



**ENDÜSTRİ 4.0 TEKNOLOJİK OLGUNLUK DÜZEYİNİN MODELLENMESİ:
BEYAZ EŞYA SEKTÖRÜ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA**

MELİKE SELEN DERMENCİ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Aysun SAĞBAŞ

2023

T.C.
TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ENDÜSTRİ 4.0 TEKNOLOJİK OLGUNLUK DÜZEYİNİN MODELLENMESİ:
BEYAZ EŞYA SEKTÖRÜ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

MELİKE SELEN DERMENCİ

ORCID: 0000-0001-9429-8829

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Danışman: Prof. Dr. Aysun SAĞBAŞ

TEMMUZ-2023

Her hakkı saklıdır.

ÖZET

ENDÜSTRİ 4.0 TEKNOLOJİK OLGUNLUK DÜZEYİNİN MODELLENMESİ: BEYAZ EŞYA SEKTÖRÜ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

Melike Selen DERMENCİ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Aysun SAĞBAŞ

Endüstri 4.0'ın ortaya çıkışı ile birlikte, üretim işletmeleri teknolojik ve ekonomik gelişmelerin yanı sıra, çevresel ve toplumsal değişimlerle de karşı karşıya kalmışlar. Hızlı ve köklü değişimlerin yaşandığı bu süreçte, işletmeler daha çevik ve duyarlı üretim sistemlerine ihtiyaç duymaktadırlar. Sürekli gelişen ve değişen talepleri karşılamak ve pazardaki rekabet gücünü kaybetmek istemeyen işletmeler; verimlilik, esneklik ve üretkenlik kavramları üzerine odaklanmışlardır. Endüstri 4.0 ile hayatımıza giren yeni nesil teknolojilerin bizlere sunduğu çalışma ve üretim ortamı bu üç faktörü desteklemektedir. Tüm bu gelişmeler göz önünde bulundurulduğunda; işletmelerin pazar paylarını artırmak ve sürdürülebilir bir üretim anlayışı geliştirmek için, endüstri 4.0'ın getirdiği teknolojik gelişmeleri benimsemeleri gerektiği söylenebilir. Yapılan çalışmada; işletmelerin endüstri 4.0 olgunluk seviyelerini ölçmek için, endüstri 4.0'ın bünyesinde bulundurduğu yeni nesil teknolojileri kapsayan bir olgunluk modeli ortaya konulmuş olup, beyaz eşya sektöründe bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, geliştirilen olgunluk modelinde yer alan ana ve alt kriter ağırlıklarının belirlenmesi amacı ile Analitik Hiyerarşi Prosesi yöntemi kullanılmış olup, bu amaçla çalışmanın yapıldığı işletmede çalışan ve konu üzerinde uzman kişilerin değerlendirmeleri baz alınmıştır. İkinci aşamada, incelenen olgunluk modelinde bulunan fabrika 4.0, lojistik 4.0, yönetim 4.0 ve operatör 4.0 ana boyutları için teknolojik olgunluk seviyesinin sıralaması belirlenmesi. İdeal Sonuç Odaklı Çok ölçütlü Karar Verme Yöntemi olarak bilinen TOPSIS yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçta; endüstri 4.0 ekseninde, belirlenen kriterler için, çalışmanın yapıldığı işletmenin teknolojik olgunluk düzeyi belirlenmiş ve çalışmada sunulan modelin farklı sektörlerde faaliyet gösteren işletmelere dijital dönüşüm konusunda yol gösterici olması hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler:Endüstri 4.0, Olgunluk modeli, Beyaz eşya sektörü, Dijital dönüşüm, Teknoloji entegrasyonu, AHP, TOPSIS

ABSTRACT

MODELING INDUSTRY 4.0 TECHNOLOGICAL MATURITY LEVEL: A STUDY ON THE WHITE GOODS INDUSTRY

Melike Selen DERMENÇİ

Department of Industrial Engineering

MSc. Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Aysun SAĞBAŞ

With the emergence of Industry 4.0, manufacturing enterprises faced environmental and social changes as well as technological and economic developments. In this process of rapid and radical changes, businesses need more agile and sensitive production systems. Businesses that do not want to meet the constantly developing and changing demands and lose their competitive power in the market; focused on the concepts of efficiency, flexibility and productivity. The working and production environment offered to us by the new generation technologies that entered our lives with Industry 4.0 supports these three factors. Considering all these developments; It can be said that enterprises should adopt the technological developments brought by industry 4.0 in order to increase their market share and develop a sustainable production approach. In the study; In order to measure the industry 4.0 maturity level of enterprises, a maturity model covering the new generation technologies included in industry 4.0 has been put forward and an application has been carried out in the white goods sector. First of all, the Analytical Hierarchy Process method was used to determine the weights of the main and sub-criteria in the developed maturity model, and for this purpose, the evaluations of the experts working in the enterprise where the study was carried out were taken as a basis. In the second stage, the factory 4.0, logistics 4.0, The ranking of the technological maturity level for the management 4.0 and operator 4.0 main dimensions was carried out with the TOPSIS method, known as the Ideal Result Oriented Multi-criteria Decision Making Method. After all; In the axis of industry 4.0, the technological maturity level of the business where the study was conducted was determined for the determined criteria, and the model presented in the study was aimed to guide businesses operating in different sectors on digital transformation

Keywords: Industry 4.0, Maturity model, White goods industry, Digital transformation, Technology integration, Assessment model, AHP, TOPSIS

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
SİMGELER DİZİNİ	viii
KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
TEŞEKKÜR.....	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	2
1.2. Çalışmanın Kısıtları	3
1.3. Literatür Özeti	3
2. TARİHTE ENDÜSTRİ DEVRİMLERİ	12
2.1. Birinci Sanayi Devrimi (Endüstri 1.0)	12
2.2. İkinci Sanayi Devrimi (Endüstri 2.0).....	15
2.3. Üçüncü Sanayi Devrimi (Endüstri 3.0).....	19
2.4. Dördüncü Sanayi Devrimi (Endüstri 4.0)	22
3. ENDÜSTRİ 4.0 KAVRAMI VE TEMEL BİLEŞENLERİ.....	25
3.1. Endüstri 4.0 Kavramı	25
3.2. Endüstri 4.0'ın Temel İlkeleri	27
3.3. Endüstri 4.0 Avantaj- Dezavantajları ve Muhtemel Etkileri.....	28
3.4. Endüstri 4.0 Bileşenleri.....	29
3.4.1. Siber Fiziksel Sistemler	29
3.4.2. Büyük Veri ve Analizi	31
3.4.3. Nesnelerin İnterneti.....	32
3.4.4. Otonom Robotlar	34
3.4.5. Yatay-Dikey Entegrasyon	35
3.4.6. Simülasyon.....	36
3.4.7. Bulut Bilişim Sistemleri	36
3.4.7. Eklemeli İmalat / Üç Boyutlu Yazıcılar.....	38
3.4.8. Siber Güvenlik	38
3.4.9. Arttırılmış Gerçeklik	39
3.4.10. Akıllı Fabrikalar	39

4. ENDÜSTRİ 4.0 OLGUNLUK MODELLERİ.....	41
4.1. IMPULS-Endüstri 4.0 Hazırlık Modeli	42
4.2. Endüstri 4.0 Öz Değerlendirme Modeli.....	42
4.3. Endüstri 4.0 Hazırlık ve Olgunluk Modeli	43
4.4. Bağlı Kuramsal Olgunluk Modeli.....	43
4.5. SIMMI Olgunluk Modeli	43
4.6. TÜBİTAK Dijital Olgunluk Modeli	44
4.7. Akıllı İşletmeler İçin Endüstri 4.0 Hazırlık ve Olgunluk Modeli	44
5. MATERYAL VE YÖNTEM.....	45
5.1. İşletme Hakkında Genel Bilgi.....	45
5.2. Çalışmanın Gerçekleştirildiği Alan.....	45
5.3. Olgunluk Modelinin Oluşturulması	46
5.4. Olgunluk Modelinde Yer Alacak Kriterlerin Belirlenmesi.....	48
5.4.1. Fabrika 4.0	50
5.4.2. Lojistik 4.0	56
5.4.3. Yönetim 4.0.....	58
5.4.4. Operatör 4.0	60
5.5. Endüstri 4.0 Olgunluk Modelinin Değerlendirme Süreci	63
5.5.1. AHP Yaklaşımı	63
5.5.2. TOPSIS Yaklaşımı.....	67
6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	71
6.1. Beyaz Eşya Sektöründe Endüstri 4.0 Teknolojik Olgunluk Modelinin Uygulanması	71
6.2. AHP Metodunun Uygulanması.....	71
6.3. TOPSIS Metodunun Uygulanması	76
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	85
KAYNAKLAR	88
EK-1. ÇALIŞMAYA KATILAN UZMANLARIN PROFİLLERİ	92
EK-2. ANALİTİK HİYERARŞİ PROSESİ ANKET ÇALIŞMASI	93
EK-3. ANA BOYUTLARA İLİŞKİN UZMAN GÖRÜŞLERİ (AHP YÖNTEMİ İLE)	94
EK-4. FABRİKA 4.0 BOYUTUNA İLİŞKİN UZMAN GÖRÜŞLERİ (AHP YÖNTEMİ İLE).....	97
EK-5. LOJİSTİK 4.0 BOYUTUNA İLİŞKİN UZMAN GÖRÜŞLERİ (AHP YÖNTEMİ İLE).....	104

EK-6. YÖNETİM 4.0 BOYUTUNA İLİŞKİN UZMAN GÖRÜŞLERİ (AHP YÖNTEMİ İLE).....	105
EK-7.OPERATÖR 4.0 BOYUTU UZMAN GÖRÜŞLERİ (AHP YÖNTEMİ İLE).107	
EK-8. FABRİKA 4.0 BOYUTU BİRLEŞTİRİLMİŞ KARAR MATRİSİ.....	108
EK-9. LOJİSTİK 4.0 BOYUTU BİRLEŞTİRİLMİŞ KARAR MATRİSİ	109
EK-10. YÖNETİM 4.0 BOYUTU BİRLEŞTİRİLMİŞ KARAR MATRİSİ.....	110
EK-11. OPERATÖR 4.0 BOYUTU BİRLEŞTİRİLMİŞ KARAR MATRİSİ.....	111
EK-12. FABRİKA 4.0 BOYUTU NORMALİZE KARAR MATRİSİ	112
EK-13. LOJİSTİK 4.0 BOYUTU NORMALİZE KARAR MATRİSİ	113
EK-14. YÖNETİM 4.0 BOYUTU NORMALİZE KARAR MATRİSİ	114
EK-15. OPERATÖR 4.0 BOYUTU NORMALİZE KARAR MATRİSİ	115
EK-16. TOPSIS DEĞERLENDİRME ANKETİ	116
EK-17. FABRİKA 4.0 BOYUTU İÇİN UZMAN GÖRÜŞLERİ (TOPSIS YÖNTEMİ İLE)	117
EK-18. LOJİSTİK 4.0 BOYUTU İÇİN UZMAN GÖRÜŞLERİ (TOPSIS YÖNTEMİ İLE)	118
EK-19. YÖNETİM 4.0 BOYUTU İÇİN UZMAN GÖRÜŞLERİ.....	119
EK-20. OPERATÖR 4.0 BOYUTU İÇİN UZMAN GÖRÜŞLERİ (TOPSIS YÖNTEM İLE)	120
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Literatür matrisi	10
Çizelge 1.2. Literatür matrisi (devamı)	11
Çizelge 5.1. Fabrika 4.0 boyutu alt kriterleri.....	51
Çizelge 5.2. Lojistik 4.0 boyutu alt kriterleri	56
Çizelge 5.3. Yönetim 4.0 boyutu alt kriterleri.....	58
Çizelge 5.4. Operatör 4.0 boyutu alt kriterleri.....	61
Çizelge 5.5. Rastgele index değerleri (Saaty,1990)	66
Çizelge 5.6. TOPSIS yöntemi değerlendirme seviyeleri.....	68
Çizelge 6.1. Ana boyutların birleştirilmiş karar matrisi	72
Çizelge 6.2. Ana boyutların normalize karar matrisi.....	72
Çizelge 6.3. Ana kümenin AHP tutarlılık sonuçları.....	72
Çizelge 6.4. Alt boyutlara ait AHP tutarlılık sonuçları	73
Çizelge 6.5. AHP kriterlerinin ağırlıklandırılmış değerleri.....	74
Çizelge 6.6. A1 boyutu alt kriterlerine ait uzman görüşleri	77
Çizelge 6.7. A2 boyutu alt kriterlerine ait uzman görüşleri	77
Çizelge 6.8. A3 boyutu alt kriterlerine ait uzman görüşleri	78
Çizelge 6.9. A4 boyutu alt kriterlerine ait uzman görüşleri	78
Çizelge 6.10. A1 boyutu kriterlerine ait ağırlıklı uzman görüşleri.....	79
Çizelge 6.11. A2 boyutu kriterlerine ait ağırlıklı uzman görüşleri.....	79
Çizelge 6.12. A3 boyutu kriterlerine ait ağırlıklı uzman görüşleri.....	80
Çizelge 6.13. A4 boyutu kriterlerine ait ağırlıklı uzman görüşleri.....	80
Çizelge 6.14. Alt kriterlerin pozitif ideal ve negatif ideal puanları.....	81
Çizelge 6.15. Alt kriterlerin ağırlıklandırılmış pozitif ideal ve negatif ideal puanları	82
Çizelge 6.16. Alt kriterlerin pozitif ideal ve negatif ideal çözümlere uzaklığı	83
Çizelge 6.17. Endüstri 4.0 teknolojik olgunluk seviyeleri	83

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Endüstri 4.0 genel görünümü (Alçın, 2016).....	27
Şekil 3.2. Endüstri 4.0 bileşenleri (TÜSİAD)	29
Şekil 3.3. Siber fiziksel sistemlerin yapısı (Drath ve Horch, 2014)	30
Şekil 3.4. IoT ‘un evrimi (Manavalan ve jayakrishna, 2019).....	33
Şekil 3.5. Nesnelerin internetinin katmanları (Gökrem ve Bozuklu, 2016).....	34
Şekil 3.6. Bulut bilişim faktörleri (Banger, 2016).....	37
Şekil 3.7. Akıllı fabrikaların çerçevesi (Wang, Wan, Li ve Zhang, 2016).....	40
Şekil 5.1. Teknolojik olgunluk modeli geliştirme aşamaları.....	47

SİMGELER DİZİNİ

A_{ij}	Standart Karar Matrisi
A'_{ij}	Normalleştirilmiş Karar Matrisi
w	Özvektör Matrisi
A''_{ij}	Ağırlıklandırılmış ve Normalize Edilmiş Karar Matrisi
S^*	Pozitif ideal
S^-	Negatif İdeal
r_{ij}	Uzman Değerlendirmeleri
v_{ij}	Ağırlıklandırılmış Uzman Değerlendirmeleri
r_j^*	Pozitif İdeal Çözüm
r_j^-	Negatif İdeal Çözüm
v_j^*	Ağırlıklandırılmış Pozitif İdeal Çözüm
v_j^-	Ağırlıklandırılmış Negatif İdeal Çözüm

KISALTMALAR DİZİNİ

AHP	Analytic Hierarchy Process
BBH	Bulanık Bilişsel Haritalama
CAD	Computer Aided Design
CC	Correlation Coefficient
CI	Consistency Index
CNC	Computer Numerical Control
CR	Consistency Ratio
DLP	Digital Light Processin
DEMATEL	The Decision Making Trial and Evaluation Laboratory
FDM	Fused Deposition Modeling
IoT	Internet of Things
MACBETH	Measuring Attractiveness by Categorical Based Evaluation Technique
NC	Numerical Control
OEE	Overall Equipment Effectiveness
RFID	Radio Frequency Identification
RI	Random Index
SIMMI	System Integration Maturity Model for Industry 4.0
SLA	Stereolithography
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübesi ile bana daima yol gösteren ve desteğini esirgemeyen danışmanım sayın Prof. Dr.Aysun SAĞBAŞ'a teşekkürü bir borç bilirim. Hayatımın her aşamasında olduğu gibi yüksek lisans sürecimde de her zaman yanımda olan ve benden desteklerini esirgemeyen canım annem Nesrin Dermenci ve canım babam Tamer Dermenci 'ye sonsuz teşekkür ederim.

