin en büyük yazılım firması tarafından firmaya özel olarak ERP sistemi geliştirilmiştir. Bu yazılımla işler takip edilebilmekte ve mevcut durumu anlık görülebilmektedir.

3. firma 2003'de kurulmuş yenilikçi bir firmadır. Ciro ve müşteri sadakati açısından son on yılın en hızlı büyüyen halı firmasından biridir. 2008'de firmaya entegre iplik firması kurulmuştur. Ürünlerini ABD, Çin, Rusya gibi büyük ülkelere ihraç yapmaktadır.

4.Firma 1985 yılında hem üretime hem de uluslararası ticarete başlamıştır. Yüzölçüm olarak yaklaşık 50.000 m² kapalı alanda faaliyet gösteren firma tekstil sektöründe önemli bir yere sahiptir. Yüksek kapasiteyle çalışan firma, ürettiği ürün çeşitliliği bakımından da öncü konumdadır.

5. Firma 1984 yılında faaliyet göstermeye başlamıştır. İlk kuruluşundan itibaren markalaşma yönünde sürekli gelişim ilkesini benimseyerek ilerleyen Firma, Türkiye'nin En Büyük 500 Sanayi Kuruluşu listesinde yer almaktadır.

Araştırmanın amacına ulaşması noktasında ilk olarak Endüstri 4.0 mimarisinde kullanılacak olan temel tasarım ilkeleri belirlenmiştir. Bu ilkeler Endüstri 4.0'ı benimsemeye bir yol haritası olarak kullanılacağı için hangi kriterin hangi düzeyde öneme sahip olduğunun belirlenmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda belirlenen ilkeler, karşılaştırmalı üstünlük matrisiyle kriterlerin ağırlıklandırması için Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinden biri olan AHP yöntemine başvurulmuştur. Kriter ağırlıklandırılması yapıldıktan sonra Türkiye genelinde tekstil sektöründe öncülük yapan 5 firmadan hangisinin Endüstri 4.0 en iyi adapte olduğu bulabilmek için COPRAS, MOORA, VIKOR ve PROMETHEE II yöntemine başvurulmuştur. Analiz sonucunda en iyi firma alternetifi belirlenmiştir. Uygulamada kullanılan Endüstri 4.0'ın temel tasarım ilkeleri tablo 5.1' de verilmiştir.

Tablo 5.1. Uygulamada kullanılan kriterler (Kaynak: Ghobakhloo, 2018: 915)

Tasarım Kriterleri	Açıklamalar	Kaynaklar
Birlikte Çalışabilirlik	Bir işletmedeki sistemler ile işgücünün birbirleriyle iletişim kurması anlamına gelmektedir	Hermann, Otto ve Pentek, (2016); Lu (2017); Dikhanbayeva vd. (2020);
Sanallaştırma	Birden çok fiziksel kaynaktan bir sanal kaynak ya da bir fiziksel kaynaktan birden çok sanal kaynak oluşturulması ve bu sanal kaynaklardan fiziksel süreçlerin izlenmesi anlamına gelmektedir	Nee ve Ong (2013); Sultanova (2022); Tao vd. (2018); Brettel vd. (2014)
Yerelleştirme	Üretimde bir fiil aktif halde bulunan operasyon personellerinin ve hatta makinelerin merkezi karar alma mekanizmasına bağlı kalmak yerine bağımsız karar alma olarak ifade edilmektedir.	Gabriela Pereira Carvalho ve Walmir Cazarini (2020); Mohammed (2018); Marques vd. (2017)
Gerçek Zamanlı Yetenek	Gerçek zamanlı yetenek, organizasyonel görevler için verilerin gerçek zamanlı olarak toplanması ve analiz edilmesi anlamına gelmektedir	Hermann, Otto ve Pertek (2016); Gabriela Pereira Carvalho ve Walmir Cazarini (2020); Habib ve Chimsom (2019)
Hizmet Oryantasyonu	İşletmeler, ürünlerden müşterilere ve seri üretimden özel hizmetlere odaklarını değiştirerek değişen müşteri ihtiyaçlarına hizmetlerini uyarlayabilmektedir	Dikhanbayeva vd. (2020); Trappey vd. (2017); Kamble, Gunesekekan ve Gawankar (2018)
Modülerlik	Modülerlik, işletmelerin değişen gereksinimlerine ve endüstri ihtiyaçlarına esnek bir şekilde uyum sağlama yeteneği olarak ifade edilmektedir.	Bauernhansl (2014); Gupta (2019); Kamble, Gunesekekan ve Gawankar (2018); Ilankovic (2020)
Siber Tehlike	Siber veya siber güvenlik tehdidi verilere zarar vermeyi, verileri çalmayı veya genel olarak dijital yaşamı bozmayı amaçlayan kötüniyetli bir eylemdir.	Prinsloo, Sinha ve Solm (2019) Süzen (2020)
Sistem İçi Arıza	Endüstri 4.0 benimseyen bir firmanın dijitalleşmesi sonucu sistem içi oluşabilecek en küçük arızanın sistemi durma noktasına gelmesidir.	Webert vd. (2022) Farsi (2019)
Teknoloji Demodeliği	Sürekli gelişen teknoloji sonucunda sistemin benimsediği yapının zamanla eskimesi ve yenilenme isteği oluşturmaktadır.	Güngör (2018) Petrova vd. (2023)

5.4. Yöntemlerin Uygulanması

Çalışmanın bu bölümünde, Endüstri 4.0'a uyum süreciyle ilgili yapılan araştırmalar sonucunda Gaziantep ilindeki 5 tekstil firmasının belirlenen kriterler ışığında Çok kriterli karar verme yöntemleriyle analizi yapılmıştır.

5.4.1. AHP yönteminin uygulanması

Çalışmanın bu kısmında firmaların Endüstri 4.0'a uyum sürecini belirlemek maksadıyla geniş bir literatür araştırması yapılmıştır ve belirlenen dokuz kriterin önem ağırlığı AHP Yöntemiyle hesaplaması yapılmıştır.

1.Adım Herbir Karar Vericinin Karar Matrisinin Belirlenmesi:

Bu adımda herbir karar vericinin belirlenen dokuz kriteri karşılaştırma yöntemiyle önem ağırlıklığı hesaplanmaktadır. Herbir kriterin diğer kriterler karşısında verilen değerlendirme puanıyla üstünlüğü belirlenmektedir. Ölçü olarak Tablo 4.1 (Saaty Temel Ölçeği) baz alınmaktadır.

Tablo 5.2. Birinci karar vericinin karar matrisi

	Birlikte Çalışabilirlik	Sanallaştırma	Yerelleştirme	Gerçek Zamanlı Yetenek	Hizmet Oryantasyonu	Modülerlik	Siber Tehlike	Sistem İçi Arıza	Teknoloji Demodeliği
Birlikte Çalışabilirlik	1	2	4	5	8	6	3	7	9
Sanallaştırma	0,5	1	3	4	7	5	2	6	8
Yerelleştirme	0,25	0,33	1	0,5	6	4	0,33	5	7
Gerçek Zamanlı Yetenek	0,2	0,25	2	1	5	3	0,5	4	6
Hizmet Oryantasyonu	0,12	0,14	0,16	0,2	1	0,2	0,16	2	3
Modülerlik	0,16	0,2	0,25	0,33	5	1	0,2	2	5
Siber Tehlike	0,33	0,5	3	2	6	5	1	6	7
Sistem İçi Arıza	0,14	0,16	0,2	0,25	0,5	0,5	0,16	1	3
Teknoloji Demodeliği	0,11	0,12	0,14	0,16	0,33	0,2	0,14	0,33	1

Tablo 5.3. İkinci karar vericinin karar matrisi

	Birlikte Çalışabilirlik	Sanallaştırma	Yerleştirme	Gerçek Zamanlı Yetenek	Hizmet Oryantasyonu	Modülerlik	Siber Tehlike	Sistem İçi Arıza	Teknoloji Demodeliği
Birlikte Çalışabilirlik	1	2	4	4	7	5	3	6	8
Sanallaştırma	0,5	1	3	3	6	4	2	5	7
Yerleştirme	0,25	0,33	1	1	5	3	0,5	4	6
Gerçek Zamanlı Yetenek	0,25	0,33	1	1	7	5	0,5	6	8
Hizmet Oryantasyonu	0,14	0,16	0,2	0,14	1	0,33	0,2	0,5	2
Modülerlik	0,2	0,25	0,33	0,2	3	1	0,25	2	3
Siber Tehlike	0,33	0,5	2	2	5	4	1	6	7
Sistem İçi Arıza	0,16	0,2	0,2	0,16	2	0,5	0,16	1	3
Teknoloji Demodeliği	0,12	0,14	0,16	0,12	0,5	0,33	0,33	0,33	1

Tablo 5.4. Üçüncü karar vericinin karar matrisi

	Birlikte Çalışabilirlik	Sanallaştırma	Yerleştirme	Gerçek Zamanlı Yetenek	Hizmet Oryantasyonu	Modülerlik	Siber Tehlike	Sistem İçi Arıza	Teknoloji Demodeliği
Birlikte Çalışabilirlik	1	2	4	3	6	5	3	6	7
Sanallaştırma	0,5	1	3	1	7	6	2	5	7
Yerleştirme	0,25	0,33	1	1	6	4	0,5	5	7
Gerçek Zamanlı Yetenek	0,33	1	1	1	6	4	0,33	5	6
Hizmet Oryantasyonu	0,16	0,14	0,16	0,16	1	0,2	0,2	0,25	3
Modülerlik	0,2	0,16	0,25	0,25	5	1	0,2	3	4
Siber Tehlike	0,33	0,5	2	3	5	5	1	5	7
Sistem İçi Arıza	0,16	0,2	0,2	0,2	4	0,33	0,2	1	2
Teknoloji Demodeliği	0,14	0,14	0,14	0,16	0,33	0,25	0,14	0,5	1

Tablo 5.5. Dördüncü karar vericinin karar matrisi

	Birlikte Çalışabilirlik	Sanallaştırma	Yerelleştirme	Gerçek Zamanlı Yetenek	Hizmet Oryantasyonu	Modülerlik	Siber Tehlike	Sistem İçi Arıza	Teknoloji Demodeliği
Birlikte Çalışabilirlik	1	3	5	4	7	6	2	6	8
Sanallaştırma	0,33	1	3	2	7	5	2	4	7
Yerelleştirme	0,2	0,33	1	0,5	6	4	0,25	5	6
Gerçek Zamanlı Yetenek	0,25	0,5	2	1	5	3	0,33	4	5
Hizmet Oryantasyonu	0,14	0,14	0,16	0,2	1	0,5	0,16	0,33	3
Modülerlik	0,16	0,2	0,25	0,33	2	1	0,25	3	4
Siber Tehlike	0,5	0,5	4	3	6	4	1	6	8
Sistem İçi Arıza	0,16	0,25	0,2	0,25	3	0,33	0,16	1	3
Teknoloji Demodeliği	0,12	0,14	0,16	0,2	0,33	0,25	0,12	0,33	1

Tablo 5.6. Beşinci karar vericinin karar matrisi

	Birlikte Çalışabilirlik	Sanallaştırma	Yerelleştirme	Gerçek Zamanlı Yetenek	Hizmet Oryantasyonu	Modülerlik	Siber Tehlike	Sistem İçi Arıza	Teknoloji Demodeliği
Birlikte Çalışabilirlik	1	3	4	3	7	5	2	6	7
Sanallaştırma	0,33	1	3	2	5	4	2	5	6
Yerelleştirme	0,25	0,33	1	0,5	4	3	0,33	3	5
Gerçek Zamanlı Yetenek	0,33	0,5	2	1	6	4	0,33	5	7
Hizmet Oryantasyonu	0,14	0,2	0,25	0,16	1	0,5	0,16	0,33	3
Modülerlik	0,2	0,25	0,33	0,25	2	1	0,2	3	4
Siber Tehlike	0,5	0,5	3	3	6	5	1	5	6
Sistem İçi Arıza	0,16	0,2	0,33	0,2	3	0,33	0,2	1	3
Teknoloji Demodeliği	0,14	0,16	0,2	0,14	0,33	0,25	0,16	0,33	1

2.Adım Karşılaştırmalı Üstünlük Matrisinin Belirlenmesi:

Bu adımda tüm karar vericilerin ikili karşılaştırma matrisi (Tablo 5.2, Tablo 5.3, Tablo 5.4, Tablo 5.5, Tablo 5.6) belirlendikten sonra tüm matrislerin Aritmetik Ortalama Yöntemi yardımıyla ortalaması alınmıştır. Yeni bir matris olan Karşılaştırmalı Üstünlük Matrisi oluşturulmuştur. Bu şekilde tüm karar vericilerin oluşturdukları karar matrisleri tek matris haline getirilmiştir.

Tablo 5.7. Karşılaştırmalı üstünlük matrisi

	Birlikte Çalışabilirlik	Sanallaştırma	Yerelleştirme	Gerçek Zamanlı Yetenek	Hizmet Oryantasyonu	Modülerlik	Siber Tehlike	Sistem İçi Arıza	Teknoloji Demodeliği
Birlikte Çalışabilirlik	1,000	2,352	4,183	3,728	6,971	5,378	2,551	6,188	7,765
Sanallaştırma	0,423	1,000	3,000	2,169	6,346	4,743	2,000	4,959	6,971
Yerelleştirme	0,239	0,330	1,000	0,660	5,335	3,565	0,369	4,317	6,153
Gerçek Zamanlı Yetenek	0,267	0,460	1,516	1,000	5,753	3,728	0,390	4,743	6,320
Hizmet Oryantasyonu	0,139	0,154	0,183	0,170	1,000	0,319	0,175	0,486	2,766
Modülerlik	0,183	0,209	0,279	0,267	3,129	1,000	0,219	2,551	3,936
Siber Tehlike	0,390	0,500	2,702	2,551	5,578	4,573	1,000	5,578	6,971
Sistem İçi Arıza	0,156	0,200	0,221	0,209	2,048	0,390	0,175	1,000	2,766
Teknoloji Demodeliği	0,125	0,139	0,159	0,154	0,359	0,253	0,166	0,359	1,000
Toplam	2,923	5,345	13,242	10,908	36,518	23,949	7,043	30,181	44,648

3.Adım Normalize Edilmiş Karar Matrisi:

Bu adımda oluşturulan Karşılaştırmalı Üstünlük Matrisinden (Tablo 5.7) yardım alınmıştır. Karşılaştırmalı Üstünlük Matrisinde öncelikle her bir sütun toplanmaktadır, daha sonra matristeki her bir değer kendi sütunundaki toplam değere bölünerek ilgili hücreye yazılmaktadır. Bu şekilde Normalize Edilmiş Karar Matrisi oluşturulmaktadır.

Tablo 5.8. *Normalize edilmiş karar matrisi*

	Birlikte Çalışabilirlik	Sanallaştırma	Yerelleştirme	Gerçek Zamanlı Yetenek	Hizmet Oryantasyonu	Modülerlik	Siber Tehlike	Sistem İçi Arıza	Teknoloji Demodeliği
Birlikte Çalışabilirlik	0,342	0,440	0,316	0,342	0,191	0,225	0,3622	0,2050	0,1739
Sanallaştırma	0,145	0,187	0,227	0,199	0,174	0,198	0,2840	0,1643	0,1561
Yerelleştirme	0,082	0,062	0,076	0,060	0,146	0,149	0,0523	0,1430	0,1378
Gerçek Zamanlı Yetenek	0,091	0,086	0,114	0,092	0,158	0,156	0,0553	0,1571	0,1415
Hizmet Oryantasyonu	0,048	0,029	0,014	0,016	0,027	0,013	0,0248	0,0161	0,0620
Modülerlik	0,063	0,039	0,021	0,024	0,086	0,042	0,0310	0,0845	0,0882
Siber Tehlike	0,133	0,094	0,204	0,234	0,153	0,191	0,1420	0,1848	0,1561
Sistem İçi Arıza	0,053	0,037	0,017	0,019	0,056	0,016	0,0248	0,0331	0,0620
Teknoloji Demodeliği	0,043	0,026	0,012	0,014	0,010	0,011	0,0235	0,0119	0,0224

4. Adım Kriter Ağırlığının Hesaplanması:

Bu adımda Normalize edilmiş karar matrisindeki herbir satır toplamının gözlem sayısına bölünmesi sonucunda tüm kriterlerin önem ağırlığı belirlenmektedir. Aşağıdaki tabloda kriterlerin önem ağırlığı hesaplanmıştır. Kriterlerin önem ağırlıkları diğer tüm modellerde (VIKOR, COPRAS, MOORA ve PROMETHEE II gibi) veri olarak kullanılmıştır.

5. Adım Öz Değer Hesaplaması:

Bu adımda bulunan kriterlerin önem ağırlıkları (Tablo 5.9) ile karar vericilerin karar matrisi (Tablo 5.7) çarpılarak hesaplaması yapılmaktadır. Hesaplamalar sonucunda

oluşturulan matrisin her bir satırının toplamı alınarak öz değer hesaplaması yapılmaktadır. Tablo 5.10 ‘da ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir.