Melike Selen DERMENCI

Endüstri Mühendisi

1. GİRİŞ

18. Yüzyılın sonlarında buhar makinasının icat edilmesi ile başlayan sanayi devrimleri, ilerleyen zamanla birlikte, elektrik enerjisinin kullanılması ile seri üretime geçilmesine daha sonra da Dijital Devrim olarak adlandırılan 3.sanayi devrimi ile birlikte üretimde dijitalleşmenin başlamasına yol açmıştır. Şu an içinde bulunduğumuz dönemi kapsayan endüstri 4.0 kavramı ise üretim ve hizmet alanında faaliyet gösteren işletmeler için farklı iş süreçlerinde uygulayabileceği çeşitli teknolojiler sunmaktadır. Endüstriyel alanlara dahil olmaya başlayan yeni nesil teknolojiler ile tüketici davranışları karşısında daha esnek, piyasa koşulları karşısında daha dayanıklı konumlanan üretim ve yönetim sistemlerinin oluşturulması amaçlamaktadır. Bununla birlikte farklı iş süreçlerine entegre edilen yeni nesil teknolojiler ile birlikte daha az maliyet, daha hızlı üretim ve daha az kaynak tüketimi konuları da günümüzde önem kazanmış ve endüstri 4.0'ın yanı sıra sürdürülebilirlik kavramı da işletmelerin önceliği olmuştur. Bu doğrultuda baktığımızda üçüncü sanayi devriminde makro bilgisayarların kullanımı ile başlayan dijitalleşme süreci hayatımıza giren yeni teknolojiler ile dördüncü sanayi devriminde de hız kesmeden devam etmektedir.

Hızlı ve radikal gelişmelerin meydana geldiği bu süreçte işletmelerde çeşitli zorluklar ile karşı karşıya kalmaktadırlar. Her gün gelişen ve değişen istekleri karşılamak ve pazarda güçlü bir konuma sahip olmak bu zorluklar içerisinde ilk sırada yer almaktadır. Günümüzde bir işletmenin pazarda yüksek bir rekabet gücüne sahip olmasına katkı sağlayan faktörler de verimlilik, esneklik ve üretkenlik üçlüsüdür. Endüstri 4.0 ile birlikte hayatımıza giren yeni nesil teknolojilerin bize sunduğu çalışma ve üretim ortamında bu üç parametreyi destekler niteliktedir. Daha çok otomasyona dayalı akıllı fabrikalar anlayışı üretimde verimlilik ve esnekliği de beraberinde getirecektir. Akıllı fabrikalar, fabrika içerisindeki verileri anlık olarak takip etmekte ve bu veriler karşısında karar verme mekanizmaları oluşturmaktadır. Bu sayede üretimde çeviklik ve esnekliğe katkı sağlamaktadır. Esneklik kavramı ise, pazardaki değişime karşı hızlı aksiyonlar alarak müşteri istekleri ile uyumlu ürün üretebilme ve aynı anda birden fazla ürün üretebilme olarak tanımlanabilir. Müşteri isteklerinin sürekli değiştiği bir zamanda esneklik bir işletme için olmazsa olmaz bir kriterdir. Bununla beraber esnekliğin sağlandığı sistemlerde verimlilik ve üretkenlik beraberinde gelecektir.

Tüm bunlar göz önüne alındığında hem günümüz şartlarına uyum sağlamak hem de verimlilik ve üretkenliği arttırarak sürdürülebilir bir üretim anlayışını sahip olabilmek için işletmelerin endüstri 4.0 teknolojilerini kullanarak dijitalleşme çağına ayak uydurmaları mutlk bir gereklilik olarak gözükmektedir. Dijitalleşme süreci; sabır ve çaba gerektiren uzun bir süreçtir. Burada önemli olan doğru zamanda doğru adımların atılmasını sağlayacak bir yol haritasına sahip olmaktır.Uzun vadeli hedeflere ulaşılmasını sağlayacakbu yol haritasını oluşturabilmek için gerçekleştirilmesi gereken ilk adım; endüstri 4.0 dijital dönüşüm sürecindeki mevcut konumun belirlenmesidir. Bu doğrultuda yapılan tez çalışmasında işletmelerin dijital dönüşüm süreçlerindeki olgunluk seviyelerinin belirlenmesi amacı ile bir endüstri 4.0 dijital olgunluk modeli ortaya konulması hedeflenmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde daha çok kuramsal temeller üzerine kurulmuş olan olgunluk değerlendirme modellerine rastlanmıştır. Bu sebeple yapılan çalışmada; hem üretime entegre edilen yeni nesil teknolojileri içine alan, hem de yönetsel kavramları kapsayan bir olgunluk modelinin geliştirilmesi çalışmanın önemli bir özgün değeri olarak belirtilebilir. Bu çerçevede literature katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Uygulama ve işletmeler açısından bakıldığında; oluşturulan olgunluk modelinin beyaz eşya sektöründe uygulanmasına rağmen farklı sektörlerle de uygulanması ile işletmeler için dijital dönüşüm yolculuğunda uzun vadeli bir rehber niteliği taşıyacağı öngörülmektedir.

1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Birinci sanayi devriminden günümüze kadar geçen sürede meydana gelen teknolojik gelişmeler hem günlük yaşantımızda hem de üretim süreçlerimizde köklü değişimler yaratmıştır. İçerisine bulunduğumuz rekabet dünyasında da işletmeler bu köklü değişimlere ayak uydurmak durumunda kalmıştır. Yapılan çalışmanın amacı; firmalara bu değişimler karşısında aksiyon alabilmeleri için gerekli olan yol haritasını hazırlamak için bir endüstri 4.0 olgunluk modeli ortaya koymaktır. Model oluşturulurken günümüzde işletmelere rekabet avantajı sağlayacak tüm yeni nesil teknolojiler göz önüne alınmış ve bu teknolojiler; fabrika 4.0, lojistik 4.0, yönetim 4.0 ve operatör 4.0 olmak üzere 4 farklı ana başlık altında değerlendirilmiştir. Modelin uygulanması ile işletmenin mevcut endüstri 4.0 olgunluk seviyesinin belirlenmesi ve dört ana boyutun kendi aralarında değerlendirilebilir bir yapıya getirilmesi hedeflenmiştir. Bu sayede gelişime daha fazla ihtiyaç duyulan alanlar belirlenmiş olacak ve öncelikli alanlar görülebilecektir. Oluşturulan modelin uygulanması ile elde edilen

tüm bu sonuçların işletmeler için sürekli gelişme ve iyileştirme prensibine ayak uydurabilmek için gerekli olan yol haritasını oluşturulmasına katkı sağlayacaktır.

Çalışma beyaz eşya sektöründe faaliyet gösteren bir işletmede gerçekleştirilmiştir. Yeni nesil teknolojilerin kullanımı ve dijital dönüşüm konusuna oldukça fazla ağırlık veren ve stratejik hedef olarak belirleyen işletmede; belirli aralıklar ile endüstri 4.0 olgunluk değerlendirmeleri kurum dışındaki danışmanlık firmaları tarafından farklı kriterler kullanılarak yapılmaktadır. Yapılan çalışmada kullanılan kriterler, literatür ve işletme dinamikleri birlikte değerlendirilerek seçilmiş olup, literatürde yapılan çalışmalar çerçevesinde; işletmenin ilgili bölümlerinde çalışan yöneticiler ve mühendisler tarafından ortak karar ile kullanım alanı en fazla olan teknolojiler arasından seçilmiştir. Literatürdeki endüstri 4.0 olgunluk modelleri ile ilgili çalışmalar incelediğinde; beyaz eşya sektörü özelinde yapılmış kapsamlı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ayrıca işletme dinamiklere göz önüne alınarak seçilen kriterler de sektör özelinde spesifik olarak her bir endüstri 4.0 teknolojisine ayrı ayrı odaklanıldığı görülmüştür. Bu özellikler çalışmanın özgün yönünü oluşturmakta ve bu yönü ile literatüre farklı bir bakış açısı kazandırması amaçlanmaktadır.

1.2. Çalışmanın Kısıtları

Uygulamanın gerçekleştirildiği işletmenin gizlilik politikası gereği modelde bulunan endüstri 4.0 teknolojilerinin uygulama alanları ve aktif olarak yürütülen projelerin teknik detayları hakkında detaylı bilgi verilememiştir. Aynı zamanda modeli değerlendirebilecek tecrübeye sahip ve endüstri 4.0 projelerinde doğrudan çalışan kişi sayısının kısıtlı olması çalışmanın kısıtlarını oluşturmaktadır.

1.3. Literatür Özeti

Literatürde işletmelerin endüstri 4.0 dijital olgunluk seviyelerinin belirlenmesi konusunda yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir:

Schumacher, Erol ve Sihn (2016) dördüncü sanayi devrimi ile hayatımıza giren teknolojilerin işletmelere entegre edilmesini desteklemek amacıyla firmalar tarafından kolay uygulanabilir ve gelecekteki uygulamalara yol gösteren bir model önermişlerdir. Çalışma ile ortaya çıkarılan model 9 boyut ve 62 maddeden oluşmakta ve işletmelerin olgunluk seviyesi ağırlıklı ortalama yöntemi kullanılarak elde edilmektedir. Model havacılık ve uzay sektöründe faaliyet gösteren bir işletmede anket yöntemi kullanılarak uygulanmış ve anket likert ölçeği

kullanılarak değerlendirilmiştir. Modelin analiz edilmesi ile en yüksek olgunluğa sahip kriter ürünler olurken en düşük olgunluğa sahip olan kriter ise strateji olarak belirlenmiştir. Her bir boyutun olgunluk derecesi radar grafikleri ile çalışma sonunda sunulmuştur.

Commuzzi ve Patel (2016) çalışmalarında daha çok büyük veri odaklı bir teknolojik olgunluk modeli üzerinde durmuşlardır. Likert ölçeği kullanılarak çalıştırılan model uygulandığı üç firma içinde eleştirel bir bakış açısıyla gelecekte atılacak adımlara yol gösterici olmuştur.

Häberer, Lau ve Behrendt (2017) ortak çalışmalarında KOBİ'lerin endüstri 4.0 olgunluk derecelerini belirlemek için sunulan modellerin eksikliklerine odaklanmaktadır. Bu doğrultuda seçilen iki model; The Fraunhofer IFF Industrie 4.0 Check-up ve The VDMA Guideline Industrie 4.0 olmuştur. Farklı iki modelin analiz edilmesi ve avantaj ve dezavantajlarının belirlenmesi ile küçük ve orta ölçekli işletmelerin değerlendirilmesini baz alan yeni bir model ortaya konulmuştur.

Sarko ve Pessl (2017) tarafından yapılan çalışma çalışması imalat işletmelerinin teknoloji entegrasyonu, süreçleri ve organizasyonel özellikleri baz alınarak teknolojik olgunluklarının değerlendirilmesini içermektedir. İşletmelerin mevcut ve hedef durum puanlarının kullanıldığı model Avustralyalı bir şirket için uygulanmış ve dijital dönüşüm sürecinin henüz üst yönetim tarafından benimsenmediğini göstermiştir.

Keskin, Kabasakal, Kaymaz ve Soyuer (2018) tarafından oluşturulan üç aşamalı model de ilk aşama kriterlerin tanımlanması, ikinci aşama kriter ağırlıklarının belirlenmesi ve üçüncü aşama ise kriterlerin değerlendirilmesidir. Organizasyonların endüstri 4.0 hazırlık seviyelerini tespit etmek amacıyla oluşturulan bu modelin çözümlenmesinde çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP ve TOPSIS tercih edilmiştir.

Akdil, Üstündağ ve Çevikcan (2018) yaptıkları çalışmada literatürde yer alan dört farklı endüstri 4.0 olgunluk ve hazırlık modelini incelemiş ve bu modellerin karşılaştırmasını yapmışlardır. Yapılan analizler ile çalışma sonunda üç boyut ve on üç alt kriterden oluşan yeni bir model ortaya çıkmıştır. Geliştirilen model Türkiye'de perakende sektöründe faaliyet gösteren bir işletmeye uygulanmış ve belirlenen kriterlerin olgunluk dereceleri hesaplanmıştır.

Bibby ve Dehe (2018) endüstri 4.0 teknolojilerinin uygulanabilirlik seviyelerini belirlemek amacıyla üç boyuttan oluşan ve içerisinde dördüncü sanayi devrimi ile birlikte

önem kazanan teknolojileri içeren bir teknolojik olgunluk modeli oluşturmuşlardır. Geleceğin fabrikası, insan ve kültür ve strateji olmak üzere üç ana ve 13 alt kriterden oluşan modelde olgunluğun ölçülmesi için ise IMPULS ve Dijital Operasyonlar Öz Değerlendirme Modeli kullanılmıştır. Elde edilen modelin değerlendirme işlemi karar vericilerin değerlendirmesi ve kriterlerin ağırlıklı ortalamalarının hesaplanması üzerine kurulmuştur. 12 farklı firmanın değerlendirildiği çalışma savunma sanayisindeki büyük ölçekli firmaların analizini yaparak literature katkıda bulunmuştur.

Kiraz, Canpolat, Erkan ve Uygun (2018) tarafından yapılan çalışmada işletmelerin hem mevcut hem de gelecekteki endüstri 4.0 seviyelerinin belirlenmesi için bir model önermişlerdir. Oluşturulan modelde öncelikle işletmelerin endüstri 4.0 seviyesine etki eden kavramlar belirlenmiş ve daha sonra oluşturulan üç farklı senaryo üzerinde bu kavramların değerlendirilmesi yapılmıştır. Modelde kullanılacak kriterler IMPULS kriterleri baz alınarak hazırlanmış ve kriterlerin önem derecelerinin belirlenmesi amacıyla DEMATEL (The Decision Making Trial and Evaluation Laboratory) ve literatürde daha önce kullanılmamış BBH (Bulanık Bilişsel Haritalama) yöntemlerinden yararlanılmıştır. Çalışmanın sonucunda üç farklı senaryo ayrı ayrı değerlendirilmiş ve endüstri 4.0 olgunluk seviyesini en çok etkileyen kavramlar Strateji ve organizasyon ile akıllı operasyonlar olarak görülmüştür. Modelin değerlendirilmesi ile, kullanılan BBH yöntemlerinin karmaşık modellerin çözümünde iyi sonuçlar vereceğide çalışmanın bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Literatürde yapılacak olan diğer çalışmalara öneri olarak ise çalışmaya katılan uzman sayısının artırılmasının ve sisteme günlük hayatta işletmelerin çalışmasına etki eden değişkenlerin de eklenmesinin daha iyi sonuçlar vereceği belirtilmiştir.

Santos ve Martinho (2019) tarafından önerilen endüstri 4.0 olgunluk modeli literatürde yer alan üç farklı olgunluk modelinin analiz edilmesi sonucunda ortaya çıkmıştır. Analiz sonucunda sunulan beş boyutlu model otomotiv sektöründe faaliyet gösteren iki farklı işletmede uygulanmıştır. Modelin uygulama aşamasında anket yönteminden yararlanılmış ve olgunluk seviyeleri tam olarak açıklanmıştır. Literatürde yer alan çalışmalar gibi yapılan çalışmanın da tek kısıtlayıcı yanı az sayıda katılımcı ile gerçekleştirilmiş olmasıdır.

Koyuncu (2019) tez çalışmasında literatürde yer alan Sanayi 4.0 Rehberi, Bağlantılı Kurumsal Olgunluk Modeli, ACATECH, Dijital Operasyonlar Öz Değerlendirme Modeli ve IMPULS olmak üzere 5 endüstri 4.0 olgunluk değerlendirme modelinin Bulanık TOPSIS yöntemi ile karşılaştırılmasını gerçekleştirmiştir. Üç uzman karar verici ile yapılan

değerlendirme sonucunda IMPULS modeli en iyi model olarak çıkmış ve uygulama yapılan firmada IMPULS modelini uygulanması ile gelecek için bir yol haritası oluşturulmuştur.

Etkeser (2019) tez çalışmasında KOBİ'lerin endüstri 4.0 hazırlık seviyelerini saptamak amacı ile bir olgunluk modeli üzerinde çalışmıştır. Dokuz boyut üzerine kurulmuş olan olgunluk modelinin değerlendirme aşamasında AHP yöntemi kullanılmıştır. Tekstil ve kimya sektöründe faaliyet gösteren iki farklı firmada uygulanan modelin güvenilirliği de ispatlanmıştır.