Tablo 5.9. Kriterlerin önem ağırlığı

	Kriter Ağırlıkları (w)
Birlikte Çalışabilirlik	0,2885
Sanallaştırma	0,1926
Yerelleştirme	0,1009
Gerçek Zamanlı Yetenek	0,1168
Hizmet Oryantasyonu	0,0277
Modülerlik	0,0532
Siber Tehlike	0,1657
Sistem İçi Arıza	0,0354
Teknoloji Demodeliği	0,0192

Tablo 5.10. Öz değerler

	Birlikte Çalışabilirlik	Sanallaştırma	Yerelleştirme	Gerçek Zamanlı Yetenek	Hizmet Oryantasyonu	Modülerlik	Siber Tehlike	Sistem İçi Arıza	Teknoloji Demodeliği	Toplam
Birlikte Çalışabilirlik	0,288	0,453	0,422	0,435	0,193	0,286	0,423	0,219	0,149	2,869
Sanallaştırma	0,122	0,193	0,303	0,253	0,176	0,252	0,331	0,176	0,134	1,940
Yerelleştirme	0,069	0,064	0,101	0,077	0,148	0,190	0,061	0,153	0,118	0,980
Gerçek Zamanlı Yetenek	0,077	0,089	0,153	0,117	0,160	0,198	0,065	0,168	0,122	1,147
Hizmet Oryantasyonu	0,040	0,030	0,018	0,020	0,028	0,017	0,029	0,017	0,053	0,252
Modülerlik	0,053	0,040	0,028	0,031	0,087	0,053	0,036	0,090	0,076	0,495
Siber Tehlike	0,112	0,096	0,272	0,298	0,155	0,243	0,166	0,198	0,134	1,674
Sistem İçi Arıza	0,045	0,039	0,022	0,024	0,057	0,021	0,029	0,035	0,053	0,325
Teknoloji Demodeliği	0,036	0,027	0,016	0,018	0,010	0,013	0,027	0,013	0,019	0,180

6. Adım Tutarlılık Oranının Hesaplanması:

Önceki adımda hesaplaması yapılan kriter ağırlıklarının uygulanacak olan modellerde öngürülebilir sonuçlar verip vermeyeceğini anlayabilmek için bu adımda sağlaması yapılmaktadır. Bu aşamada bulunan öz değerler toplamı (Tablo 5.10), kriter ağırlıklarına (w) bölünmektedir. Sonrasında bulunan değerlerin toplamı alınır ve gözlem sayısına bölündüğünde en büyük öz değer sonucuna (lamda değer) ulaşılır. Lamda değerinin hesaplanması yapıldıktan sonra sırasıyla Tutarlılık İndeksi (Consistency Index) ve Random İndeksi hesaplanır. Random İndeksi, gözlem sayısına bölünmesiyle hesaplanır, Tablo 5.11’de elde edilen indeks sonuçları belirtilmiştir. Bu değer 0,10’den küçük olması karar vericilerin karar matrislerinde (Tablo 5.2, Tablo 5.3, Tablo 5.4, Tablo 5.5, Tablo 5.6) yaptığı değerlendirmelerin tutarlı olduğu anlaşılmıştır.

Tablo 5.11. Tutarlılık oranı

	Toplam/Kriter Ağırlığı	Lamda	Consistency Index	Random Index	
Birlikte Çalışabilirlik	9,9461	9,6223	0,0778	0,0621	0<0,10
Sanallaştırma	10,0718				
Yerelleştirme	9,7209				
Gerçek Zamanlı Yetenek	9,8263				
Hizmet Oryantasyonu	9,1019				
Modülerlik	9,3062				
Siber Tehlike	10,1044				
Sistem İçi Arıza	9,1834				
Teknoloji Demodeliği	9,3392				

Hesaplamalar sonucunda firmaların Endüstri 4.0’a uyum sürecini incelememizde yardımcı olacak dokuz önemli kriterin AHP Yöntemine göre analizi yapıldığında, ‘0,2885’ değerlendirme puanı olarak en yüksek kriter ağırlığına sahip olan Birlikte Çalışabilirlik birinci sırada yer almaktadır. Sıralamayı ‘0,1926’ değerlendirme puanıyla Sanallaştırma,

‘0,1657’ puanla Siber Tehlike, ‘0,1168’ puanla Gerçek Zamanlı Yetenek, ‘0,1009’ puanla Yerelleştirme, ‘0.0532’ puanla Modülerlik, ‘0.0354’ puanla Sistem İçi Arıza, ‘0,0277’ puanla Hizmet oryantasyonu ve son olarak ‘0,0192’ puanla Teknoloji Demodeliği takip etmiştir.

5.4.2. VIKOR yönteminin uygulanması

Bu bölümde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinden biri olan VIKOR Yöntemiyle firmaların Endüstri 4.0’a uyum süreci incelenmiştir. Bir önceki bölümde AHP Yöntemiyle kapsamlı araştırma sonucu belirlediğimiz dokuz kriterin önem ağırlığı analize entegre edilmektedir. Yapılan analiz sonucunda beş firma alternatifi Endüstri 4.0’a hangi ölçüde uyum sağladığını en iyiden en kötüye sıralaması yapılarak belirlenmiştir.

1. Adım En İyi (f_i^+) ve En Kötü (f_i^-) Değerin Belirlenmesi:

VIKOR Yönteminin birinci adımında karar matrisinde yer alan kriterlerin fayda ve maliyet değerleri belirlenmiştir. Fayda değerlerinin maksimum değer alması; maliyet değerlerinin minimum değer alması istenmiştir. Daha sonraki aşamada karar matrisinde en büyük değer ve en küçük değer belirlenmiştir (Tablo 5.12).

Tablo 5.12. En iyi (f_i^+) ve en kötü (f_i^-) değerleri

	Birlikte Çalışılabilirlik	Sanallaştırma	Yerelleştirme	Gerçek Zamanlı Yetenek	Hizmet Oryantasyonu	Modülerlik	Siber Tehlike	Sistem İçi Arıza	Teknoloji Demodeliği
1.Firma	7,6	7,2	8,2	7	8	7,4	7,4	7,8	6,8
2. Firma	9	8	8,6	8,6	9	7,8	7,8	6,6	7,6
3. Firma	7,4	7,4	8,2	7,2	8	7,4	7,2	8,8	6,6
4. Firma	9	8,8	8,2	7,2	8,6	8	7,2	7,6	7,4
5. Firma	9,4	8,4	8,4	7,8	8,8	8,6	7,4	7,6	7,2
	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Min	Min	Min
f_i^+	9,4	8,8	8,6	8,6	9	8,6	7,2	6,6	6,6
f_i^-	7,4	7,2	8,2	7	8	7,4	7,8	8,8	7,6

2. Adım Normalizasyon Matrisinin Belirlenmesi:

VIKOR Yönteminin ikinci adımında Normalizasyon Matrisi hesaplanmaktadır. Karar matrisinde fayda kriteri olarak belirlenen sütunun maksimum değerden, maliyet kriteri olarak belirlenen sütunun minimum değerden çıkartılmaktadır. Daha sonra en yüksek fi+ değeri, en düşük fi- değerinden çıkartılmaktadır. İki ayrı hesaplamanın birbirine bölünmesiyle elde edilen sonuçların ilgili hücreye yazılması sonucu Normalizasyon matrisi elde edilmektedir.

Tablo 5.13. Normalizasyon matrisi

	Birlikte Çalışabilirlik	Sanallaştırma	Yerelleştirme	Gerçek Zamanlı Yetenek	Hizmet Oryantasyonu	Modülerlik	Siber Tehlike	Sistem İçi Arıza	Teknoloji Demodeliği
1.Firma	0,900	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,333	0,545	0,200
2. Firma	0,200	0,500	0,000	0,000	0,000	0,667	1,000	0,000	1,000
3. Firma	1,000	0,875	1,000	0,875	1,000	1,000	0,000	1,000	0,000
4. Firma	0,200	0,000	1,000	0,875	0,400	0,500	0,000	0,455	0,800
5. Firma	0,000	0,250	0,500	0,500	0,200	0,000	0,333	0,455	0,600

3. Adım Ağırlıklandırılmış Normalize Matrisinin Belirlenmesi:

Bu adımda Normalize Edilmiş Karar Matrisine, önceki bölümde AHP Yöntemiyle hesaplanan kriterlerin önem ağırlığı (Tablo 5.9) analize entegre edilmektedir. Tablo 5.13’de belirlenen tüm değerlerle, kriter ağırlıklarının çarpılması sonucu Ağırlıklandırılmış Normalize Matrisi (Tablo 5.14) elde edilmiştir.

Tablo 5.14. *Ağırlıklandırılmış normalize matrisi*

	Birlikte Çalışabilirlik	Sanallaştırma	Yerelleştirme	Gerçek Zamanlı Yetenek	Hizmet Oryantasyonu	Modülerlik	Siber Tehlike	Sistem İçi Arıza	Teknoloji Demodeliği
1.Firma	0,260	0,193	0,101	0,117	0,028	0,053	0,055	0,019	0,004
2. Firma	0,058	0,096	0,000	0,000	0,000	0,035	0,166	0,000	0,019
3. Firma	0,288	0,169	0,101	0,102	0,028	0,053	0,000	0,035	0,000
4. Firma	0,058	0,000	0,101	0,102	0,011	0,027	0,000	0,016	0,015
5. Firma	0,000	0,048	0,050	0,058	0,006	0,000	0,055	0,016	0,012

4. Adım Si ve Ri Değerlerinin Belirlenmesi:

Bu adımda Si ve Ri değerleri hesaplanmıştır. Ağırlıklandırılmış Normalize Matrisinin herbir satırının toplanmasıyla Si değeri, herbir satırın maksimum değerinin alınmasıyla Ri değeri belirlenmiştir. Bu belirlenen değerler Tablo 5.15'te gösterilmiştir.

Tablo 5.15. *Si ve Ri değerleri*

	Si	Ri
1.Firma	0,829	0,260
2. Firma	0,374	0,166
3. Firma	0,776	0,288
4. Firma	0,330	0,102
5. Firma	0,245	0,058
S* ve R*	0,245	0,058
S- ve R-	0,829	0,288
DQ	0,25	

5. Adım Alternatiflerin Sıralanması:

Bu aşamada VIKOR değeri olan Q_i değeri belirlenen formüllerle hesaplanmakta ve alternatifler en küçük Q_i değerinden başlanarak sıralaması yapılmaktadır. VIKOR Yönelimiyle yapılan sıralamanın genel kabul görmesi için iki koşulun (C1 ve C2) sağlanması gerekmektedir. C1 koşuluna göre; ikinci sırada yer alan alternatifin Q_i değerinden birinci sırada yer alan alternatifin Q_i değerini çıkartılır ve DQ değerine bölünür. Elde edilen sonucun DQ değerine eşit ve büyük olmasını istenir. C2 koşulu ise en iyi alternatifin hem S_i değeri hem de R_i değerinin en küçük değere sahip olması istenmektedir.

Tablo 5.16. Alternatiflerin sıralanması

	Q_i	RANK	C1		C2
1.Firma	0,937	4	0,670	$\geq DQ$	Birinci sıradaki alternatif hem S_i hemde R_i da minimum değere sahip olması
2. Firma	0,344	3			
3. Firma	0,955	5			
4. Firma	0,168	2			
5. Firma	0,000	1			

Yapılan analiz sonuçlarına göre firmaların genel kabul görmüş kriterler ışığında Endüstri 4.0'ı hangi ölçüde benimsediği Tablo 5.16'da gösterilmiştir. Tabloda da gösterildiği gibi Q_i değeri en düşük olan 5. Firma, Endüstri 4.0 teknolojisini en çok benimseyen firma olduğu belirlenmiştir. Sıralamayı Q_i değeri '0,16750965' olan 4. Firma ikinci sırada yer alırken, '0,34371153' değeriyle 2. Firma üçüncü sırada yer almakta, '0,93731457' değeriyle 1. Firma dördüncü sırada yer almaktadır. Son olarak '0,93731457' değeriyle en yüksek Q_i değerine sahip olan 3. Firma Endüstri 4.0 teknolojisini benimseyen en kötü firma olarak belirlenmiştir.

Modelin tutarlılığı incelendiğinde en iyi alternatif olarak belirlenen 5. Firmanın, 0,670 değeriyle DQ değerinden büyük olması C1 koşulunu, diğer yandan hem S_i değeri hem de R_i değerinin diğer alternatiflere göre en küçük değere sahip olması C2 koşulunu sağlamaktadır. Buna göre en iyi alternatifin (5. Alternatif) iki koşulu sağlaması VIKOR Modelinin güvenilir bir şekilde hesaplamalar yaptığını göstermiştir.

5.4.3. COPRAS yönteminin uygulanması

Bu bölümde Endüstri 4.0 trendine uyum sağlamak isteyen firmaların geniş literatür araştırması sonucu belirlenen kriterler eşliğinde hangi ölçüde benimsediği COPRAS Yöntemi ile hesaplamalar yapılarak gösterilmiştir.

1. Adım Karar Matrisinin Oluşturulması:

Bu aşamada birçok karar vericinin değerlendirme sonucunun aritmetik ortalaması alınarak karar matrisi oluşturulmuştur.

Tablo 5.17. Karar matrisinin oluşturulması

	Birlikte Çalışabilirlik	Sanallaştırma	Yerelleştirme	Gerçek Zamanlı Yetenek	Hizmet Oryantasyonu	Modülerlik	Siber Tehlike	Sistem İçi Arıza	Teknoloji Demodeliği
1.Firma	7,6	7,2	8,2	7	8	7,4	7,4	7,8	6,8
2. Firma	9	8	8,6	8,6	9	7,8	7,8	6,6	7,6
3. Firma	7,4	7,4	8,2	7,2	8	7,4	7,2	8,8	6,6
4. Firma	9	8,8	8,2	7,2	8,6	8	7,2	7,6	7,4
5. Firma	9,4	8,4	8,4	7,8	8,8	8,6	7,4	7,6	7,2
	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Min	Min	Min
Kriter Ağırlıkları	0,288	0,193	0,101	0,117	0,028	0,053	0,166	0,035	0,019

2. Adım Normalize Karar Matrisinin Oluşturulması:

Yöntemin ikinci adımında Normalizasyon Matrisi oluşturulmaktadır. Karar matrisindeki her bir değer, kendi sütunundaki değerler toplamına bölünerek elde edilen sonuç ilgili hücreye yazılmaktadır. Bu şekilde oluşturulan matrise Normalizasyon Matrisi (Tablo 5.18) denilmektedir.

Tablo 5.18. Normalizasyon matrisi

	Birlikte Çalışabilirlik	Sanallaştırma	Yerelleştirme	Gerçek Zamanlı Yetenek	Hizmet Oryantasyonu	Modülerlik	Siber Tehlike	Sistem İçi Arıza	Teknoloji Demodeliği
1.Firma	0,179	0,181	0,197	0,185	0,189	0,189	0,200	0,203	0,191
2. Firma	0,212	0,201	0,207	0,228	0,212	0,199	0,211	0,172	0,213
3. Firma	0,175	0,186	0,197	0,190	0,189	0,189	0,195	0,229	0,185
4. Firma	0,212	0,221	0,197	0,190	0,203	0,204	0,195	0,198	0,208
5. Firma	0,222	0,211	0,202	0,206	0,208	0,219	0,200	0,198	0,202

3. Adım Ağırlıklandırılmış Normalize Matrisinin Oluşturulması:

Yöntemin bu aşamasında Normalize Edilmiş Karar Matrisinin (Tablo 5.18), her bir hücrene AHP Yöntemiyle bulunan kriterlerin önem ağırlığı (Tablo 5.9) entegre edilmektedir. Normalizasyon Matrisinin tüm değerleriyle kriterlerin önem ağırlık değerlerinin çarpılması sonucu oluşan matrise Ağırlıklandırılmış Normalize Matrisi denilmektedir.

Tablo 5.19. Ağırlıklandırılmış normalize matrisi

	Birlikte Çalışabilirlik	Sanallaştırma	Yerelleştirme	Gerçek Zamanlı Yetenek	Hizmet Oryantasyonu	Modülerlik	Siber Tehlike	Sistem İçi Arıza	Teknoloji Demodeliği
1.Firma	0,052	0,035	0,020	0,022	0,005	0,010	0,033	0,007	0,004
2. Firma	0,061	0,039	0,021	0,027	0,006	0,011	0,035	0,006	0,004
3. Firma	0,050	0,036	0,020	0,022	0,005	0,010	0,032	0,008	0,004
4. Firma	0,061	0,043	0,020	0,022	0,006	0,011	0,032	0,007	0,004
5. Firma	0,064	0,041	0,020	0,024	0,006	0,012	0,033	0,007	0,004

4. Adım Alternatiflerin Sıralanması:

COPRAS Yönteminin bu aşamasında matematiksel işlemler yapılarak yöntemin tüm denklemleri çözüme kavuşturulmuş ve alternatifler sıralanmıştır. Buna göre belirlenen kriterler doğrultusunda Endüstri 4.0'a en fazla uyum sağlayan firmanın Q_i değeri '0,211' olan 5. Firma olduğu anlaşılmıştır. Sıralamayı '0,207' değerinde olan 4. Firma, '0,207' değerinde olan 2. Firma, '0,188' değerinde olan 3. Firma takip etmektedir. '0,187' değerinde olan 1. Firma alternatifler içerisinde en kötü değere sahiptir. Aşağıdaki Tablo 5.20'da ayrıntılı bir şekilde belirtilmiştir.

Tablo 5.20. Alternatiflerin sıralanması

	P_i	R_i	R_{min}/R_i	Q_i	N_i	Rank
1. Firma	0,143	0,044	0,983	0,187	89,02	5
2. Firma	0,164	0,045	0,959	0,207	98,24	3
3. Firma	0,144	0,044	0,985	0,188	89,16	4
4. Firma	0,162	0,043	1,000	0,207	98,45	2
5. Firma	0,166	0,044	0,982	0,211	100,00	1
Min	0,143	0,043				

5.4.4. MOORA yönteminin uygulanması

Bu bölümde MOORA Yöntemiyle matematiksel veriler analiz edilerek firmaların Endüstri 4.0'a hangi oranda uyum sağladığı hesaplanmıştır. Kapsamlı literatür araştırması sonucu firmaların Endüstri 4.0'a uyumunu ölçebilmek için belirlenen kriterler baz alınarak analiz yapılmıştır.