Pacchini, Lucato, Facchini ve Mummalo (2019) tarafından oluşturulan olgunluk modeli nesnelerin internet, büyük veri, bulut bilişim, siber-fiziksek sistemler, işbirlikçi robotlar, eklemeli imalat, artırılmış gerçeklik ve yapay zekâ olmak üzere sekiz farklı yeni nesil teknolojinin değerlendirilmesini gerçekleştirmektedir. Otomotiv sektöründe uygulanan model, değerlendirilen işletmenin çalışma içerisinde belirlenen altı farklı seviyeden hangisinde yer aldığını göstermektedir.

Çiray (2019) tarafından gerçekleştirilen tez çalışmasında küçük ve orta ölçekli imalat firmalarının endüstri 4.0 olgunluk düzeylerinin belirlenmesi için bir olgunluk modeli geliştirilmiştir. Oluşturulan model beş boyuttan (Strateji ve Politika, İnsan ve Kültür, Organizasyon ve Süreçler, Bilişim Teknolojileri ve Ürünler) oluşmakta olup beyaz eşya sektöründe faaliyet gösteren 23 işletmede uygulanmıştır. Modelin uygulanması ile işletmelerin dijital dönüşüm süreçleri için gerekli olan faaliyetleri planlayabilecek çıktıya sahip olmaları hedeflenmiştir.

Wagire, Joshi, Singh ve Join (2020) çalışmalarında Hindistan'da bulunan imalat işletmelerinin teknolojik olgunluk düzeyini belirlemek amacı ile 7 boyut ve 38 maddeden oluşan ampirik temelli bir olgunluk modeli önermişlerdir. Çok sayıda değerlendiricinin bulunduğu çalışmada daha doğru bir karar verme süreci yürütülebilmesi ve kriterlerin önem seviyelerinin karar vericiler özelinde değerlendirilmesi için bulanık AHP (Analitik Hiyerarşi Prosesi) çok kriterli karar verme yönteminden yararlanılmıştır. Çalışmanın sonucunda modelin uygulandığı işletme 5 üzerinden 2,88 puan almış ve çıkan sonucun da gerçek hayatta ile doğru orantılı olduğu görüşmüştür.

Rafael, Jaione, Cristina ve Ibon (2020) IMPULS kriterlerini baz alarak gerçekleştirdikleri çalışmada işletmeler için kullanışlı ve dijitalleşme konusunda yol gösterici olabilecek bir model ortaya koymayı amaçlamışlardır. Oluşturulan modelin standart bir model

haline gelebilmesi için farklı sektörlerde ve farklı bilimsel yöntemler kullanılarak uygulanması gerektiği çalışma sonucunda yazarlar tarafından belirtilmiştir.

Yüce (2020) tarafından gerçekleştirilen tez çalışmasında çimento sektörü için bir endüstri 4.0 olgunluk modeli tasarlanmıştır. Model içerisinde tanımlanan 37 boyut değerlendiriciler tarafından anket yardımı ile değerlendirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda çimento sektöründe faaliyet gösteren şirketlerin ortalama endüstri 4.0 olgunluk endeksi elde edilmiştir.

Sarı (2020)yaptığı çalışmada kriterleri arasında eklemeli imalat ve büyük veri gibi teknolojilerin yer aldığı bir endüstri 4.0 olgunluk modeli oluşturmuştur. Gıda ve içecek sektöründe uygulaması gerçekleştirilen modelin değerlendirme aşamasında AHP (Analitik Hiyerarşi Prosesi) çok kriterli karar verme yöntemi kullanılmıştır. Ataman (2018) de ortaya koyduğu tez çalışmasında savunma sanayinin endüstri 4.0 olgunluk düzeyini belirlemek amacı ile bulanık AHP tekniğini kullanmıştır. 3 uzman görüşü alınarak değerlendirilen modelin sonucunda 5 kriter içinden en yüksek değeri sahip kriter strateji olarak ortaya çıkmıştır.

Rauch, Unterhofer, Rojas, Gualtieri ve Matt (2020)yaptıkları çalışmada 42 farklı endüstri 4.0 konseptine yer vermiş ve oluşturulan olgunluk modelinin değerlendirme aşaması için kriterlerin mevcut ve hedef değerlerine ek olarak kriter ağırlıkları da sürece dahil edilmiştir. Modelin 17 farklı sanayi şirketinde gerçekleştirilen saha çalışmalarının sonuçları çalışmanın sonucunda paylaşılmıştır.

Baki ve Serdar (2020) lojistik sektöründe faaliyet gösteren firmaların sanayi 4.0 olgunluk seviyelerini belirlemek amacı ile bir olgunluk modeli önermişlerdir. Önerilen modelde IMPULS olgunluk modeline ait kriterler kullanılmış olup modelin değerlendirilmesi iki farklı yöntem ile gerçekleştirilmiştir. AHP-TOPSIS ve AHP-VIKOR bütünleşik yöntemlerinin kullanıldığı çalışmada her iki yöntem sonucunda da kriter için aynı sıralama elde edilmiştir. Modelin kısıtı olarak IMPULS modelinde yer alan kriterlerin lojistik sektörünü tam olarak yansıtmadığı üzerinde durulmuştur.

Tiryaki (2020) tarafından yapılan tez çalışmasında teknoloji geliştirme programları için bir etki değerlendirme modeli oluşturulmuştur. Model üç modül üzerine kurulmuş olup her bir modül altında 3 adet teknolojik gösterge bulunmaktadır. Göstergelerin değerlendirilmesi ise uzmanlar tarafından anket yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Teknolojik göstergelerden yola çıkılarak teknolojik olgunluk seviyesini analiz etmek amacı ile çok

kriterli karar verme yöntemlerinden yararlanılmıştır. İlk olarak kriter ağırlıkları AHP yöntemi ile hesaplanmış olup küresel ağırlıkların belirlenmesinin ardından TOPSIS yöntemine geçilmiş ve olgunluk seviyeleri hesaplanmıştır.

Gökalp, Şener ve Eren (2021) literatürde yer alan yedi farklı olgunluk modelini belirlemiş ve bu modelleri uzmanlar tarafından belirlenen yedi kriter çerçevesinde değerlendirmişlerdir. Yapılan değerlendirme sonucunda hiçbir modelin istenilen tüm kriterleri karşılayamadığı görülmüştür. Analiz edilen modellere dilsel değişkenler eklenerek yeni bir olgunluk modeli ortaya konulmuştur. Yeni oluşturulan modelin işletmelere daha fazla esneklik, daha fazla kalite ve sürekli gelişim alanlarında fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

Çınar, Zeeshan ve Korhan (2021) işletmelerin endüstri 4.0 adaptasyon süreçlerini değerlendirmek amacı ile dört boyut ve beş seviyeden oluşan bir olgunluk modeli ortaya koymuşlardır. Üretim sistemlerindeki teknolojik entegrasyon skorunu yöneticilere sunmaya olanak sağlayan bu model aynı zamanda işletmeler için bir yol haritası oluşturarak işletmenin endüstri 4.0 teknolojilerine adaptasyon sürecindeki önemli noktaları ve bu sürecin ne kadar süreceğini göstermektedir. Çalışma sonucunda sunulan model anket çalışmasından elde edilen verilerin ağırlık ortalama yöntemi ile analiz edilmesine dayanmaktadır. Vaka çalışması sonucunda elde edilen bulgulara göre işletmenin olgunluk seviyesi 5 üzerinden 2,73 çıkmış olup, endüstri 4.0 teknolojilerine tam entegrasyonun 2031 ile 2034 yılları arasında gerçekleşebileceği belirtilmiştir.

Oktay (2021) gerçekleştirdiği tez çalışmasında savunma sanayi özelinde bir olgunluk modeli geliştirmiştir. Elde edilen model teknolojinin kullanımı, ürün geliştirme, insan ve ARGE kültürü ile strateji ve yönetim olmak üzere dört ana kriter üzerine kurulmuş olup 17 alt kriter içermektedir. Çalışan yorumlarına dayanan değerlendirme aşamasında ise kriterlerin ağırlıklarının belirlenmesi için MACBETH yöntemi tercih edilirken olgunluk seviyesinin hesaplanması için TOPSIS yöntemi kullanılmıştır.

Elibal ve Özceylan (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada literatürde yer alan mevcut olgunluk modellerinin karşılaştırılması için çok kriterli karar verme yöntemlerinden DEMATEL (The Decision Making Trial and Evaluation Laboratory) ve TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) faydalanılmıştır. 7 ana ve 33 alt kriter kullanılarak yapılan değerlendirme sonucunda en yüksek skora sahip olgunluk modeli Schumacher vd. (2016)'nın literatüre kazandırdığı olgunluk modeli olarak belirlenmiştir. Çok

sayıda modelin incelendiği çalışma mevcut modellerin geliştirilmesi ve yeni modellerin yaratılması için bir yol haritası niteliğindedir.

Gerçekleştirilen literatür araştırmasında uygulamalı ve teorik olmak üzere çok sayıda endüstri 4.0 olgunluk modeli incelenmiştir. İncelenen modeller genel olarak endüstri 4.0 teknolojilerinin kullanım ve olgunluk seviyesinin belirlenmesine yönelik olsa da farklı endüstrilere, özel üretim süreçlerine veya spesifik teknolojilere odaklanan modeller de bulunmaktadır. Literatürde yer alan ve yukarıda sunulmamış olan farklı teorik ve uygulamalı modeller izelge 1.1’de matris halinde verilmiştir.



Çizelge 1.1. Literatür matrisi

Çalışmanın Adı	Yıl	Tür	Yaklaşım
Three-stage maturity model in SMEs towards industry 4.0	2016	Teorik	Bu çalışmada, işletmeleri sanayi 4.0'a yönlendirmek amacı ile üç aşamalı bir süreç tanımlanmıştır.
Maturity Models and Tools for Enabling Smart Manufacturing Systems: Comparison and Reflections for Future Developments	2017	Teorik	İmalat işletmelerinin dijitalleşmeye konusundaki hazırlık seviyelerini tespit etmek amacı ile oluşturulan model kalite yönetimi, bakım yönetimi ve lojistik yönetimi gibi süreçleri baz alarak değerlendirme işlemini gerçekleştirmektedir. Modelin uygulanması ile işletmeler için dijitalleşme süreçlerinde kullanabilecekleri bir yol haritası oluşturulması amaçlanmıştır.
Toward the Development of a Maturity Model for Digitalization within the Manufacturing Industry's Supply Chain	2017	Teorik	Akıllı ürünler ve siber fiziksel sistemlerin temel alınarak oluşturulduğu olgunluk modelinde dokuz kriter ve beş seviye bulunmaktadır. Modelin uygulanması ile beraber işletmelerin tedarik zinciri süreçlerinin dijitalleşmesine de katkı sağlayacağı belirtilmiştir.
Development of an industrie 4.0 maturity index for small and medium-sized enterprises	2017	Teorik	Literatürde sıklıkla kullanılan iki farklı modelin analiz edilmesi ile kobiler için yeni bir model ortaya konulmuştur.
Towards a smart manufacturing maturity model for SMEs (SM3E)	2018	Teorik	KOBİ'ler için akıllı üretim olgunluk modeli önerilen çalışmada sanayi 4.0'a geçiş için üç boyut tanımlanmıştır. Bu üç boyutun altında ise 17 tane alt boyut belirlenmiştir.
SMEs maturity model assessment of IR4.0 digital transformation	2018	Teorik	Çalışmada IMPULS olgunluk değerlendirme modeli uygulanmış ve kullanılacak model altı boyut olarak üzerine kurulmuştur.
SMEs maturity model assessment of IR4.0 digital transformation	2018	Teorik	Çalışmada IMPULS olgunluk değerlendirme modeli uygulanmış ve kullanılacak model altı boyut olarak üzerine kurulmuştur.
State of Industry 4.0 Across German Companies A Pilot Study	2018	Uygulamalı	Çalışma, ürün geliştirme süreci, yönlendirme ve kontrol, operasyon ve üretim, büyük veri entegrasyonu, organizasyon yapısı ve akıllı hizmetler olmak üzere 6 boyut dikkate alınarak i4.0 olgunluk düzeyinin belirlenmesini amaçlamaktadır.
Smart Services Maturity Level in Germany	2018	Uygulamalı	Çalışmada, ürün geliştirme süreci, yönlendirme ve kontrol, operasyon ve üretim, büyük veri entegrasyonu, organizasyon yapısı ve akıllı servisler şeklinde 6 farklı boyut tanımlanmıştır.
Analysis of Key Dimension and SubDimension for Supply Chian of Industry to Fourth Industry	2018	Teorik	Yapılan çalışmada gıda endüstrisinde yer alan firmaların dijital olgunluk düzeyinin ölçülmesi amacı ile 7 ana (strateji, teknoloji, imalat ve operasyon, tedarik zinciri, çalışanlar, ürünler, müşteri) ve 31 alt kriterden oluşan bir model ortaya konulmuştur.

Çizelge 1.2. Literatür matrisi (devamı)

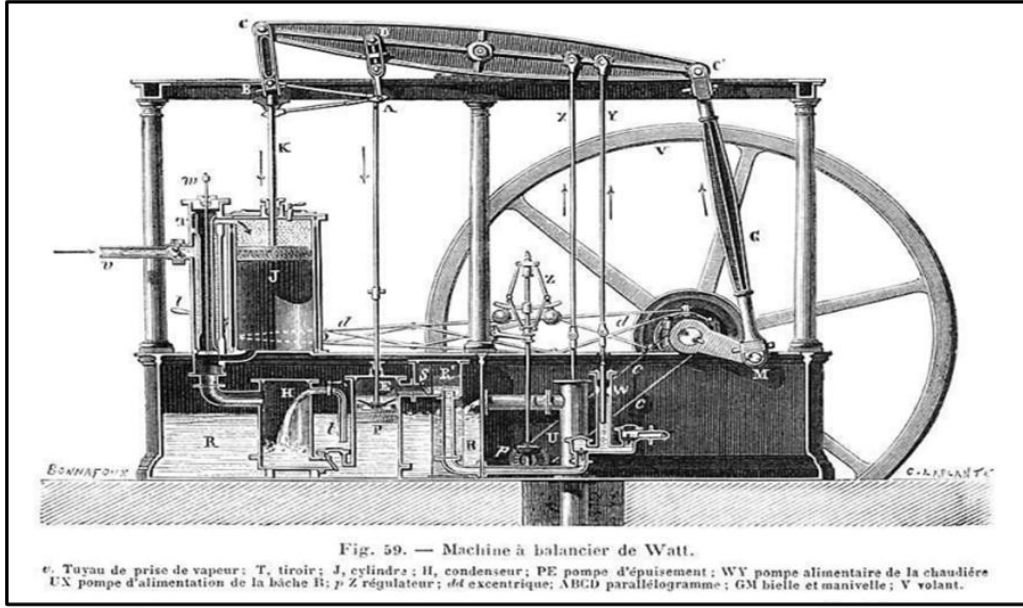
Çalışmanın Adı	Yıl	Tür	Yaklaşım
Smart factory implementation and process innovation	2018	Teorik	Yapılan çalışma fabrikaları akıllı fabrikalar haline getirmek amacı ile kullanılabilen bir olgunluk modeli üzerine çalışılmıştır.
The development of the maturity model to evaluate the smart smes 4.0 readiness	2019	Uygulamalı	Küçük ve orta ölçekli işletmelerin endüstri 4.0 hazırlık düzeylerini tespit etmek amacı ile oluşturulan modelde Üretim ve Operasyonlar, İnsan Yeteneği, Teknoloji Odaklı Süreç, Dijital Destek ile İş ve Organizasyon Stratejisi olmak üzere beş ana boyut üzerinde durulmuştur.
Digital readiness assessment of Italian SMEs: a case-study research	2019	Uygulamalı	Ampirik yaklaşımın benimsenmesi ile oluşturulan model 20 farklı işletme içerisinde uygulanmıştır. Çalışmada sunulan model; strateji, insan, proses, teknoloji ve entegrasyon olmak üzere beş boyutu üzerine kurulmuştur.
Self-assessment of Industry 4.0 Technologies in Intralogistics for SME's	2019	Teorik	İşletmelerin iç lojistik proseslerinde kullanılan endüstri 4.0 teknolojilerinin öz değerlendirmesi için önerilen modelde gelen mallar, dahili nakliye, depolama, sipariş, toplama, paketlenme ve giden mallar olmak üzere lojistiğin 7 farklı süreci ele değerlendirmeye alınmıştır.
Deriving essential components of lean and industry 4.0 assessment model for manufacturing SMEs	2019	Teorik	Yapılan çalışmada öncelikle literatürde yer alan olgunluk modelleri incelenmiş ve daha sonra bu olgunluk modellerinin KOBİ'lere uygulanabilirliği üzerine durulmuştur. Çalışma sonucunda yeni bir öz değerlendirme modeli geliştirilmesi amaçlanmıştır.
Assessing Industry 4.0 Maturity: An Essential Scale for SMEs	2019	Teorik	KOBİ'lerin endüstri 4.0 olgunluk düzeylerini gerçekleştirmek amacı ile geliştirilen modelde 5 farklı kriter tanımlanmış ve bu kriterlerin değerlendirilmesi için Likert ölçeği kullanılmıştır.
Agile Requirement Engineering Maturity Framework for Industry 4.0	2019	Uygulamalı	Literatürde yer alan üç olgunluk modelinin birbirine entegre edilmesi ile oluşturulan modele Çevik İhtiyaç/Gereksinim Mühendisliği Olgunluk Modeli adı verilmiştir. Çalışmada sunulan model 9 ana ve 62 alt kriterden oluşmaktadır.
Research and Application of Capability Maturity Model for Chinese Intelligent Manufacturing	2019	Teorik	Çin Akıllı Üretim Yetenek Olgunluk Modelinin sunulduğu çalışmada modelin Çin'in imalat endüstrilerinde kullanımının uygun olacağı ve kullanıldığı takdirde hem işletmelerin potansiyellerinin belirlenmesinde hem de tedarikçi seçme ve geliştirme süreçlerine fayda sağlayacağı belirtilmiştir.
A maturity level-based assessment tool to enhance the implementation of industry 4.0 in small and medium-sized enterprises.	2020	Uygulamalı	42 farklı endüstri 4.0 konseptini içeren olgunluk modelinin 17 farklı işletmede uygulanması ile ortaya çıkan sonuçlar analiz edilmiştir.

2. TARİHTE ENDÜSTRİ DEVRİMLERİ

2.1. Birinci Sanayi Devrimi (Endüstri 1.0)

Endüstri; çoğunlukla büyük işletmelerde, hammaddeden mamul madde oluşturabilmek amacıyla gerçekleştirilen faaliyetleri ve kullanılan araçları niteler. Daha geniş bir tanım ile endüstri, her çeşit mal ve hizmet üretimini anlatmaktadır (Tunçkan, 2018). M.Ö. 8000'lere denk gelen "Tarım Devrimi", insanların yaşam şekillerinin tamamen değiştiği bir dönem olarak tanımlanabilir. Çünkü uzun zamandır sadece avcılık ve toplayıcılık ile hayatlarını sürdürmeye çalışan insanlar tarım devrimi ile çiftçilik ve hayvancılığı öğrenmeye başlayarak yerleşik hayata geçmeye başlamışlardır. Yaşanan bu değişim beraberinde toplulukların sosyoekonomik yapılarını da değişime uğratmıştır (Özsoylu, 2017). İnsanoğlunun tüketici konumundan üretici konumuna geçmesinden bugüne kadar üretim sürekli devam etmekte ve bu da toplumu farklı üretim yöntemleri için yeni arayışlara yönlendirmektedir. Bu arayışlarda endüstri devrimlerinin ortaya çıkmasını etkileyen önemli faktörlerdir. Endüstri devrimlerinin ortaya çıkışını hızlandıran bir diğer olay ise ticaret devrimidir. Avrupalıların sömürgeleri sonucunda elde ettikleri kaynakları piyasaya sürmesi büyük şirketlerin ortaya çıkmasına zemin hazırlamıştır. Şirketlerin hacmi büyüdükçe ihtiyaç duyulan kaynak miktarı da zamanla artmaya başlamış ve Amerika kıtasından altın ve gümüşü Avrupa'ya getiren İspanyollar bu şekilde ihtiyaç duyulan kaynağı temin etmişlerdir.

Endüstri devriminin ortaya çıkışında etkisi olan başka bir etken ise kentsel bölgelerde nüfusun zaman geçtikçe artmasıdır. 1750'li yıllarda ülkeler arasındaki ticaret miktarı artsa bile artan nüfus ile arz ve talep arasındaki denge sağlanamamıştır. Bu dönemde en yüksek ihracat kapasitesine sahip olan ülke İngiltere idi ve en çok talep edilen ürünler tekstil ürünleriydi. Tüccarların çiftçilerden aldıkları yünlerle köylüler boş zamanlarında iplik yapıyorlar ve bu iplikler daha sonra tüccarlar vasıtası ile kent merkezlerinde satılıyordu. Zaman ilerledikçe yapılan ürünlerin yetersiz kalması yeni gelişmelere zemin hazırlamıştır. Üretimi arttırmak amacı ile tüccarlar büyük binalar yaptırıp üretime bu binalarda gerçekleştirmeye başlamışlardır. Bu süreç içerisinde de üretime çıkırcık ve uçan mekik gibi basit makineler dahil olmuştur. (Scwhab, 2016).Tüm bu gelişmeler sonuç olarak tarihteki endüstri devrimlerinin başlangıcını oluşturmuştur.



Şekil 2.1. Watt'ın buhar makinası (Görçün, 2016)

Birinci endüstri devriminin başlangıcı için net bir tarih bilinmemekle birlikte bu dönemin buhar makinesinin üretimde kullanılması ile başladığı kabul edilmektedir. Buhar makinesi için daha önce farklı tarihlerde çalışmalar yapılsa da başarılı olan ilk makine James Watt tarafından ortaya konulmuştur (Başer ve Erkan, 2011). Buhar makinesi ilk olarak İngiltere kullanmış olup pamuk üretiminde on altı kat bir artış elde etmiştir. Üretimde gözle görülür bir fark yaratan bu yeni teknoloji İngiltere'den sonra Almanya ve Amerika tarafından da kullanılmaya başlanmıştır (Rifkin, 2014). 1769 ile 1780 yılları arasında Richard Arkwright'in pamuk eğirme makinasını, Edmund Cartwright'in mekanik dokuma tezgâhını ve 1769'da James Watt'ın şekil 2.1'de gösterilen buhar makinasını icat etmesi ile dokuma sanayisinde önemli gelişmeler yaşanmıştır. Ortaya çıkan bu yeni makinelerin üretim süreçlerine dahil olmasıyla beraber üretimde makine oranı artmış ve dolayısı ile insan ve hayvan gücüne ihtiyaç zaman içerisinde azalmıştır. Üretime makinelerin dahil olması ile daha kısa sürede daha çok ürün üretilmeye başlanmış ve kurulan işletmeler zamanla büyümeye başlamıştır. İlerleyen zamanlarda makineleşme ile üretim miktarı artmaya devam etmiştir fakat lojistik süreçlerinin aynı şekilde devam etmesi ürünlerin depoda beklemesine sebep olmuştur. Aynı zamanda üretim için gerekli olan maddelerde lojistikteki gecikmelerden dolayı üretime zamanında dahil edilememiştir (Görçün, 2016). Burada sorunu çözmek ve lojistik ile tedarik süreçlerini daha hızlı hale getirmek için kömürle çalışan buharlı trenler lojistikte kullanılmaya başlanmış ve nakliye sürelerinin kısalmasına yardımcı olmuştur (Rifkin, 2014).

Bu sürecin diğ er bir önemli bileşeni ise çeliktir. Buhar enerjisinin kontrol altında tutulabilmesi ve yüksek basın a dayanıklı makinelerin  retilibilmesi için ise  elik hammadde olarak kullanılmıştır (Görçün, 2017). Buhar gücünün denizyolundan sonra demiryolunda da kullanılması ulaşım alanındaki gelişmelere zemin hazırlamış ve ülkeler arası malzeme alı veri inin daha kolay ve ucuz yapılmasını sağlarken ticaretinde daha geniş alanlara yayılmasını sağlamıştır. Bu sayede sermaye sahipleri dış pazara da yönelme imkânı bulmuşlardır.  lkeler arası ticaret geliştikçe ve pazar alanı arttıkça iletişim önem kazanmıştır. Bu nedenle bu zamanlardan itibaren posta teşkilatları kurulmaya ba lanmış ve sayıları giderek artmıştır.

Birinci sanayi devrimi ile kullanılan ekipmanlarda meydana gelen teknolojik gelişmeler sermayedeler kişileri daha çok yatırım yapmaya yöneltmiştir. Üretim miktarının artması ile elde ettiği k rda artan işletmeler teknolojik gelişmeleri daha yakından takip etmeye ba lamı lardır. Üretim miktarının artması ile ürün fiyatları azalmış bu da talebin artmasına sebep olmuştur. Yaşanan tüm bu gelişmeler sosyal yapıda da köklü değişimler meydana getirmiştir. Ulaşım alanında yaşanan gelişmeler ülkeler arasındaki ticaretin artmasına ve küreselleşmenin temellerinin atılmasına zemin hazırlamıştır. Yeni teknolojileri kullanarak endüstri devriminin beraberinde getirdiği tüm olumlu gelişmelerden faydalanan burjuva sınıfı giderek zenginle mi  fakat eme e duyulan ihtiyacın azalması ile i  i sınıfının geliri giderek azalmıştır. Aynı zamanda birinci endüstri devrimi kölelik sisteminin ortaya çıkmaya ba ladığı dönemi de kapsamaktadır. Ulaşım ağlarında ilerlemelerin yaşandığı bu dönemde tüccarlar farklı co rafı bölgelerden çok düşük ücretlere çalışacak yerli halkı getirerek bu sistemin başlangıcını olu turmu lardır.

Üretimdeki köklü değişimler yaşamı da büyük ölçüde kolayla tırmı tır. Üretilen  r n çeşitlerinin artması ile yaşam kalitesi de artmış ve ortalama yaşam süresi uzayarak nüfus artmaya ba lamı tır. Ulaşım ve iletişim a ının gelişmesi ülkeler arası ticareti kolaylaştırarak yeni pazarlara yönelme imkânı sunmuştur. Ayrıca ülkelerin farklı pazar arayışları emperyalist stratejilerin oluşmasına da yol açmıştır (Duman,2008). Genel olarak bakıldığında birinci sanayi devrimi dijitalleşmenin ba ladığı ve yarı- otomatik sistemlerin üretime dahil edildiği dönemi ifade etmektedir. Bu dönemde kâr elde etmek amacı ile teknolojiye yatırım yapılması gerektiğinin farkına varılmıştır. Artan  retim ihtiyacını karşılamak için i  i ihtiyacı artmış fakat ücretler d  m  t r. Teknolojik yapıların üretim sistemlerine dahil olmaya ba laması ile kalifiye çalışana olan ihtiyaç artmış ve kendini bu sisteme uygun olarak geli tiremeyen kişiler

sistemin dışında kalmışlardır. Tüm bu etkiler ile sanayi devriminin birinci bölümü tamamlanmıştır.

2.2. İkinci Sanayi Devrimi (Endüstri 2.0)

Birinci endüstri devriminin tetikleyici unsuru buharlı makinenin icat edilmesi iken buhar gücü kömürden elde edilmekteydi. İkinci endüstri devriminin başlangıcı ise petrolün keşfi ile önce içten yanmalı motorların daha sonra ise elektriğin buhar gücünün yerini alması ile gerçekleşmiştir. Dolayısı ile teknoloji devrimi olarak da bilinen ikinci endüstri devrimi elektrik enerjisinin kullanımından dijitalleşmenin artmasına kadar olan süreci kapsamaktadır (Castells, 2005). Bu dönemde bilimin farklı alanlarında birçok gelişme yaşanarak buluşların ortaya çıkmasına zemin hazırlanmıştır. Bunlar ise otomobil, telefon, gramofon, bisiklet ve elektrik ışığı gibi teknolojilerdir. Birinci sanayi devriminde başrolü oynayan İngiltere ikinci sanayi devriminde yerini artık Almanya ve Amerika Birleşik Devletleri'ne bırakmıştır. Bu dönem endüstrinin baş aktörleri ise; elektrik motoru, telefon telgraf, içten yanmalı motor vb. olmuştur.

Birinci sanayi devrimi ile üretimde temel enerji kaynağı olarak kömür kullanılmaktaydı. Ancak zamanla zaman içerisinde kömür ihtiyaçları karşılayamamaya başlamış ve bu da yeni enerji kaynaklarının bulunmasına yol açmıştır. Petrolün enerji kaynağı olarak kullanılmaya başlaması hem üretim sistemlerinin verimliliğini arttırmış hem de ikinci endüstri devriminin başlangıcı tetikleyen bir unsur olmuştur. 1859 yılında ABD'de ilk petrol kuyusunun açılmasından yaklaşık 20 yıl sonra Alman mühendis Nikolaus Otto doğal gaz ile çalışan ilk içten yanmalı motoru icat etti. İlerleyen yıllarda Gottlieb Daimler petrolle çalışan bir motor üretirken Karl Benz de yakıtı ateşleyecek bir cihaz geliştirdi. Böyle petrol ikinci sanayi devriminde kömürün yerine alacak yeni bir enerji kaynağı olarak ortaya çıktı. Kömürün yerini petrole bırakması ile buhar makinesi önemini kaybetmiştir (Görçün,2016). Buhar makinelerinin yerini alan küçük elektrikli motorlar genel fabrika yapısını da değiştirerek hem üretim miktarını arttırmış hem de fabrika içerisindeki düzen için yeni yaklaşımlar geliştirilmesine yol açmıştır. Bununla birlikte elektrikli motorlar kullanılarak yapılan araçların daha hızlı gitmesi ile hem ulaşım süresi azalmış hem de eski gibi yüksek oranda stok yapılmasına gerek kalmadığı için stok maliyetleri düşmüştür (Eroğlu, 2019).

Bu dönemde ortaya çıkan bir diğer önemli gelişme ise montaj hatlarının kullanılması olarak söylenebilir. Daha önce de üretimde kullanılan fakat istenilen zamanda hız ayarı

değiştirilemeyen montaj hatları elektriğin üretime dahil olması ile istenilen amaç doğrultusunda kullanılmaya başlanmıştır. Montaj hatlarının üretimde kullanılması üretim miktarını yaklaşık beş kat arttırmıştır. Bu değişimler üretim yapısında da bazı farklılıklara yol açmıştır. İstenilen hız ile hareket eden hatlar üretimi daha esnek bir hale getirmiş ve üretim miktarı zaman içerisinde artmıştır.

Yeni motorların kullanımı ve ikinci endüstri devrimi ile petrolün ön plana çıkması aynı zamanda çeliğinde önem kazanmasına yol açmıştır. Bu dönemde İngiliz madenci Henry Bessemer'in bulduğu üretim yöntemi ile çelik üretiminin daha az maliyet ile yapılması sağlanmış ardından Fransa'da açık fırın yöntemi olarak bilinen ikinci bir çelik üretim yöntemi geliştirilmiştir. Birinci sanayi devriminde önemli bir yere sahip olan pamuğun yerine böylece çelik geçmiştir. Bu gelişmelerden sonra çelik demirin yerini alarak başta demiryolları olmak üzere üretiminin birçok alanında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Kennedy, 1991). Çeliğin kullanımı ile hem ülkeler arası ticaret gelişmiş hem de ulaşım ve haberleşmede kolaylık sağlanmış hem de lojistik olarak farklı alternatifler elde edilmiş ve bunlar Birinci Dünya Savaşı zamanında kullanılmıştır. (Görçün, 2016). Aynı zamanda artan demir-çelik kullanımı ağır sanayinin de gelişmesine katkı sağlanmıştır.