1. Adım Karar Matrisinin Oluşturulması:

Bu adımda beş karar verici tarafından belirlenen karar matrisi Tablo 5.21 'de verilmektedir. Öncelikle hangi kriterlerin fayda veya maliyet yönlü olduğu belirlenmiştir.

Tablo 5.21. Karar matrisinin oluşturulması

	Birlikte Çalışabilirlik	Sanallaştırma	Yerleştirme	Gerçek Zamanlı Yetenek	Hizmet Oryantasyonu	Modülerlik	Siber Tehlike	Sistem İçi Arıza	Teknoloji Demodeliği
1.Firma	7,6	7,2	8,2	7	8	7,4	7,4	7,8	6,8
2. Firma	9	8	8,6	8,6	9	7,8	7,8	6,6	7,6
3. Firma	7,4	7,4	8,2	7,2	8	7,4	7,2	8,8	6,6
4. Firma	9	8,8	8,2	7,2	8,6	8	7,2	7,6	7,4
5. Firma	9,4	8,4	8,4	7,8	8,8	8,6	7,4	7,6	7,2
	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Min	Min	Min
Kriter Ağırlıkları	0,288	0,193	0,101	0,117	0,028	10,053	0,166	0,035	0,019

2. Adım Normalize Edilmiş Karar Matrisinin Oluşturulması:

Bu adımda yukarıda belirlenen Karar Matrisinden yararlanarak Normalize Karar Matrisi oluşturulmuştur. Birinci aşamada tüm hücredeki değerlerin karesi alınmıştır. Daha sonra herbir sütun toplanıp ve bu toplamın karekökü alınmıştır. Bu işlemler sonrasında A satırı elde edilmiştir.

Tablo 5.22. Normalize karar matrisinin 1. aşaması

	Birlikte Çalışabilirlik	Sanallaştırma	Yerleştirme	Gerçek Zamanlı Yetenek	Hizmet Oryantasyonu	Modülerlik	Siber Tehlike	Sistem İçi Arıza	Teknoloji Demodeliği
1.Firma	57,76	51,84	67,24	49	64	54,76	54,76	60,84	46,24
2. Firma	81	64	73,96	73,96	81	60,84	60,84	43,56	57,76
3. Firma	54,76	54,76	67,24	51,84	64	54,76	51,84	77,44	43,56
4. Firma	81	77,44	67,24	51,84	73,96	64	51,84	57,76	54,76
5. Firma	88,36	70,56	70,56	60,84	77,44	73,96	54,76	57,76	51,84
A	19,049	17,849	18,607	16,955	18,984	17,559	16,554	17,244	15,942

Normalize Karar Matrisinin ikinci aşamasında, bir önceki aşamada hesaplanan Karar Matrisinin (Tablo 5.21) her bir hücre değeri, Normalize Karar Matrisinin birinci aşamasında hesaplanan karekök değerine (A değeri) bölünmesi sonucu ilgili hücreye yazılmaktadır. Bu hesaplama sonucunda Tablo 5.23 elde edilmektedir.

Tablo 5.23. *Normalize karar matrisinin 2. aşaması*

	Birlikte Çalışabilirlik	Sanallaştırma	Yerelleştirme	Gerçek Zamanlı Yetenek	Hizmet Oryantasyonu	Modülerlik	Siber Tehlike	Sistem İçi Arıza	Teknoloji Demodeliği
1.Firma	0,399	0,403	0,459	0,392	0,448	0,415	0,415	0,437	0,381
2. Firma	0,472	0,448	0,482	0,482	0,504	0,437	0,437	0,370	0,426
3. Firma	0,388	0,415	0,459	0,403	0,448	0,415	0,403	0,493	0,370
4. Firma	0,472	0,493	0,459	0,403	0,482	0,448	0,403	0,426	0,415
5. Firma	0,493	0,471	0,471	0,437	0,493	0,482	0,415	0,426	0,403

3. Adım Ağırlıklandırılmış Normalize Matrisinin Oluşturulması:

Bu adımda Ağırlıklandırılmış Normalize Matrisi oluşturulmaktadır. Bir önceki adımda hesaplanan Normalize Karar Matrisindeki tüm değerlerin, AHP Yöntemiyle hesaplanan kriterlerin önem ağırlığı (Tablo 5.9) ile çarpılarak ilgili hücreye yazılmaktadır. Bu şekilde MOORA Yöntemiyle yapılan analize kriterlerin önem ağırlıklarında eklenmiş olmaktadır.

4. Adım Yi Değerinin Hesaplanması:

MOORA Yönteminin son aşamasında kriterler fayda ve maliyet kriterleri olarak belirlenmektedir. Ağırlıklandırılmış Normalize Matrisinde herbir firmanın fayda kriteri ile maliyet kriteri ayrı ayrı toplanmaktadır. Toplanan fayda değerinden, toplanan maliyet değeri çıkartılarak Yi değeri elde edilmektedir. En yüksek Yi değerine '0,279' sahip olan 5. Firma Endüstri 4.0'a uyum sürecinde en iyi alternatif olarak belirlenmektedir.

Daha sonra ‘0,272’ değeriyle 4. Firma, ‘0,271’ değeriyle 2. Firma, ‘0,228’ değeriyle 3. Firma ve son olarak ‘0,228’ değeriyle 1. Firma takip etmektedir.

Tablo 5.24. *Ağırlıklandırılmış normalize matrisi*

	Birlikte Çalışabilirlik	Sanallaştırma	Yerleştirme	Gerçek Zamanlı Yetenek	Hizmet Oryantasyonu	Modülerlik	Siber Tehlike	Sistem İçi Arıza	Teknoloji Demodeliği
1.Firma	0,115	0,078	0,046	0,046	0,012	0,022	0,069	0,015	0,007
2. Firma	0,136	0,086	0,049	0,056	0,014	0,023	0,072	0,013	0,008
3. Firma	0,112	0,080	0,046	0,047	0,012	0,022	0,067	0,017	0,007
4. Firma	0,136	0,095	0,046	0,047	0,013	0,024	0,067	0,015	0,008
5. Firma	0,142	0,091	0,047	0,051	0,014	0,026	0,069	0,015	0,008
	Beneficial						Non-Beneficial		

Tablo 5.25. *Yi değeri*

	Yi	Rank
1.Firma	0,228	5
2. Firma	0,271	3
3. Firma	0,228	4
4. Firma	0,272	2
5. Firma	0,279	1

5.4.5. PROMETHEE II yönteminin uygulanması

Son yöntem olan PROMETHEE II Yöntemi ile firmaların Endüstri 4.0’a hangi düzeyde uyum sağladığını gerekli kriterleri baz alarak yapılan analiz sonucunda firma alternatiflerinin gelişmişlik düzeyleri gösterilmiştir.

1. Adım Karar Matrisinin Oluşturulması:

Tüm modellerde olduğu gibi PROMETHEE II Yönteminin de birinci adımında Karar Matrisi oluşturulmuştur. Ayrıca her sütunun fayda ve maliyet kriterlerinin maksimum ve minimum değerleri belirlenmiştir.

Tablo 5.26. Karar matrisi

	Birlikte Çalışabilirlik	Sanallaştırma	Yerelleştirme	Gerçek Zamanlı Yetenek	Hizmet Oryantasyonu	Modülerlik	Siber Tehlike	Sistem İçi Arıza	Teknoloji Demodeliği
1.Firma	7,6	7,2	8,2	7	8	7,4	7,4	7,8	6,8
2. Firma	9	8	8,6	8,6	9	7,8	7,8	6,6	7,6
3. Firma	7,4	7,4	8,2	7,2	8	7,4	7,2	8,8	6,6
4. Firma	9	8,8	8,2	7,2	8,6	8	7,2	7,6	7,4
5. Firma	9,4	8,4	8,4	7,8	8,8	8,6	7,4	7,6	7,2
	Fayda						Maliyet		
Kriter Ağırlıkları	0,288	0,193	0,101	0,117	0,028	0,053	0,166	0,035	0,019
Max Xij	9,4	8,8	8,6	8,6	9	8,6	7,8	8,8	7,6
Min Xij	7,4	7,2	8,2	7	8	7,4	7,2	6,6	6,6

2. Adım Fayda Ve Maliyet Değerlerin Belirlenmesi:

Yöntemin birinci adımında fayda kriteri olarak belirlenen her bir sütundaki değerden Min Xij değerinin çıkartılıp ikiye bölünmesiyle elde edilen sonucun ilgili hücreye yazılmasını ifade etmiştir. Aynı şekilde maliyet kriteri olarak belirlenen herbir sütundan Max Xij değerinin çıkartılıp ikiye bölünmesiyle elde edilen sonucun ilgili bölgeye yazılması sonucu Tablo 5.27 elde edilmiştir

3. Adım Normalize Karar Matrisinin Oluşturulması

Yöntemin üçüncü adımında, bir önceki adımda elde edilen Tablo 5.27 verilerden yararlanılarak analize devam edilmiştir. Tablo 5.27’de verilmiş olan herbir hücre değerinin kendi sütunundaki diğer hücre değerlerinden tek tek çıkartılması sonucu ilgili değer yerine yazılmıştır.