İkinci endüstri devriminde yaşanan bir diğer gelişme ise Frederick W. Taylor tarafından 1911'de yayınlanan Bilimsel Yönetimin İlkeleri adlı kitap olmuştur. Çelik fabrikasında yaptığı incelemeler sonucunda kitabı yazan Taylor, çalışanların verimliliğini arttırmak amacı ile Taylorist üretim tekniğini geliştirmiştir (Kabaklarlı, 2016). Kitapta işletmelerin optimum verim sağlaması için gereken koşul olarak kaynakların etkin şekilde kullanılması gerektiğini ileri sürmüştür. Verimli üretimin ayrıca iş yerindeki görevlerin birbirinden ayrılması ile mümkün olacağını savunmuştur. Taylor yönetimi bilimsel olarak incelediği için literatüre Taylorizm olarak geçmiştir (Barutçu, 2019). Taylor, işçilerin daha az ücret ile çalışmaları için işçi sınıfına herhangi bir bilgilendirme yapılamaması gerektiği üzerinde durmuştur. Bu şekilde vasıfsız hale getirilecek çalışanlar daha düşük ücretler ile daha uzun sürelerde çalışmış olacak ve üretim miktarı artmış olacaktır. Esasında üretim sürecinin bütün aşamalarının yönetimin elinde bulunmasını ifade etmektedir. Kafa ve kol gücünün birbirinden ayrılarak, üretim sürecinin tüm aşamalarının parçalanmak suretiyle basitleştirilmesi esasına dayanmaktadır (Sandrone, 2005). Daha az ücret ile daha çok üretim yapılması fikriden dayanan ilkeler dönemin işletmeleri için kârlı olarak kabul edilmektedir (Yıldırım, 2019). Henry Ford ise Taylor tarafından oluşturulan ilkeleri daha da ileri taşıyarak

Fordist üretim tekniğini ortaya koymuştur. Fordist üretim tekniğinde bant tipi üretim hayata geçirilmiş ve kitlesel üretimin önünü açmıştır. Bu yöntemi kullanılması bir yandan maliyetleri azaltırken bir üretim süresini azaltarak üretim miktarını arttırmıştır. Temel olarak iki üretim şeklini incelediğinde ise, Taylorist üretim şeklinde daha ucuza daha fazla işçi çalıştırılarak üretim miktarını arttırmaya odaklanılırken Fordizm de ise üretimdeki kayıp zamanlar azaltılarak üretim miktarı arttırılmaya çalışılmaktadır.

Sırası ile kömür ve petrolün üretime dahil edilmesi işletmelere birçok avantaj sağlamış olup üretim sistemlerinde köklü değişimlere yol açmıştır. Ancak zamanla sürdürülebilirlik kavramının da önem kazanması ile fosil yakıtların hem sürdürülebilir olmaması hem de yüksek maliyet yol açmaları elektrik enerjisine geçişin yolunu açmıştır. Elektrik enerjisi ile çalışan motorlar üretimdeki yerlerini bu şekilde almışlardır. Seri üretim kavramı da ilk olarak bu dönemde ortaya çıkmıştır. Elektriğin üretimde kullanılması sayesinde seri üretimin başlangıcı sayılan taşıma bantlarının ilk örneği Cincinnati mezbahalarında 1870 yılında ortaya çıkmıştır (Arkan ve Derya, 2018). Henry Ford geliştirdiği ilkeler doğrultusunda her makine için bir çalışan görevlendirerek hem hata payını azaltmış hem de üretimi standartlaştırarak seri üretime geçmiştir. Bu şekilde üretimde verimliliğin arttırılmasını sağlamıştır. Fordizm hem üretim sürecini hem de ürünün standart hale getirerek yeni bir üretim yaklaşımı sunmuştur (Öztuna, 2017).

Fordizm, ilk kez Ford otomobil fabrikasında uygulanmıştır. İşçileri vasıfsız bir hale getirerek, niteliklerine olan bağımlılığı en düşük düzeye getirilmiş ve her çalışanın sürekli aynı işlemi gerçekleştirmesi standartlaştırılmıştır. Üretim süreci, işlem sırasına göre dizilmiş makine ve iş istasyonları fordist montaj hattının ortaya çıkmasını sağlamıştır (Ansal, 1996). Fordist üretimde her bir parça bant üzerinde ilerlemekte ve sırası ile kişiler tarafından montaj işlemi yapılmaktadır. Buradaki asıl amaç bir bant üzerinde çok sayıda ürün çıkartmak olup aynı zamanda üretimin standart bir hale getirilerek insan kaynaklı hataların ortadan kaldırılması istenmektedir. Bu sistemde çalışanların niteliği göz ardı edilmekte ve yapılan iş bölümü ile çalışanlar farklı bir işe kolaylıkla yapabilmektedir. Fordizm ile birlikte gerçekleştirmeye başlayan seri üretim genel olarak verimliliğin büyük ölçüde artmasına yardımcı olmuştur. (Sedefçi, 2018). Fordizm hem üretim sürecini hem de ürünün standart hale getirerek yeni bir üretim yaklaşımı sunmuştur (Öztuna, 2017). Henry Ford, model T serisi otomobilin üretiminde, çalışanların daha katma değerleri çalışabilmeleri için şekil 2.2’de gösterilen hareketli bantlar ile çalışan montaj hatlarını kullanmıştır.

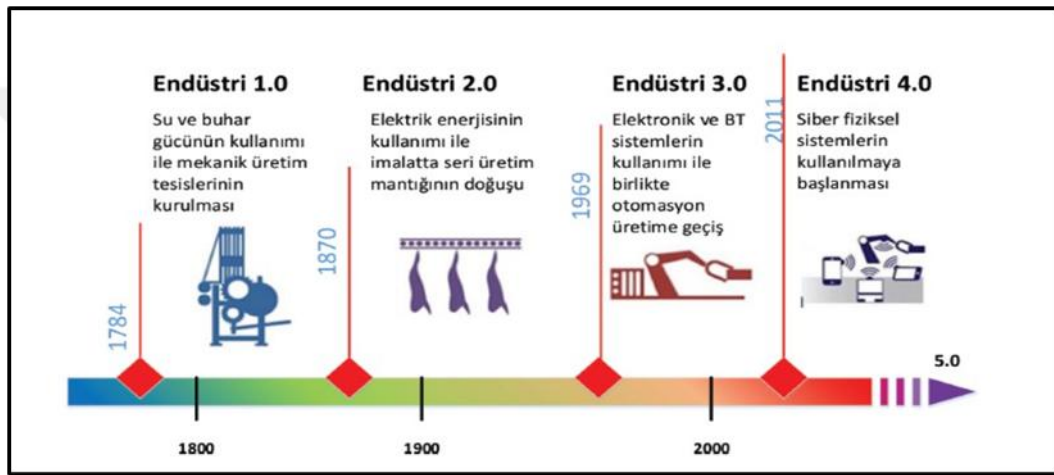


Şekil 2.2. Fordist üretim biçiminde montaj hattı (Eroğlu,2019)

Hareketli bantlar sayesinde çalışanlar arasında yapılan iş bölümü üretim sürelerini azaltırken üretim miktarını da arttırmıştır. Artan üretim miktarı da zamanla araba fiyatlarının da düşmesini sağlamıştır. 1960'lara gelindiğinde fordist üretim sürecinde birtakım olumsuzluklar baş göstermeye başlamıştır. Sürekli aynı işi yapmak zorunda kalan işçilerde bıkkınlık oluşmaya başlamış ve dolayısıyla işçi değiştirme hızı yüksek seviyelere ulaşmıştır. Bu duruma çözüm olarak, Henry Ford işçilere fabrikada çalışmaları için günde beş dolar vermek zorunda kalmıştır. Kısaca tüm bu gelişmelerin ortaya çıkmasını montaj hattında üretimin başlaması ve yüksek ücretler sağlamıştır. Araba üretimindeki bu gelişmeler daha sonra tüm endüstriye yayılmıştır (Sercan, 2019; Sarıkulak, 2018).

Elektrik, endüstriyel yapılarda büyük değişimler meydana getirmek ile birlikte sosyal alanlarda da büyük değişimlere yol açmıştır. Thomas Edison'un ampülü icat etmesi ile beraber kurulan elektrik santralleri ile ev ve sokaklara elektrik verilmeye başlanmıştır. Bununla birlikte halkın sosyal yaşantısında da gözle görülür bir rahatlama meydana gelmiştir (Kennedy, 1991). 1863'te Londra'da dünyanın ilk metrosu açılmış ve ikinci endüstri devrimi ile 1990 yılından itibaren elektrik enerjisi ile çalışmaya başlamıştır. Daha sonra sırası ile Paris ve Berlin metroları faaliyete geçmiştir. Yine aynı yıllarda elektrik enerjisinden faydalanılan ilk tramvay ve trende kullanılmaya başlanmıştır. Bu doğrultuda bakıldığında ulaşım alanında büyük bir ilerleme yaşandığı söylenebilir (Kennedy, 1991). Bu devrim döneminde diğer

önemli gelişmeler ise iletişim alanında yaşanmış olup telefon ve telgraf bu dönemde ortaya çıkan en önemli araçlar olmuştur. Bunun yanı sıra makineleşmenin matbaacılık üzerindeki etkisi ile ortaya çıkan ve gazete üretiminde büyük değişikliklere yol açan linitop dizgi makinası, ilk pratik daktilo ve fotoğrafçılığın önünü açan Kodak kamerasının icadı da ikinci sanayi devrimi döneminde gerçekleştirilmiştir (Görçün, 2016). Bir diğer sektör olan kimya alanına bakıldığında ise sentetik boyanın üretilmeye başlanması ile sentetik ürünler piyasaya çıkmaya başlamıştır. Aynı zamanda aspirinden suni gübreye kadar birçok madde bu dönem içerisinde ortaya çıkmıştır. İkinci sanayi devrimi dönemi aynı zamanda ilk elbise ve ayakkabı fabrikalarının kurulduğu dönem olmuştur. (Kennedy, 1991).



Şekil 2.3. Tarihte endüstri devrimleri (Alçın,2016)

İkinci sanayi devrimi genel olarak en büyük ekonomik büyümenin gerçekleştiği dönem olmuştur. Şekil 2.3'te gösterildiği üzere temel olarak birinci sanayi devrimini takip etse de teknolojik olarak birçok ilerleme kaydedilmiş ve en önemlisi makineleşme konusunda büyük adımlar atılmıştır. Seri üretim kavramının da ilk kez kullanıldığı bu dönemde otomobil, telefon, elektrik ışığı gibi önemli birçok ürün ortaya çıkmıştır. Tüm bunlar göz önüne alındığında ikinci sanayi devrimi daha sonra gerçekleşecek diğer devrimleri tetikleyen önemli bir süreçtir.

2.3. Üçüncü Sanayi Devrimi (Endüstri 3.0)

Üçüncü endüstri devrimine kadar geline süreci genel olarak bakıldığında, buhar makinesinin ortaya çıkışı ile başlayan birinci endüstri devrimi kömür enerjisi yerine petrol kullanılmaya başlaması ve elektrikli motorları geçiş ile yerini ikinci endüstri devrimine bırakmıştır. Bu süreç boyunca ülkelerde sanayileşme artmış ve ekonomik krizler baş göstermiştir. Dolayısı ile ilk iki dönemde sanayileşme için çok önemli gelişmeler yaşanmış

olsa da negatif yönlerde ortaya çıkmıştır. Bu krizlerin etkisi ortadan kalkana kadar üçüncü endüstri devrimi başlayamamıştır. Bu süreçte artan üretimi karşılamak için daha fazla kaynağa ihtiyaç duyulmuş ve bu da doğal kaynaklarda bir azalmaya neden olmuştur. Dolayısı ile sürdürülebilir bir üretim anlayışı geliştirmek ve çevreye daha az zarar vermek için yeni teknolojik gelişmeler ve yeni enerji kaynakları arayışına başlanmıştır. Bu arayış üçüncü endüstri devriminin ortaya çıkışına yol açmıştır. Üçüncü sanayi devriminin başlangıcının bilgisayarların üretime dahil edilmesi ile endüstride otomasyon sistemlerinin kullanılmaya başlanması olduğu söylenebilir. Otomasyonun kullanımı ile müşteri istekleri doğrultusunda üretim yapılmaya başlanmış olup esnek üretim anlayışına geçilmeye başlanmıştır (Helfgott, 1986; Koçel, 2013; Albert, 2015). Dolayısı ile ilk iki endüstri devrimindeki kitlesel üretim yerini esnek üretime sistemine bırakmıştır. Bu doğrultuda en önemli gelişme Japonya’da yaşanmış ve aynı bant üzerinde farklı araba modelleri üretilmeye başlanmıştır. Bu sistem daha sonra farklı endüstrilerde de örnek alınmaya başlanmıştır (Parlak, 1999). Bu gelişmelerin ardından ortaya çıkan internet devrimi de üçüncü endüstri devriminin çıkışını hızlandırmıştır.

3. Endüstri devrimi, 1960’ lı yıllarda bilgisayarların ilk kez ticari amaçlı kullanılması ile başlamış ve ilerleyen yıllarda web teknolojisinin gelişmesiyle internet kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır (Gordon, 2012). Özetle bu dönemin en önemli özellikleri bilgisayar, dijital ürünler ve internet olarak söylenebilmektedir.

İlk programlanabilir bilgisayar ve ilk programlanabilir elektronik bilgisayar da bu yıllar içerisinde bulunmuş ve zamanla boyutları küçülerek daha küçük aygıtlar haline gelmişlerdir. Bilgisayar alanındaki bir diğer gelişmede Willliam Shockley’in mikroçip üretiminde silikon kullanması ile yaşanmıştır. Bu gelişme sonucunda boyutu küçülen bilgisayarlar giderek yaygınlaşmaya başlamış ve birçok faaliyetin bilgisayarlar üzerinden yapılmasına zemin hazırlamıştır (Görçün, 2017). Bu süreçte bilgisayarların yaygınlaşması Bill Gates tarafından Windows işletim sisteminin ortaya çıkmasını beraberinde getirmiş ve bilgisayarlar kişiselleşerek cepte taşınabilecek boyutlar halini almıştır. (Görçün, 2017). Dönemin en büyük gelişmelerinden biri olan internet olup, ABD’de ortaya çıkan ARPANET temelde bilgisayarlar arası veri aktarımı üzerine kurulu olmakla birlikte internetin ilk ortaya çıkış şeklidir (Özdoğan, 2017)

Üretim sistemlerinde bilgisayarın kullanılması ile birçok sistem hayatımıza girmeye başlamıştır. 1952 yılında Ford Motor Company’nin kullandığı hareketli montaj hattı en önemli gelişmelerden biri olmakla birlikte bir diğer en önemli ilerleme ise Amerika Birleşik

Devletleri'nin hava savunma departmanında parça üretimi için nümerik kontrol (NC) teknolojisinin kullanımı olmuştur. Yaşanan bu teknolojik gelişmelerin ardından üretim sistemlerini otomatikleştirecek yazılım destekli programlara ihtiyaç duyulmuştur. Bu doğrultuda hayatımızı farklı teknikler dahil olmuştur. Bu dönemde bilgisayarlı nümerik kontrol (CNC) ilk defa kullanılmaya başlanmıştır. Farklı şekillerin bilgisayarda tasarlanıp CNC sistemin üzerinde yapılmasına olanak sağlayan bilgisayar destekli yazılım programı (CAD)'da yine bu dönemde kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde üretimde önemli bir yere sahip olan PLC sistemleri de bu dönemde ortaya çıkmaya başlamıştır. 1990'lara gelindiğinde ise PLC'ler ile birliktemakinelerin kontrolünü sağlayabilecek bilgisayarlar hayatımıza girmeye başlamıştır. (Lipson ve Zalm, 2011; Hayden, Assante ve Conway, 2014). Otomasyonun başlangıcı olarak görülen bu dönemin temelini PLC, bilgisayar ve CNC teknolojileri oluşturmaktadır. (Albert, 2015). Bu dönemde uluslararası ürün üretme konusunda da farklı adımlar atılmıştır. Bir ürünün üretim aşamalarını farklı ülkede tamamlaması ve farklı ülkelerde satışa çıkmasının önü açılmıştır. Dış kaynak kullanımının da bu dönemde ortaya çıktığı söylenebilir (Görçün,2016) Ürünlerini daha ucuza üretilip satışa sunmak isteyen işletmeler üretim maliyetinin daha düşük olduğu ülkelerde ürünü ürettirip kendi markası ile farklı ülkelerde satışa sunarak kazançlarını arttırmışlardır. Özellikle ucuz işgücü arayışının başladığı bu dönemde büyük işletmelerin ürünlerini Hindistan ve benzeri ülkeler üretmeye başlamıştır. Bu durumda ülkelerdeki üretim hacminin artması ile yeni pazarlar oluşmaya başlamıştır. Üçüncü endüstri devriminde pazara dahil olup, değişime ayak uydurmayı başaran özellikle Çin ve Hindistan, teknoloji üretimini kırsal kesimden Şangay, Bombay ve Pekin gibi büyük kentlere taşımış ve böylece yüksek teknoloji üretimini sağlamıştır (Özdoğan, 2017).

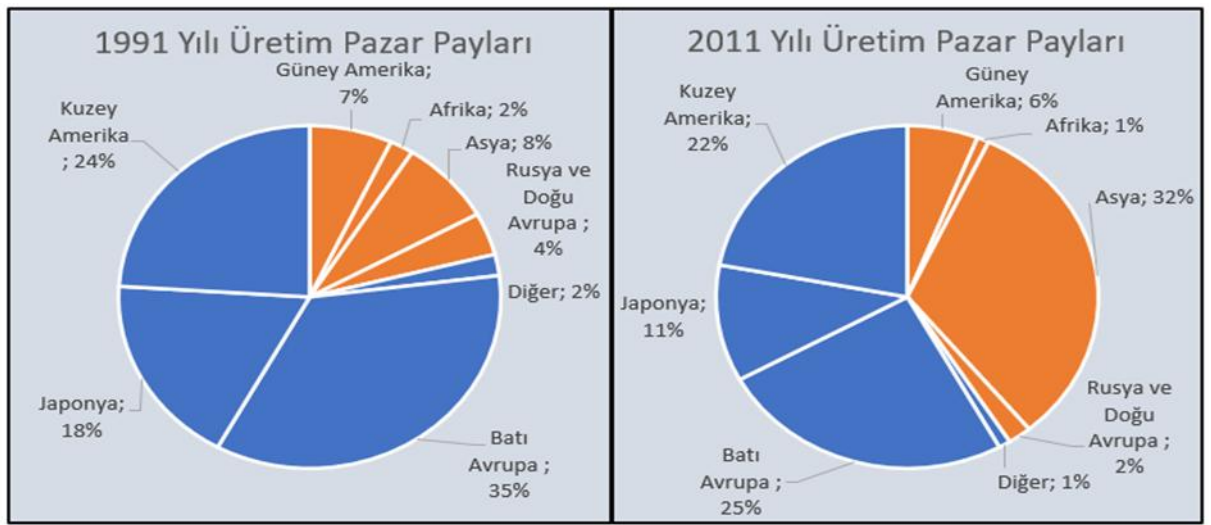
Üçüncü endüstri devrimi ile yalın üretim sisteminin de temelleri ortaya atılmıştır. Bu sistem ile israfın önlenmesi amacıyla olup üretimdeki tüm iş yapış şekilleri değişime uğramıştır. Fazla stok tutulmaması gerektiğini savunan yalın üretim anlayışı üretim maliyetlerinin büyük oranda azaltılmasına yardımcı olmuştur. Yalın üretim sistemi ilk olarak Japonya'da bulunan Toyota firmasında uygulanmaya başlamıştır. Sistemin faydasını anlayabilmek amacı ile Ford ve Toyota firmaları incelenmiştir. Ford üretim hattı hiç durmadan çalışmakta iken Toyota üretim hattı hata düzelene kadar durmaktadır. Bu sayede Toyota firmasının verimliliği daha yüksektir ve stok tutma süresi daha azdır. Aynı zamanda Toyota firmasının araç üretmesi için gereken zamanı yalın üretim sistemine geçmeyen firmalara oranla çok daha azdır. Tüm bu avantajları sayesinde yalın üretim sistemi 1990

yılından sonra birçok sektörü etkisi altına almıştır (Sarıkulak, 2018). 3.sanayi devrimi ile ortaya çıkan bir diğer önemli konu ise “sürdürülebilirlik” kavramının gündeme gelmesidir. Birinci ve ikinci endüstri devrimleri sürecince kullanılan kömür, petrol ve buhar gücü gibi enerji kaynakları kullanılırken yenilenemez enerji kaynaklarının yarattığı olumsuzluklar ve çevreye verdiği zarar insanlarda çevresel olarak duyarlılığın artmasına yol açmıştır. Bu sebeple rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynakları önem kazanmıştır. Bununla birlikte sıfır emisyonlu ulaşım, yeşil ekonomi, sanayiler arası yaygın ilişkiler, sanayinin küreselleşmesi ve uluslararası ticaretin gelişmesi konuları bu dönemin önem arz eden diğer konularını oluşturmaktadır (Özkurt, 2016). Üçüncü sanayi devrimi süresince yaşanan tüm bu gelişmeler makine odaklı üretimi ön plana çıkarmış ve insan gücünün önemi giderek azalmıştır. Otomasyonun endüstride büyük bir yer kapladığı yeni üretim tarzında robotlar ve yazılım destekli sistemlerin kullanımı artmıştır. Aynı zamanda ucuz işgücü için işletmeler ülkeler arası üretime geçerek dış kaynak kullanımına başlamıştır. Bu dönemde meydana gelen bilimsel ve teknolojik gelişmelerin hızlanarak devam etmesi dördüncü endüstri devriminin de başlamasını tetiklemiştir. Yapay zekâ ve nesnelerin interneti gibi birçok yeni nesil teknoloji üçüncü endüstri devrimi daha sona ermeden yeni bir devrimin çıkışına neden olmuştur. Bu dönemde meydana gelen köklü değişimler daha radikal değişimleri de beraberinde getirerek bir sonraki dönemde devam etmiştir.

2.4. Dördüncü Sanayi Devrimi (Endüstri 4.0)

Endüstri 4.0, Alman hükümetinin üretimde ileri teknolojilerin kullanılması konusunda yaptıkları bir proje ile başlayan yeni nesil teknolojiler ve farklı üretim anlayışları endüstri 4.0'ın zeminini hazırlamıştır. Endüstri 4.0 kavramı ilk kez 2011 yılında düzenlenmiş olan Hannover Fuarı'nda tanıtılmıştır (Banger, 2016). Endüstri 4.0 Almanya' nın da sanayi politikası olarak benimsemesiyle 2011 yılında resmi bir şekilde başlamıştır. Üretimde uygulanmaya başlayan politikaların geçerliliği ve işlevselliği oluşturulan gruplar tarafından takip edilmiş ve üretimde yaşanan bu değişim süreci hükümete raporlanmıştır (Öztuna, 2017). Daha önceki endüstri devrimlerinde üretimle ilgili kalite problemleri göz önüne alınırken 2000'li yıllara gelindiğinde artık dünya ekonomisi küreselleşmeye başlamış ve maliyet problemleri işletmelerin öncelikli problemi olmaya başlamıştır. 1800'li yılların ardından üretim maliyetlerini azaltmak amacı ile büyük sermayeleri işletmeler üretimlerini Asya ülkelerine kaydırmaya başlamışlardır. Buradaki asıl amaç düşük işgücünden faydalanmaktır. Fakat zaman ilerledikçe gelir dağılımındaki adaletsizliği ortadan kaldırmak amacı ile asgari

ücret yükseltilmiş ve işgücü maliyeti yükselmeye başlamıştır. Bu da ABD ve Avrupa ülkelerini üretim sistemlerini geliştirmek için farklı arayışlara yöneltmiştir. Endüstri 4.0'a geçişi hızlandıran bir başka etken ise aynı zamanda Çin'in satış gelirinin diğer bölgeleri geride bırakması olmuştur. Şekil 2.4'te görüldüğü gibi bu süreçte Türkiye, Çin ve Hindistan gibi gelişmekte olan birçok ülke kazandıkları finansal güç sayesinde gelişmiş ülkeler ile rekabet eder hatta onlara karşı üstünlük kurar hale gelmiştir (Yazıcı ve Düzgaya, 2016). Tüm bu ekonomik gelişmeler Almanya başta olmak birçok ülkeyi daha akılcı, daha fazla katma değer yaratan, inovasyona önem veren ve üretim miktarını arttıracak olan endüstri 4.0 kavramını uygulamaya itmiştir.



Şekil 2.4. Üretim pazar paylarının karşılaştırılması (1991-2011) (Yazıcı ve Düzgaya, 2016)

Endüstri 4.0 ile birçok yeni nesil teknoloji hayatımıza dahil olmuştur. Özellikle imalat sanayisinde çok önemli adımlar atılmıştır. Endüstri 4.0 kavramının üretime entegre edilmesi ile akıllı fabrikaların oluşturulması amaçlanmaktadır. Akıllı fabrikalar, otomasyon sistemlerinin kullanıldığı, makinelerin birbiri ile haberleştiği ve veriden öğrenen sistemler sayesinde otomatik karar mekanizmalarının olduğu yapılar olarak tanımlanabilir. İmalat teknolojileri, ortaya çıkan yeni kavramı günümüz koşullarında uygulanabilir duruma getirmek için otomasyon ile veri değişimi alanlarında siber-fiziksel sistemler, nesnelerin interneti ve depolama sistemlerini kullanılabilir duruma getirmiştir (Kagermann, 2013). Yeni nesil teknolojilerin üretim sistemlerine uyarlanması ile operatöre gerek kalmadan daha hızlı bir şekilde üretim gerçekleştirilebilecektir. Böylelikle hem üretim için gerekli birim zaman azalacak hem de insan kaynaklı hatalar önlenmiş olacaktır. Aynı zamanda bu dönemde daha çok kullanılmaya başlanan sensörler ve PLC sistemler yardımı ile her bir makinenin verileri tam zamanlı olarak takip edilecek ve planlanan bakım çalışmaları ile oluşacak arıza kaynaklı

zaman kayıplarının önüne geçilecektir. Bu şekilde işletmeler hem daha hızlı ve kalite bir şekilde çalışmalarını yürütmüş olacaklar hem de gereksiz duruşları önleyerek üretimde devamlılığı sağlayabileceklerdir (Banger, 2017).

Özet olarak Endüstri 4.0 kavramının benimsenmesi ve üretim sistemlerine uyarlanması ile hem israfların önüne geçilmekte hem de hatalı veya fazla üretimin önlenerek verimlilik artışı sağlanabilmektedir. İşgücünün olabildiğince minimize edilmesinden kaynaklı maliyet, enerji, ısı, zaman, kaynak tasarrufu sağlanmakla birlikte daha hızlı, kaliteli ve güvenli üretim gerçekleştirilebilecektir (URL-4, 2017). Tüm bu kazanımları doğrultusunda günümüzde endüstri 4.0 kavramı işletmeler için büyük bir önem arz etmekte ve beraberinde getirdiği yeni nesil ve birbiri ile entegre olarak çalışabilen teknolojiler uygulanmaya devam etmektedir.



3. ENDÜSTRİ 4.0 KAVRAMI VE TEMEL BİLEŞENLERİ

3.1. Endüstri 4.0 Kavramı

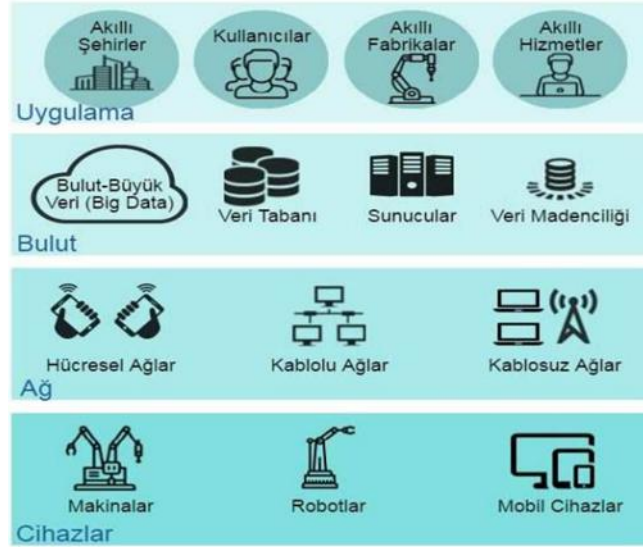
Dördüncü endüstri devrimine gelinceye kadar ki süreçte işletmeler daha fazla üretim yapmaya başlamış ve farklı üretim anlayışlarını takip etmişlerdir. Üretimin artması kazancı arttırsa da bir taraftan doğal kaynakların azalmasına da neden olmuştur. Dolayısı ile üçüncü sanayi devrimi ile sürdürülebilirlik kavramı ön plana çıkmaya başlamıştır. Endüstri 4.0'ı kavramı da Almanya Eğitim ve Araştırma Bakanlığı'nın ülkelerin geleceğe yönelik kalkınmasının ve bu kalkınmanın devamlılığını sağlamak için başlattığı çalışmalar sonucunda ortaya çıkmıştır. “Yüksek-Teknoloji Stratejisi 2020'nin Gelecek Projeleri” başlığı ile yayınlanan projelerin dikkate aldığı alanlar karbon emisyonun azaltılması, akıllı ve çevreci kentler kurulması ve doğal kaynakların tüketimini azaltacak alternatif enerjilerin kullanımı olmuştur. Tanıtılan bu projelerden biri de Endüstri 4.0 kavramı olup 2011 yılında Hannover Fuarı'nda tanıtılmıştır. (Yüksekbilgili ve Çevik, 2018). Bu projeler Alman hükümetinin 2020 Yüksek Teknolojili Üretim projesidir. Projeye ilk etapta 14,6 milyar euro yatırım yapılması kararlaştırılmıştır. Yatırımların ilk olarak birkaç alanda yapılması karar verilmiştir. Yatırımlar öncü teknolojilerin yayılması, Ar-Ge faaliyetlerinin geliştirilmesi, bilim ve iş dünyasının birlikte çalışmasını sağlamak, yetenekli girişimcileri desteklemek gibi alanlarda yapılacaktır (Kabaklarlı, 2016). Bu projelerin ortaya çıkışındaki ana sebebin Almanya ve Amerika Birleşik Devletleri gibi ülkelerin pazardaki rekabetçi güçlerini kaybetmemek için ortaya çıktığı söylenebilir. Bu sayede Güneydoğu Asya ülkelerinin arttırdığı üretim kapasiteleri karşısındaki konumlarını tekrar yükseltmek ve koruma imkânı sağlayabileceklerdir. Yapılan projeler sayesinde sanayide verimliliğin artacağı ve üretim maliyetlerinin büyük ölçüde azalacağı öngörülmektedir (Banger, 2016). Endüstri 4.0 ile internet erişiminin de geniş alanlara yayılması bilgi ve iletişim teknolojileri alanında büyük gelişmeler yaşanmıştır. Bu gelişmeler doğrultusunda üretim yapıları köklü bir değişim sürecinin içine girmiştir. Fakat bu değişim sadece üretim faaliyetlerini değil aynı zamanda yönetsel süreçleri de doğrudan etkilemektedir. İçinde bulunulan bu süreç ülkeleri de farklı strateji ve yaklaşımlar üretmeye teşvik etmiştir. Bu yaklaşımın özünde ise; makinaların sadece ürünü işlemek ile kalmayıp bununla birlikte ürünün makinalar ile iletişim kurması ve onlara ne yapılması gerektiğini söylemesi yatmaktadır (Yazıcı ve Düzkaya, 2016). Endüstri 4.0 ile üretim ve yönetim sistemlerine dahil edilen yeni nesil teknolojiler sayesinde işletmeler pazar gereksinimlerine daha duyarlı hale gelmiş ve otomatikleştirilen montaj hatları sayesinde taleplere hızlı bir

şekilde geri dönüş yapabilme özelliği kazanmışlardır. Dördüncü endüstri devrimi ile sosyal iletişim ağlarının da ön plana çıkması ile ürünlerin kalitesi, çeşitliliği gibi konularda tüketiciler daha seçici olmaya başlamışlardır. Bu sebeple işletmelerin tüketici davranışı odaklı sistemleri baz alarak kendi durumlarının farkına varma ve rakipleri ile karşılaştırma yaparak gerektiğinde kendi sistemlerini yapılandırma özelliklerini kazanması gerekmektedir (Lee, 2014).

Endüstri 4.0 kavramına ilişkin birçok tanım bulunmaktadır. Banger (2017) Endüstri 4.0'ı bilişim, iletişim, internet, otomasyon ve veri toplama teknolojilerinin bütünleşmesi olarak tanımlarken, bir platformda ise endüstri 4.0 şu şekilde tarif edilmiştir: “Endüstri 4.0, ürünlerin ve üretim sistemlerinin yaşam döngüsündeki bütün değer zincirinin organizasyon ve yönetiminde yeni bir seviye olan Dördüncü Endüstri Devrimi'ni tanımlar. Bu döngü, sürekli artarak bireyselleşen müşteri isteklerine odaklanır ve fikir aşamasından başlayarak ürün geliştirme ve üretim siparişinden, bir ürünün son kullanıcıya dağıtımını ve geri dönüşümünü de kapsayacak şekilde tüm zinciri içine alan hizmetleri içerir (Siemens Türkiye, 2016).