Tablo 5.27. Fayda ve maliyet değerlerin belirlenmesi

	Birlikte Çalışabilirlik	Sanallaştırma	Yerelleştirme	Gerçek Zamanlı Yetenek	Hizmet Oryantasyonu	Modülerlik	Siber Tehlike	Sistem İçi Arıza	Teknoloji Demodeliği
1.Firma	0,100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,667	0,455	0,800
2. Firma	0,800	0,500	1,000	1,000	1,000	0,333	0,000	1,000	0,000
3. Firma	0,000	0,125	0,000	0,125	0,000	0,000	1,000	0,000	1,000
4. Firma	0,800	1,000	0,000	0,125	0,600	0,500	1,000	0,545	0,200
5. Firma	1,000	0,750	0,500	0,500	0,800	1,000	0,667	0,545	0,400

Tablo 5.28. Normalize karar matrisinin oluşturulması

D(M1-M2)	-0,700	-0,500	-1,000	-1,000	-1,000	-0,333	0,667	-1,000	0,800
D(M1-M3)	0,100	-0,125	0,000	-0,125	0,000	0,000	-0,333	0,000	-0,200
D(M1-M4)	-0,700	-1,000	0,000	-0,125	-0,600	-0,500	-0,333	-0,545	0,600
D(M1-M5)	-0,900	-0,750	-0,500	-0,500	-0,800	-1,000	0,000	-0,545	0,400
D(M2-M1)	0,700	0,500	1,000	1,000	1,000	0,333	-0,667	0,545	-0,800
D(M2-M3)	0,800	0,375	1,000	0,875	1,000	0,333	-1,000	1,000	-1,000
D(M2-M4)	0,000	-0,500	1,000	0,875	0,400	-0,167	-1,000	0,455	-0,200
D(M2-M5)	-0,200	-0,250	0,500	0,500	0,200	-0,667	-0,667	0,455	-0,400
D(M3-M1)	-0,100	0,125	0,000	0,125	0,000	0,000	0,333	-0,455	0,200
D(M3-M2)	-0,800	-0,375	-1,000	-0,875	-1,000	-0,333	1,000	-1,000	1,000
D(M3-M4)	-0,800	-0,875	0,000	0,000	-0,600	-0,500	0,000	-0,545	0,800
D(M3-M5)	-1,000	-0,625	-0,500	-0,375	-0,800	-1,000	0,333	-0,545	0,600
D(M4-M1)	0,700	0,000	0,000	0,125	0,600	0,500	0,333	0,091	-0,600
D(M4-M2)	0,000	-0,500	-1,000	-0,875	-0,400	0,167	1,000	-0,455	0,200
D(M4-M3)	0,800	-0,125	0,000	0,000	0,600	0,500	0,000	0,545	-0,800
D(M4-M5)	-0,200	0,250	-0,500	-0,375	-0,200	-0,500	0,333	0,000	-0,200
D(M5-M1)	0,900	0,750	0,500	0,500	0,800	1,000	0,000	0,091	-0,400
D(M5-M2)	0,200	0,250	-0,500	-0,500	-0,200	0,667	0,667	-0,455	0,400
D(M5-M3)	1,000	0,625	0,500	0,375	0,800	1,000	-0,333	0,545	-0,600
D(M5-M4)	0,200	-0,250	0,500	0,375	0,200	0,500	-0,333	0,000	0,200

4. Adım P_j Değerinin Hesaplanması:

PROMETHEE II Yönteminin dördüncü adımında P_j değeri hesaplanmıştır. Herbir satırdaki değerin kendi sütunundaki değerlerden tek tek çıkartılması sonucu Tablo 5.28'deki

değerler elde edilmiştir. Bu adımda herbir hücrenin sıfırdan küçük veya sıfıra eşit olması durumunda ilgili bölgeye sıfır yazılmakta ve sıfırdan büyük olması durumunda kendi mevcut değerinin aynısı yazılmaktadır. Bu şekilde aşağıdaki tablo oluşturulmaktadır.

Tablo 5.29. *P_j değeri*

D(M1-M2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,667	0,000	0,800
D(M1-M3)	0,100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D(M1-M4)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,600
D(M1-M5)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,400
D(M2-M1)	0,700	0,500	1,000	1,000	1,000	0,333	0,000	0,545	0,000
D(M2-M3)	0,800	0,375	1,000	0,875	1,000	0,333	0,000	1,000	0,000
D(M2-M4)	0,000	0,000	1,000	0,875	0,400	0,000	0,000	0,455	0,000
D(M2-M5)	0,000	0,000	0,500	0,500	0,200	0,000	0,000	0,455	0,000
D(M3-M1)	0,000	0,125	0,000	0,125	0,000	0,000	0,333	0,000	0,200
D(M3-M2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	1,000
D(M3-M4)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,800
D(M3-M5)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,333	0,000	0,600
D(M4-M1)	0,700	0,000	0,000	0,125	0,600	0,500	0,333	0,091	0,000
D(M4-M2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,167	1,000	0,000	0,200
D(M4-M3)	0,800	0,000	0,000	0,000	0,600	0,500	0,000	0,545	0,000
D(M4-M5)	0,000	0,250	0,000	0,000	0,000	0,000	0,333	0,000	0,000
D(M5-M1)	0,900	0,750	0,500	0,500	0,800	1,000	0,000	0,091	0,000
D(M5-M2)	0,200	0,250	0,000	0,000	0,000	0,667	0,667	0,000	0,400
D(M5-M3)	1,000	0,625	0,500	0,375	0,800	1,000	0,000	0,545	0,000
D(M5-M4)	0,200	0,000	0,500	0,375	0,200	0,500	0,000	0,000	0,200

5. Adım $\pi(i,i')$ Değerinin Hesaplanması:

Yöntemin beşinci adımında kriterlerin önem ağırlıklarını da içeren tercih fonsiyonu $\pi(i,i')$ belirlenmiştir. Yukarıdaki tabloda (Tablo 5.29) yer alan her bir değer, AHP Yöntemiyle hesaplanan kriterlerin önem ağırlıklarıyla (Tablo 5.9) çarpımı sonucu elde

edilen değerler ilgili hücreye yazılmaktadır. Daha sonra tablodaki her bir satır toplanarak toplam değere yazılmıştır.

Tablo 5.30. $\pi(i,i')$ değerinin hesaplanması

										TOPLAM
D(M1-M2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,111	0,000	0,015	0,126
D(M1-M3)	0,029	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,029
D(M1-M4)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,011	0,011
D(M1-M5)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,008	0,008
D(M2-M1)	0,202	0,097	0,101	0,117	0,028	0,018	0,000	0,019	0,000	0,581
D(M2-M3)	0,230	0,072	0,101	0,102	0,028	0,018	0,000	0,035	0,000	0,587
D(M2-M4)	0,000	0,000	0,101	0,102	0,011	0,000	0,000	0,016	0,000	0,230
D(M2-M5)	0,000	0,000	0,050	0,059	0,006	0,000	0,000	0,016	0,000	0,131
D(M3-M1)	0,000	0,024	0,000	0,015	0,000	0,000	0,055	0,000	0,004	0,098
D(M3-M2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,166	0,000	0,019	0,185
D(M3-M4)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,015	0,015
D(M3-M5)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,055	0,000	0,011	0,067
D(M4-M1)	0,202	0,000	0,000	0,015	0,017	0,027	0,055	0,003	0,000	0,318
D(M4-M2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,009	0,166	0,000	0,004	0,179
D(M4-M3)	0,230	0,000	0,000	0,000	0,017	0,027	0,000	0,019	0,000	0,293
D(M4-M5)	0,000	0,048	0,000	0,000	0,000	0,000	0,055	0,000	0,000	0,104
D(M5-M1)	0,259	0,145	0,051	0,059	0,022	0,053	0,000	0,003	0,000	0,592
D(M5-M2)	0,058	0,048	0,000	0,000	0,000	0,035	0,111	0,000	0,008	0,259
D(M5-M3)	0,288	0,121	0,051	0,044	0,022	0,053	0,000	0,019	0,000	0,597
D(M5-M4)	0,058	0,000	0,051	0,044	0,006	0,027	0,000	0,000	0,004	0,188

6. Adım Giriş ve Çıkış Akışı

Yöntemin bu adımında belirlenen firma alternatiflerinin kendi aralarında karşılaştırılmalı analizi yapılmıştır. Tablo 5.31’de Giriş ve Çıkış Akışı sonuçları, Tablo 5.30’da verilen değerler kullanılarak hesaplanmıştır. Buna göre her bir alternatifin, diğer alternatiflerle karşılaştırıldığında ilgili toplam değer ilgili bölüme yazılmıştır. Örneğin 1. firma ile 2. firma karşılaştırıldığında D(M1-M2) satırındaki toplam değer hesaplanarak tabloda gösterilmiştir.

Tablo 5.31. Giriş ve çıkış akışı

	1. Firma	2. Firma	3. Firma	4. Firma	5. Firma	Q+ Leaving Flow
1.Firma	-	0,126	0,029	0,011	0,008	0,043
2. Firma	0,581	-	0,587	0,230	0,131	0,382
3. Firma	0,098	0,185	-	0,015	0,067	0,091
4. Firma	0,318	0,179	0,293	-	0,104	0,223
5. Firma	0,592	0,259	0,59749091	0,187875	-	0,409
Q- Entering Flow	0,397	0,187	0,376	0,111	0,077	

Sonraki aşamada çıkış akışı ve giriş akışı hesaplanmıştır. Çıkış akışı, Tablo 5.31’deki her bir satırın toplanıp, (n-1)’e bölünmesi ve giriş akışı ise aynı şekilde her bir sütunun tek tek toplanıp, (n-1)’e bölünmesiyle ortalaması alınmıştır.

7. Adım $Q(a)$ Net Geçiş Akışı

Son adımda herbir alternatif için net geçiş akışı belirlenmiştir. Tablo 5.32’de verilen $Q(a)$ değeri, çıkış akışından giriş akışının çıkartılması sonucu bulunmuştur. En yüksek $Q(a)$ değerine sahip firma en iyi alternatif olarak belirlenmiştir.

Tablo 5.32. $Q(a)$ net geçiş akışı

6. Adım				
	Q+ Leaving Flow	Q- Entering Flow	$Q(a)$	RANK
1.Firma	0,043	0,397	-0,354	5
2. Firma	0,382	0,187	0,195	2
3. Firma	0, 091	0,376	-0,285	4
4. Firma	0,223	0,111	0,112	3
5. Firma	0,409	0,077	0,332	1

Bu doğrultuda PROMETHEE II Yöntemiyle matematiksel verilerle yapılan analiz sonucunda firmaların Endüstri 4.0’a uyum süreci incelenmiştir. $Q(a)$ değeri ‘0,332’ değerine sahip olan 5. Firma en iyi alternatif olarak tespit edilmiştir.

Sıralamayı ‘0,195’ değeriyle 2. Firma, ‘0,112’ değeriyle 4. Firma, ‘-0,285’ değeriyle 3. Firma olarak belirlenmiştir. Endüstri 4.0’ı kendi bünyesine entegre etmekte zorlanan ve Q(a) değeri ‘-0,354’ olan 1. Firma, alternatifler arasında en sonda yer almıştır.

5.4.6. Tüm analizlerin sonuçları

Bu bölümde Gaziantep ilinde faaliyette bulunan tekstil firmalarının VIKOR, COPRAS, MOORA ve PROMETHEE II yöntemleriyle Endüstri 4.0’a uyum sağlama derecelerine göre sıralaması aşağıdaki Tablo 5.33’de verilmiştir.

Tablo 5.33. Firmaların tüm yöntemlere ait performans sıralaması

	VIKOR	COPRAS	MOORA	PROMETHEE II
1.Firma	4	5	5	5
2. Firma	3	3	3	2
3. Firma	5	4	4	4
4. Firma	2	2	2	3
5. Firma	1	1	1	1

Firmaların Endüstri 4.0’a olan uyumunu ölçebilmek için hangi kriterlerin belirleyici olduğunu ve bu kriterlerin kullanılan yöntemlere nasıl entegre olması gerektiği incelenmiştir. Analizin ilk basamağında belirlenen kriterlerin önem ağırlıkları hesaplanmıştır. AHP yöntemiyle hesaplanan önem ağırlıkları, Endüstri 4.0’ı benimsemek isteyen firmaların baz alması gereken bir ölçüt olarak belirlenmiştir. Firmaların bu ölçüte uygun bir stratejik yol haritası belirlemeleri rakipleri karşısında üstünlükle beraber piyasa kontrolünde avantajlı konuma gelebilmelerini sağlamaktadır. Analizin ikinci basamağında, firmaların hangi oranda Endüstri 4.0’a uyum sağladığını ölçebilmek için farklı yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemlerin, son zamanlarda kullanım alanları oldukça genişlemiş olup analiz açısından da kullanım kolaylığı sağlamaktadırlar. VIKOR, COPRAS, MOORA, PROMETHEE II yöntemleri kullanılarak yapılan analizler sonucunda firmalar Endüstri 4.0’ı benimseme decerelerine göre sıralanmıştır. Tablo 5.33’de görüldüğü üzere COPRAS ve

MOORA yöntemlerinin sıralama sonuçları aynıdır. Bu iki yöntem birbirini destekleyici niteliktedir. Özbek ve Erol yaptığı çalışmada COPRAS ve MOORA yöntemlerini kullanarak analiz yapmışlar ve aynı sonuçları elde etmişlerdir. Diğer yandan COPRAS yöntemi, alternatifleri birbirleriyle karşılaştırırken en iyi ve en kötü alternatifleri yüzdesel olarak hesaplamaktadır. Bu özelliğinden dolayı VIKOR yönteminden farklılık göstermiştir. PROMETHEE II yöntemi sıralama yaparken pozitif ve negatif değerleri analiz ederek tam üstünlük değeri elde etmekte ve sıralamayı bu üstünlük değerine göre oluşturmaktadır. PROMETHEE II yönteminin bu özelliğinden dolayı MOORA ve COPRAS yöntemine göre farklı sonuçlara elde edilmiştir (Özbek ve Erol, 2016: 36).

VIKOR ve PROMETHEE II yönteminin sıralamasında bazı sapmaların olması bu yöntemlerin ilk aşamalarında fayda ve maliyet odaklı analizin yapılmasından kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır. Debbarma vd. VIKOR ve PROMETHEE II yöntemlerini kullanarak yaptıkları analiz sonucunda farklı sonuçlar elde etmişlerdir (Debbarma vd. 2017: 12).

6. SONUÇ

Endüstri 4.0 üretim anlayışı, geleneksel üretimin aksine otonom bir yapıda, hızlı bir üretim yapabilmesi ve sistematik bilgi akışı sağlayarak üretimin her sürecine müdahale edebilmesi gibi avantajları bulunmaktadır. Küreselleşmenin de etkisiyle firmalar kendi çevrelerinden çıkarak istedikleri piyasaya istedikleri ölçüde girebilmektedirler. Söz konusu durum firmalar açısından olumlu olarak düşünülse de yenilikçi üretim anlayışına sahip olmayan firmaların bu piyasalarda mevcut konumlarını koruyabilmeleri imkânsız olarak görülmektedir. Ayrıca geleneksel üretim anlayışı olan yalın üretim modeliyle sürekli değişkenlik gösteren müşteri isteklerinin karşılanamaması müşteri memnuniyetsizliğine neden olmaktadır. Mevcut üretim potansiyelini devam ettirmek ve geliştirmek isteyen firmaların dijital dönüşümü destekleyen Endüstri 4.0 üretim modelini proseslerinde uygulamaya başlamaları gerekmektedir.

Bu çalışmada endüstrinin son jenerasyonu olan Endüstri 4.0 teknolojisine firmaların uyum süreci incelenmiştir. Uzman görüşlerin yanı sıra matematiksel veriler kullanılarak

firmaların bu yeni üretim sistemine hangi oranda uyum sağladığı yapılan analizler sonucunda gösterilmiştir.

Firmalar, Endüstri 4.0 teknolojisini kendi sistemlerine adapte edebilmesi için gerekli temel tasarım ilkeleri bulunmaktadır. Bu tasarım ilkelerinin sanayileşme evresinde aynı oranda etkisi olmadığı gibi firmalar tarafından da aynı oranda benimsenmemektedir. Bu nedenle Endüstri 4.0'a entegre olmak isteyen firmaların bu ilkeleri hangi oranda benimsenmesi gerektiğine karar verebilmek için AHP Yöntemini kullanarak önem ağırlığı hesaplaması yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda tasarım ilkeleri en fazla öneme sahip olandan en az öneme sahip olana doğru bir sıralama yapılmıştır. AHP Yönteminin son aşamasında ise tutarlılık oranı hesaplanmıştır. Tutarlılık oranı, karar vericilerin tasarım ilkelerini Saaty Önem Ölçeğini baz alarak değerlendirilmesi sonucunda oluşturulmuş olan karar matrisinin tutarlılığını göstermiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda tutarlılık oranı istenilen değerin üstünde olması durumunda, karar vericilerin karar matrisini oluştururken tutarlı davranmadığı ve tekrar karar matrisi oluşturulması gerekliliği sonucuna ulaşılmıştır.