Günümüzde işletmeler pazardan daha fazla pay alabilmek amacı ile endüstri 4.0'a daha fazla eğilim göstermektedirler. Endüstri 4.0 ile üretim sistemleri daha esnek bir hale gelmiş ve ürünün çıkış hızı ve kalitesi yükselmiştir. Bunun yanı sıra Endüstri 4.0 ile makineler birbirine bağlanabilmekte ve tahminleme araçları kullanılabilir. Böylece üretilen veriler sistematik olarak dönüştürülerek belirsizlikler açıklığa kavuşturulabilmektedir. Bu şekilde işletmelerin karar mekanizmaları kuvvetlenmektedir.

Endüstri 4.0'ın tüm pozitif etkileri ile üretim yapılarında çok sayıda önemli değişimin meydana gelmesi beklenmektedir. Yeni nesil teknolojilerin üretime uyum sağlaması ile ürünler müşteri isteklerine göre kişiselleştirilebilecek, daha az kaynak kullanılarak daha fazla ürün üretilebilecek ve çıkan ürünlerin kalitesinde artış yaşanacaktır (Özsoylu, 2017). Dijitalleşmenin her ülke ve sektör tarafından takip edildiği ve hayata geçirilmeye çalışıldığı bu dönemde üretim sistemlerinin takibi kolaylaşacak ve çevreci üretim sistemleri ön plana çıkacaktır.



Şekil 3.1. Endüstri 4.0 genel görünümü (Alçın, 2016)

Şekil 3.1.'de endüstri 4.0'ın genel görünümünü görülmekte olup dört düzeyden oluşmaktadır. Bu dört düzey; cihazların oluşturduğu fiziksel alan, cihazlar arasındaki iletişimi sağlayan ağlar, bulut sistemi içerisinde bulunan büyük veri sistemleri ve uygulama düzeyini gösteren akıllı fabrikalar, şehirler, hizmetler ve kullanıcılardan oluşmaktadır.

3.2. Endüstri 4.0'ın Temel İlkeleri

Endüstri 4.0 internet ve robotik teknolojilerin doğmasından itibaren gelişimini devam ettirebilmesi ve uygulanabilmesi için bazı temel ilkeleri bünyesinde barındırır (Soylu,2018).

Karşılıklı çalışabilirlik ilkesi, insanların, akıllı fabrikaların ve araçların nesnelerin interneti ve hizmetlerin interneti teknolojilerinden faydalanan birliktelik prensibine dayanmaktadır (Yıldız ve Ağdeniz, 2019). Kurulan bu iletişimde herhangi bir hata meydana geldiğinde sisteme müdahale etmek mümkün olup, bu ilke bir fabrikayı akıllı yapabilmek için öncelikli olarak uygulanmalıdır.

Özerk yönetim ilkesi, siber-fiziksel sistemlerin akıllı fabrikalar içerisinde şirketlerin ve makinelerin kendi başlarına karar verebilmeleri için gerekli olan yetenektir. Bu ilkenin uygulanması ile üretim sistemlerinde yer alan makineler, verilerin analiz edilmesi ile elde ettikleri bilgiler doğrultusunda üretim kararlarını alabilmektedirler. Bu da üretime esneklik kazandırılmasına zemin hazırlamaktadır.

Hizmet Oryantasyonu ilkesi, hizmetlerin interneti üzerinden siber-fiziksel sistemler, insanlar ve akıllı fabrika servislerinin sunulmasını ifade etmektedir (Özkan, 2018). Bu ilke ile herkes sanal ve dijital platformları kullanarak yararlı hizmet ve bilgilere ulaşabilir.

Modülerlik ilkesi kapsamında akıllı fabrikaların mevsimsel değişiklere, farklı trendlere ve günümüzdeki değişen çevre koşullarına hızlı bir şekilde adapte olması gerekmektedir. Bu ilke de akıllı fabrikalara esnek bir adaptasyon sistemi sağlanması üzerine kurulmuş ve sistemsel değişikleri kolaylaştırmayı amaçlamaktadır (Yıldız ve Ağdeniz, 2019).

Sanallaştırma ilkesi, üretim sistemlerinde var olan fiziki sistemlerin sanal bir ikizinin yani kopyası oluşturulmasını ifade etmektedir. Bu doğrultuda gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları sayesinde üretim süreçleri daha şeffaf bir hale gelecek ve müdahale edilmesi gereken durumlar önceden görülebilecektir (Yıldız ve Ağdeniz, 2019). Sanallaştırma ilkesinin uygulanabilmesi için fabrikaların farklı yazılım sistemleri, sensörler ve PLC sistemler gibi veri alma araçlarını üretime entegre etmesi gerekmektedir.

Gerçek-zamanlı yeteneği ilkesi ise, akıllı bir fabrikada üretim sırasında tüm verilerin anlık olarak toplanıp, depolanması ve analiz edilmesi ile veriden öğrenerek karar verebilme yeteneğini ifade etmektedir. Endüstri 4.0'da tüm üretim faaliyetleri, sistemde gerçekleşen hataların bulunabilmesi, gerekli düzenlemelerin yapılabilmesi ve bu düzenlemeler sonucunda karar alınabilmesi için gerçek zamanlı olarak izlenmektedir (Yıldız ve Ağdeniz, 2019). Bu şekilde üretimde meydana gelebilecek kayıpların önüne geçilerek verimlilik arttırılmış olacaktır.

3.3. Endüstri 4.0 Avantaj- Dezavantajları ve Muhtemel Etkileri

Endüstri 4.0'ın uygulanması endüstriler üzerinde olumlu bir etki yaratıp birçok avantaj sağlarken bazı dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Akıllı sistemler tarafından kontrol edilen, kendini izleyebilen ve veriden öğrenen yapısı ile kendine özgü bir karar mekanizması geliştiren sistemler üretim sistemlerindeki verimliliği büyük oranda arttırmaktadır (Thames ve Schaefer, 2016). Dördüncü sanayi devrimi sürecinde ortaya çıkan tüm teknolojiler üretimde kalite ve esnekliği artırıp müşteri memnuniyetini arttırmada da önemli bir rol oynamakta ve endüstri 4.0'ın avantajları olarak değerlendirilmektedir. Aynı zamanda endüstri 4.0'ın beraberinde getirdiği esnek üretim anlayışı ile pazardaki değişen müşteri isteklerine karşın daha çevik bir üretim anlayışı oluşturulmuştur. Çevresel yönden bakıldığında ise, yeni nesil

teknolojilerin kullanımı ile fosil kaynakların yerini yenilenebilir enerji kaynakları almış ve sürdürülebilirlik açısından önemli bir adım atılmıştır.

Endüstri 4.0, pozitif yönlerine rağmen bazı zorluklara da sahiptir. Küçük ve orta ölçekli işletmeler için endüstri 4.0'a yatırım yapmak açısından finansal sıkıntılar yaşanabilmektedir. Üretimde robot ve birbirleri ile haberleşen makinelerin kullanımı büyük veri depoları oluşturmakta ve buradan anlamlı olan verilerin seçilmesi ve analiz edilerek aksiyon alınması karmaşık bir hale gelmektedir. Üretimin otomasyona dayalı olarak gerçekleştirilmeye başlanması ile en büyük dezavantaj çalışanlar tarafında yaşanmaktadır. Makineleşmenin artması ile mavi yakaya duyulan ihtiyaç giderek azalmaktadır. İnsan-makine ve bilgisayar odaklı üretim sistemlerinde çalıştırılmak üzere nitelikli çalışan ihtiyacı artmakta ve dolayısı ile eleman bulmada zorluklar yaşanmaktadır.

3.4. Endüstri 4.0 Bileşenleri

Endüstri 4.0 olgusu birçok bileşenden oluşan ve bu bileşenler aşağıda sıralanarak şekil 3.2'de verilmiştir:

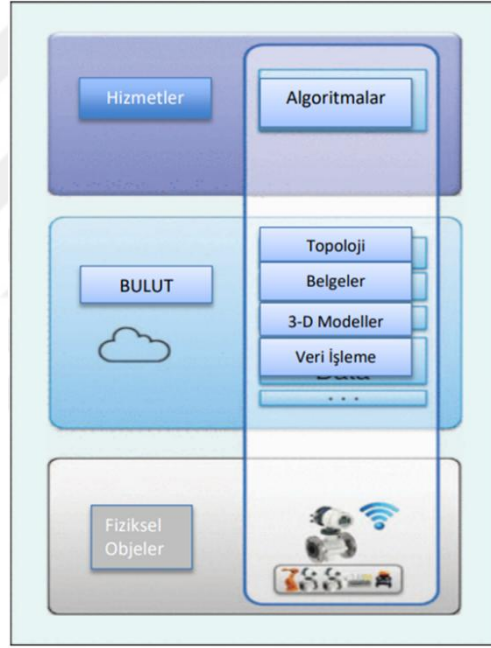


Şekil 3.2. Endüstri 4.0 bileşenleri (TÜSİAD)

3.4.1. Siber Fiziksel Sistemler

Bir nesnenin akıllı olarak tanımlanması, sahip olduğu teknolojinin gömülü sistemleri siber fiziksel sistemler, bulut hesaplama ve büyük veriye dayandığını ifade etmektedir. Fiziksel dünya ile siber dünya arasındaki iletişim ve koordinasyonu içeren yapıların bütünü siber-fiziksel sistemler olarak adlandırılmaktadır (Alçın, 2016). Siber fiziksel sistemler internet aracılığı ile birbirlerine bağlanabilmekte ve kablosuz olarak haberleşebilmektedirler. Bu siber-fiziksel sistemler, kendilerinin gerçek ortamları ve dijital süreçleri hakkında büyük

miktarda veri toplamaktadırlar (Kagermann, 2015).Siber Fiziksel Sistemleri kavramı ilk kez Lee tarafından 2006 yılında ABD’de gerçek dünya ile ilişkili bilgisayar sistemlerinin giderek önemli hale geldiğini göstermek için kullanılmıştır (Bradley ve Atkins, 2015). Siber fiziksel sistemler hayatımızı farklı yönlerde etkilemektedir. Yeni nesil akıllı fabrikalarda bu sistemlerin kullanılması ile üretim planlaması da bilgisayar ortamında yapılacak ve bu sayede hem ürün kalitesi arttırılmış olacak hem de üretim verimliliğinde artış sağlanacaktır (Çevik, 2018). Aynı zamanda üretimdeki birçok aracın birbiri ile haberleşebiliyor olması ile üretimde ortaya çıkabilecek ani sorunlar gerçek zamanlı olarak tespit edilerek hemen müdahale edilebiliyor veya üretimin girdi parametrelerinde seviye sürekli ölçülerek gerekli zamanda otomatik olarak siparişler verilerek stok seviyesi kontrol altında tutulabilmektedir (Kabaklarlı, 2016). Bu da siber fiziksel sistemlerin yeni iş modellerinin oluşmasına ve yeni hizmetlerin ortaya çıkmasına katkıda bulunacağını işaret etmektedir (Banger, 2017).



Şekil 3.3. Siber fiziksel sistemlerin yapısı (Drath ve Horch, 2014)

Şekil 3.3’te siber fiziksel sistemleri oluşturula seviyeler görülmektedir. Otonom taşıt sistemleri, medikal izleme ve endüstriyel süreç denetimleri siber fiziksel sistemlere örnek olarak verilmektedir. Temel de siber fiziksel sistemler iki bileşenden meydana gelmektedir.İlki, birbirleri ile endüstriyel internet üzerinden, atanmış internet adresleri ile iletişim kuran (sistem, cihaz makine, sensör gibi) nesnelerin oluşturduğu ağıdır. İkincisi; fiziksel nesnelerin ve davranışların bilişim ortamında simülasyonu ile oluşturulmuş sanal

uygulamadır. Birincisi gerçek dünyada fiziksel, diğeri bilgisayar ortamında sanal olmak üzere iki sistem uyumlu ve gerçek zamanlı olarak işler (Banger, 2017).

3.4.2. Büyük Veri ve Analizi

Büyük veri kavramının ortaya çıkmasını sağlayan en önemli etken internet olmuştur. Üçüncü endüstri devrimi ile ortaya çıkan internetin giderek yaygınlaşması günümüzde farklı ortamlarda büyük miktarda verinin depolanmasına neden olmuştur. Bu sebeple bilginin güvenilirliği konusu dikkat çeken bir problem haline gelmiştir. Özellikle oluşan bu bilgi kütleli içinde doğru olanı bulmayı büyük veri sağlamaktadır (Arkan, 2018). Günümüzde oluşan bu veri yığını içerisinde doğru veriye ulaşmak ve analiz edebilmek için Büyük Veri Teknolojisi kullanılmaktadır. Büyük veri, temizlenmiş veriyi geleneksel yöntemlerden daha doğru bir şekilde analiz etmemize yardımcı olmaktadır (Witkowski, 2017).

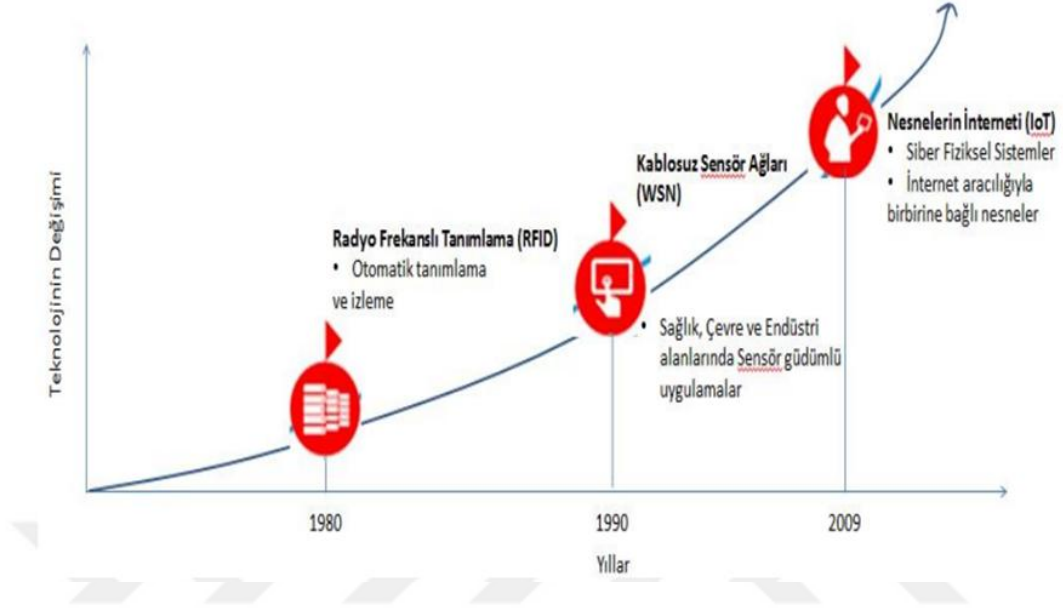
Büyük veri temelde dört adımdan oluşmaktadır. İlk olarak farklı yollar kullanılarak veriler toplanır. İkinci adımda farklı kaynaklardan gelen veriler uzmanlar tarafından ayrıştırılarak analiz için anlam ifade eden verilerin derlenmesi işlemini gerçekleştirirler. Üçüncü adım veri madenciliği olarak tanımlanmakta olup bu aşamada veri modelleri oluşturulur. Veri modellemenin amacı ise veriden öğrenen sistemleri hayata geçirerek aynı durumlar karşısında karar verici mekanizmaları oluşturmaktır. Dördüncü ve son adım ise kullanımdır. İlk üç aşamada yapılan veri analizleri sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda firmaların yeni ürünler oluşturulması ve bu ürünlerin piyasaya sürülmesi sürecidir (Türkoğlu, 2018). Dört aşamada elde edilen veriler farklı endüstrilerde farklı amaçlar doğrultusunda kullanılmaktadır. Burada önemli olan doğru verinin doğru yöntemler ile analiz edilmesini sağlamaktır. Büyük Veri yönetiminin üretim süreci içerisinde kullanımı, yakın bir gelecekte kilit bir konu başlığı olması muhtemel bir durumdur. Üretimde sensör, PLC, ERP ve MES gibi farklı kaynaklardan gerçek zamanlı olarak gelen verileri, geçmiş verilerle birleştirerek farklı senaryolar ve modellerle uygulama çerçevesi oluşturmak günümüzde mümkün olmuştur (Siemens, 2016). Günümüzdeki rekabetçi pazar ortamında işletmeler pazar paylarını kaybetmemek ve çevik bir üretim sistemi oluşturarak üretkenliklerini arttırmak için Büyük Veriyi kullanmaktadır. Büyük veri kavramı beş karakteristik bileşen ile tanımlanmaktadır. Miktar, çeşitlilik, hız, doğrulama ve değer bileşenleri büyük veri kavramının ana çerçevesini oluşturmaktadır.