Bu doğrultuda çalışmanın dördüncü bölümünde AHP Yöntemi kullanılarak genel tasarım ilkelerinin önem ağırlıkları oluşturulmuştur. Yapılan yöntem analizi sonucunda firmaların Endüstri 4.0'a entegre sürecini incelememizde yardımcı olacak tasarım kriterlerinin AHP Yöntemine göre analizi yapıldığında, '0,2885' değerlendirme puanı olarak en yüksek önem ağırlığına sahip olan Birlikte Çalışabilirlik sıralamada birinci sırada yer almaktadır. İkinci sırada '0,1926' önem ağırlığıyla Sanallaştırma yer almaktadır. Sıralamayı '0,1657' puanla Siber Tehlike, '0,1168' puanla Gerçek Zamanlı Yetenek, '0,1009' puanla Yerelleştirme, '0,0532' puanla Modülerlik, '0,0354' puanla Sistem İçi Arıza, '0,0277' puanla Hizmet oryantasyonu ve son olarak '0,0192' puanla Teknoloji Demodeliği takip etmektedir. Tutarlılık oranına bakıldığında elde edilen değerin 0,10'dan küçük olması istenmektedir. Yapılan analiz sonucunda elde edilen 0,0778 tutarlılık değerinin 0,10'dan küçük olması karar vericilerin karar matrisini tutarlı bir şekilde oluşturduğunu göstermiştir.

Ghobakhloo (2018)'de yaptığı çalışmada 150'den fazla kaynağı inceleyerek Endüstri 4.0 tasarım ilkelerini ve teknoloji trendlerini belirlemiş ve imalat sektörü için bir yol haritası oluşturmaya çalışmıştır. Gilchrist (2016)'da Endüstri 4.0 hakkında ayrıntılı bilgi vererek,

temel tasarım ilkeleri hakkında genel görüş oluşturmuştur. Üreticiler, Endüstri 4.0 tasarım ilkeleriyle sistem içerisinde bilgi akışını sağlayan otonom üretimi kendi bünyesine nasıl uyumlu hale getireceğine dair bir prosedür oluşturmalsının gerekliliğini belirtmiştir.

Çalışmanın önemli bir diğer aşaması da matematiksel analiz sonucunda elde edilen tasarım kriterlerinin önem ağırlıkları, firmalara uygulanarak Endüstri 4.0'a hangi ölçüde uyum sağladığı gösterilmiştir. Gaziantep ilinde faaliyet gösteren 5 tekstil firmasına, uygulanan detaylı analizler sonucunda elde edilen 9 tasarım kriterine göre değerlendirilmesi yapılmıştır. Birçok kriter karşısında en iyi alternatifini seçmek için yapılan değerlendirmede Çok Kriterli Karar Verme yöntemleri kullanılmıştır.

Çok Kriterli Karar Verme yöntemleri kapsamlı bir konu olup birçok yöntemi kendi içerisinde barındırmaktadır. Çalışmanın analiz kısmında Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinden VIKOR, COPRAS, MOORA ve PROMETHEE II yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemler karmaşık konulara optimum çözüm elde etmesi, esnek uygulanabilir bir alana sahip olması, hızlı ve kolay analiz edilebilmesi gibi sağladığı avantajlardan dolayı tercih edilmiştir.

Sözel verileri sayısal işleme çevirilerek yapılan analizde, karar vericiler önceden belirlenmiş olan tekstil firmalarını 9 tasarım kriterine göre 10 üzerinden değerlendirilmesi yapılmıştır. Puanlama sisteminde 10 en yüksek puan olarak kabul edilirken iken 1 en düşük puana karşılık gelmektedir. Değerlendirmede 5 ayrı karar verici tarafından yapılan 5 ayrı karar matrisinin aritmetik ortalaması alınarak temel matris değeri belirlenmiştir. Ayrıca elde edilen karar matrisi ve AHP yöntemiyle belirlenen kriterlerin önem ağırlıkları çalışmanın devamında kullanılacak olan tüm yöntemlerde (VIKOR, COPRAS, MOORA ve PROMETHEE II Yöntemleri) veri olarak kullanılmıştır.

Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri, birçok kriter karşısında en iyi alternatifini belirleme esaslı çalışmaktadır. Yöntemler amaçsal olarak aynı doğrultuda olsalarda yöntemlerin analiz işlemleri farklılık göstermektedir. Bu nedenle çalışmada VIKOR, COPRAS, MOORA ve PROMETHEE II yöntemlerini kullanarak yapılan matematiksel analiz sonuçlarında bazı farklılıklar bulunmaktadır. Çalışmada kullanılmış olan PROMETHEE II ve VIKOR yöntemlerinde, en iyi alternatifini bulurken kriterleri fayda ve

maliyet yönlü olarak gruplandırmakta ve yapılacak olan analizler bu doğrultuda devam etmektedir. Ahmed vd (2024)'de yaptığı çalışmasında PROMETHEE II ve VIKOR yöntemlerinin sonuçlarını karşılaştırmış farklı sonuçlar elde etmiştir. PROMETHEE II yöntemi, bir alternatiflerin birbirine görece üstünlük sağlama veya tercih edilme derecesine göre değerlendirilen bir yöntem olduğunu belirtirken, VIKOR yöntemi, alternatiflerin ayrı ayrı performanslarını değerlendiren, ideal çözüme odaklı bir yöntem olarak açıklamıştır.

MOORA ve COPRAS yöntemlerinde kriterlerin nitelikleri dikkate alınmadan analizler bir bütün olarak devam etmekte ve elde edilen analiz sonuçlarının tutarsızlık olmadığını saptanmıştır. Ömürbek ve Eren (2016)'da yıllara göre oran analizi yapmıştır. Çalışmada kullanılan MOORA ve COPRAS yöntemlerinin analiz sonuçları birbiriyle eşleştiği ve PROMETHEE II yöntemiyle farklılıkların olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Sonuç olarak firma alternatifleri belirlenen kriterleri baz alarak her yöntem için ayrı ayrı analiz yapılmıştır. Bu doğrultuda COPRAS ve MOORA yönteminin firma alternatiflerini sıralamada eşleştiği görülmüştür. Buna göre Endüstri 4.0'a uyum sağlayan en iyi firmanın birinci sırada yer alan 5. Firma olduğu, ikinci sırada 4. Firma, üçüncü sırada 2. Firma, dördüncü sırada 3. Firma ve en son sırada 1. Firma olduğu görülmüştür.

VIKOR yönteminin analiz sonuçlarına bakıldığında bu sıralama küçük farklılıklar dışında COPRAS ve MOORA yöntemine benzerlik göstermektedir. Buna göre birinci sırada 5. Firma, ikinci sırada 4.firma, üçüncü sırada 2. Firma, dördüncü sırada 1. Firma ve son sırada 3. Firma olmuştur. PROMETHEE II yöntemine göre birinci sırada yer alan 5. Firma en iyi alternatif olduğu, ikinci sırada 2. Firma, üçüncü sırada 4. Firma, dördüncü sırada 3. Firma ve en son sırada 1. Firma olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan hesaplamalar doğrultusunda bu dört yöntemin Endüstri 4.0'a uyum sağlayan en iyi alternatifi 5. Firma olduğu ve sonraki sıralamalarda bazı farklılıkların bulunduğu belirlenmiştir.

Gaziantep ilindeki tekstil firmalarının Endüstri 4.0 üretim sistemine başlangıç ve olgunluk düzeylerinin belirlenmesi açısından farkındalık oluşturmaktadır. Dijitalleşmeyle hayatımıza giren Endüstri 4.0'ın öneminin anlaşılması, bilinçlenmesi ve doğru algılanması tekstil firmalarına sektörel bazda rekabet avantajı sağlayabilir ve endüstriyel bir değer

katabilir. Son zamanlarda firmaların konumlarını koruyabilmeleri ve geliştirebilmeleri açısından yenilikçi üretim anlayışını kendi üretim sistemlerine uygulaması zorunludur.

Tekstil firmalarının Endüstri 4.0'a uyum sürecine ne kadar hazırlıklı olduğunu anlamamız açısından önemli bir bakış açısı sunmuştur. Gelecekte yapılacak olan çalışmalarda kullanılan kriterler ve ÇKKV yöntemleri genişletilerek daha kapsamlı analizler yapılabilir. Ayrıca tek bir sektörle sınırlı kalmayarak sektörler arası veya dünya çapında analizler de yapılarak Endüstri 4.0'a olgunluk seviyeleri belirlenebilir. Bu şekilde ülkelerin performansını arttırarak gelişmişlik düzeylerine katkı sağlanabilir.

2016 yılındaki TUBİTAK verilere göre Ülkemizin dijital dönüşüm düzeyinin Endüstri 4.0 seviyesinin altında olduğu belirtilmiştir (Yıldız, 2018: 548). Yapılacak üretim yöntemi politikalarıyla bu seviyeyi üst düzeye çıkartılabilir. Bu çalışma yapılacak olan iyileştirme çalışmalarına ışık tutması amaçlanmıştır. Sonraki nitel ve nicel çalışmalara yol gösterici niteliktedir.

Yapılan çalışmadan elde edilen çıkarıma göre firma alternatifleri yapılan analiz sonuçlarına göre mevcut durumlarını gözden geçirmesi istenmekte ve eksik olan yanlarını geliştirerek Endüstri 4.0'a uyumlu hale gelebileceği öngörülmektedir.