Büyük veri ilk olarak hız, hacim ve çeşitlilik kavramlarını kapsamakta ve 3V olarak tanımlanmaktaydı daha sonra gerçeklik ve değer kavramlarının da ilave edilmesi ile 5V halini almıştır. (Barutcu, 2019). Büyük verinin genel çerçevesini oluşturan bu beş bileşenin İngilizce karşılıklarının baş harfleri “V” ile başladığı için “5V” olarak temsil edilmektedir. Sonuç olarak, büyük verinin toplanması, derlenmesi ve daha sonra farklı araçlar ile analiz edilmesi ile kullanıma hazırlanan verilerin işletmelerde kullanımı ile üretimin verimliliğini arttıracak, maliyetleri düşürecek ve enerji tasarrufu sağlayacaktır (TUSİAD,2016). Büyük veri teknolojisi, hızlı karar almayı kolaylaştırarak işletmelerin müşterilerine anlık olarak sunduğu hizmetleri iyileştirmesine ortam hazırlamış bu da müşteri memnuniyetinin arttırılmasına yardımcı olmuştur. Ayrıca ürün ve hizmetlerde oluşabilecek potansiyel hataların öngörülmesini sağlayan bu teknoloji işletmelere gerekli tedbirleri alabilmeleri için bir sistem sunmuştur. Aynı zamanda karar sistemlerinde büyük veri sistemlerinin kullanımı ile işletmeler birçok koz elde etmişlerdir. Bunlara örnek vermek gerekirse: işletme içerisinde kararlar hem hızlı hem de daha doğru olarak verilebilecek, otomatik karar mekanizmaları ile anlık hizmetler sunulabilecek, daha düşük maliyet ve yüksek verimlilik ile üretim yapılabilecektir (Schwab, 2017). Tüm bu avantajların yanı sıra büyük veri teknolojisi bazı dezavantajlara da sahiptir. Büyük veri teknolojisinin kullanımı için temel olarak internet ortamı kullanılmakta olup dolayısı ile sistem internet ortamından gelebilecek olan tehditlere açıktır. (Alçın,2014). Dolayısı ile siber güvenlik kavramı bu konuda büyük önem arz etmekte ve özellikle hükümetler yurttaşlarının bir başkasının eline geçmemesi gereken mahrem bilgilerini güvence altına alabilmek için hukuksal olarak hesap verilebilirliği sağlamak, bunun için gerekli çalışmaları yapmak durumundadırlar (Schwab, 2017).

3.4.3. Nesnelerin İnterneti

Nesnelerin birbiriyle iletişimini olanaklı kılan yapılara IoT denmektedir. İlk olarak Kopetz (2011) tarafından kullanılan IoT kavramı ile bir işyeri ya da fabrikada bulunan farklı kaynaklardan verilerin toplanabilmesi, çoğaltılabilmesi ve organize edilebilmesi anlatılmaktadır. IoT, süreç kontrollerini hızlandıran bağlantısız bir veri yönetimi sunmaktadır (Alçın, 2016).Gerçek dünyada bulunan nesnelerin içinde gömülü şekilde olan sensörler yani veri toplama cihazları aracılığıyla iletişim kurmaya yarayan sisteme nesnelerin interneti adı verilmiştir (Banger, 2016). Nesnelerin interneti teknolojisinin ilk kez kullanımı 1991 yılında kahve makinesi alanında gerçekleştirilmiştir. Cambridge Üniversitesi akademisyenleri kahve makinesinin doluluk oranını takip etmek amacı ile makine içerisine kameralar

yerleştirmişlerdir. 1999 yılına gelindiğinde Nesnelerin İnterneti kavramı olarak ilk defa Kevin Ashton tarafından kullanılmıştır. Ashton, P&G firmasında yapmış olduğu sunumunda nesnelere RFID (Radyo Frekansı ile Tanımlama etiketleri) ve kullanım alanlarını genişletmek için sensörleri de eklemesi sonucunda Nesnelerin İnterneti oluşturulabileceğini dile getirmesiyle bu kavramı tanımlandı (Türkoğlu, 2018).



Şekil 3.4. IoT 'un evrimi (Manavalan ve jayakrishna, 2019)

Şekil 3.4'e bakıldığında Nesnelerin İnterneti teriminin ilk olarak RFID sistemi ile başladığını söylemek mümkündür. 1980'li yıllarsa otomatik tanımlama ve izleme ile başlayan nesnelerin interneti 1990'lı yıllarsa sensörlerin kullanımı ile farklı alanlarda kullanılmaya başlamıştır. Bununla birlikte 21. Yüzyılın başlarında CPS'ler ve internet aracılığıyla birbirine bağlı cihazların kullanılmaya başlanmasıyla Nesnelerin İnternetinin oluşumunu tamamladığı görülmektedir. Bu teknoloji ile şirketler sahip oldukları tüm varlıkların yönetimi ve kontrolünü daha hızlı ve etkin bir şekilde gerçekleştirebilmektedirler. Nesnelerin interneti organizmasının katmanları şekil 3.5'te gösterilmiş olup; çekirdek, cihaz, iletişim ve bilinç olmak üzere dört ögeden oluşmaktadır. Çekirdek katmanında doğal çevreyi ve sıcaklık, konum, ağırlık, ışık şiddeti, nem, pH değeri, ses şiddeti gibi işlenmemiş veriler oluşturmaktadır. Bu ham veriler daha sonra farklı cihazlar kullanılarak sinyale dönüştürülmekte ve iletişim kanalına iletilmektedir. Gerek insan ile makine gerekse makine ile makine iletişimi için gerekli olan kablosuz ve kablolu iletişim protokol ve altyapısının bulunduğu iletişim katmanında bu veriler işlenmek üzere veri işleme merkezine iletilmektedir.

Hacim olarak küçük veri işleme işlemleri, gömülü sistemler ile gerçekleşirken daha büyük veriler depolanmak üzere bulut bilişim sistemlerine iletilmektedirler. Güvenlik, gizlilik, kimliklendirme, tanıma gibi işlemler de bu katmanda gerçekleştirilmektedir (Gökrem ve Bozuklu, 2016).



Şekil 3.5. Nesnelerin internetinin katmanları (Gökrem ve Bozuklu, 2016)

Nesnelerin interneti teknolojisi, işletmelere üretim safhasındaki en küçük faaliyetleri bile izleyip optimize edebilme imkânı sağladığı için tedarik zincirleri zamanla daha efektif bir hal alacaktır. Nesnelerin interneti teknolojisi ile ortaya çıkan diğer avantajlara ise; üretim süreçlerinin ve yöntemlerinin pratikleşmesi, elde edilecek maliyet avantajı ile kâr ve gelirlerde artış sağlanması, kaynak kullanımı konusunda verimliliğin artması, tüm cihazların akıllı hale gelmesi ile yeni hizmet alanlarının oluşması ve daha az insan gücüne ihtiyaç duyulacak olması örnek olarak verilebilmektedir. Tüm bu avantajlar göz önüne alındığında bu teknoloji ilerleyen zamanlarda tüm nesnelere doğru genişleyerek iletişim yaşamının her alanını ve her nesnesini ilgilendiren bir fonksiyon haline dönüşecektir.

3.4.4. Otonom Robotlar

Endüstri 4.0'ın getirdiği bir diğer yenilik ise otonom robotlardır. Günümüzde işletmelerde kullanılan endüstriyel robotların geliştirilmesi ile ortaya çıkan otonom robotlar, birbiri ile iletişim kurabilmekte ve insanlar ile ortak olarak çalışabilmektedir. Endüstrilerde insan gücünün yetersiz kaldığı durumlarda otonom robotlar işletmelere yardımcı olmaktadır. Aynı zamanda robotlar insanlara oranla birden fazla işi aynı anda yapabilmekte ve öğrenen yapılar olmaları sebebi ile dışarıdan verilen komutaları otomatik olarak gerçekleştirebilmektedirler. Bu özellikleri sebebi ile otonom robotların kullanımının gün geçtikçe artacağı öngörülmektedir. Robot teknolojisi, otomotiv sektörü başta olmak üzere birçok sektörde kullanılmakta ve işletmelere birçok kazanç sağlamaktadır. Endüstriyel işletmelerde kullanılan robotlar üretimdeki etkinliği artırırken objektif analiz etme

yetenekleri sayesinde de insan kaynaklı hataları en aza indirmektedir. Bununla birlikte zaman içerisinde robotların birbiri ile iletişime geçmesi üretimde bütüncül bir otomasyonu da beraberinde getirmiştir. Robot teknolojisi ilerledikçe robotlara sahip olmanın maliyeti azalmakta bu da robotların istihdamını arttırmaktadır. Buna dayanarak ilerleyen dönemlerde robotların birbirleri ile iletişimlerinin artacağını ve insanlarla yan yana güvenilir bir şekilde çalışabileceklerini söylemek mümkündür.

3.4.5. Yatay-Dikey Entegrasyon

Endüstri 4.0'ın üretim sistemlerine entegre edilmesi işletmeler arası entegrasyonu gerekli kılmıştır. Bu teknoloji firmanın değer zincirini oluşturan unsurlar arasındaki bilgi akışının sağlanmasını amaçlamaktadır. Dikey entegrasyon şirketin kullanmakta olduğu tüm aşamalarda teknolojik altyapıda devamlı bir dolaşım ve iletişim yaratmasıdır. Yatay entegrasyon ise firmanın işleme koyduğu planlama ve üretim sürecinin her basamağında kendi içinde ve başka işletmelerin planlama ve üretim basamaklarında var olan adımlar içinde daimî bir dolaşım yaratmasıdır (Tekin, 2018). Bu doğrultudan bakıldığında işletme içerisindeki üretimin doğru bir şekilde ilerlemesini sağlayacak şekilde süreçler arasında bir akış oluşturulmasına zemin hazırlanmıştır. Ancak süreçler akışın tam anlamı ile sağlanması için yatay ve dikey entegrasyonun üretim içerisindeki her noktada uygulanması gerekmektedir. Yatay entegrasyon ile firma ve tedarikçi çalışmasında da önemli kazanımlar elde edilecektir. Bu yeni nesil teknolojinin kullanımı ile siparişler müşterinin istediği zamanda yerine ulaşmış olacak ve tedarik maliyetleri de azalma meydana gelecektir (TÜSİAD, 2016). Dikey entegrasyonda ise üretim içerisinde bulunan tüm sistemler uçtan uça birbirine bağlanmış olacaktır. Bu sayede bir işletme içerisinde yer alan Kurumsal Kaynak Planlaması sistemleri ve diğer tüm sistemler iş birliği içinde çalışacak ve bu da karar süreçlerinin hızlanmasına yardımcı olarak üretimde verimliliği arttırmaya yardımcı olacaktır (TÜSİAD, 2016).

Dördüncü sanayi devrimi ile ortaya çıkan yatay ve dikey entegrasyon, üretim süreçlerinde yaşanan herhangi bir değişiklik karşısında daha hızlı cevap verebilmekte ve bir sorun meydana geldiğinde çok daha hızlı çözüm üretebilmektedir. Yatay ve dikey entegrasyonun gerçekleştirildiği Endüstri 4.0 sayesinde kişiselleştirilmiş üretim kolaylaşacak ve verimlilik artacaktır. Böylece işletmeler esnek bir yapıda ve daha verimli çalışacaktır.

3.4.6. Simülasyon

İş hayatında alınan kararların üretim sistemlerinde uygulanması genellikle uzun ve ciddi bir süreçtir. Çünkü bu süreçte alınan kararlar istenmeyen değişikliklere yol açabilir. Dolayısı ile bu kararları gerçek hayata geçirmeden önce pilot alanlar seçilerek denemeler yapılması gerekmektedir. Fakat bu denemelerin gerçek sistemler üzerinde uygulanması yüksek maliyetlere neden olmaktadır. Endüstri 4.0 ile hayatımıza giren simülasyon kavramı sayesinde bu denemeler sanal ortamda yapılabilmektedir (Schwab, 2016). Simülasyon sayesinde fiziki sistemlerin sanal ortamda bir kopyası oluşturulabilmektedir. Sanal ortamda oluşturulmuş simülasyonlar ile işletmeler yapmayı planladıkları işlemlerin doğruluğunu test etmiş olurlar. Bu sayede istenmeyen sonuçların önüne geçilmiş olur ve işletmeler istenilen sürecin işlenebilirliğini denemeler yolu ile sağlayarak pazarda rekabet üstünlüğü sağlamış olurlar. (Çelen, 2017)

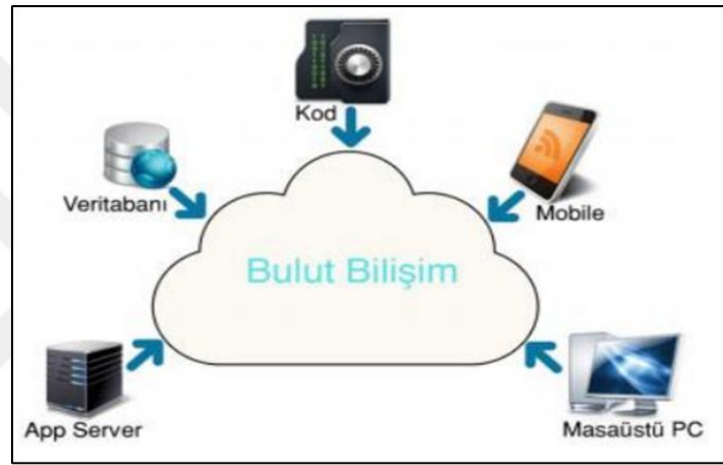
Turizmden mimariye kadar birçok alanda kullanılan simülasyon kavramının en önemli kullanım alanlarından biri de endüstrilerdir. Tesis yerleşimi, ürün tasarımı ve personel planlaması gibi farklı konularda işletmelere yardımcı olan simülasyon teknolojisi yapılacak olan değişiklikleri önce sanal ortama simüle ederek olası sonuçların görülmesine yardımcı olmaktadır. Üretim için test en önemli aşamalardan biri olduğundan dolayı da sistemin uygulanmadan önce analiz edilmesi verimlilik ve kaliteyi de arttırmaya yardımcı olmaktadır. Böylece simülasyonun üretim sürecinde yapılması gereken düzeltmelerin herhangi bir risk almadan yapılmasına ve oluşabilecek kayıpların önüne geçilmesine katkı sağladığı görülmektedir.

3.4.7. Bulut Bilişim Sistemleri

Bulut Bilişim Teknolojisinin temelleri geçtiğimiz yüzyılın ortalarında, 1950'lerde atılmıştır. 1994 yılında bir bulut bilişim şirketi olarak kurulan Amazon, bu teknolojinin gelişiminde liderlik rolü üstlenerek ilk bulut bilişim hizmeti olarak nitelendirilen Amazon S3'ü 2006 yılında kullanıma sunmuştur. 2008'den itibaren de Bulut Teknolojisi giderek artan bir yaygınlıkla tüm dünyada kullanılmaya başlanmıştır. Bulut Bilişim, bilişim aygıtları arasında ortak veri paylaşımı ve kullanılan bu verinin bilgiye dönüştürülmesini sağlayan hizmete verilen isimdir (Mell ve Grance, 2011). Bulut Bilişim bir ürün değil bir hizmetin ortak adıdır. Kullanıcıların bulundukları konumlarında herhangi bir işlem, yazılım, veri erişimi veya servis altyapısına sahip olmadan tüm bu hizmetlere bir bilişim servisi aracılığı ile

kolayca erişip kullanabilmelerini sağlayan bilişim servisi­dir. Bulut bilişim sayesinde, artık kendi verilerinizi nerede saklayacağınızı düşünmezsiniz, çünkü donanım ve yazılımın yönetimi tamamen bu hizmete aittir.

Günümüzde üretim sistemine dahil edilen farklı teknolojiler nedeni ile yüksek miktarda veri toplanmaktadır. Dolayısı ile bu verilerin depolanması amacı ile bulut bilişim sistemlerinden yararlanılmaktadır. İşletmeler bulut sistemlerini kullanarak gerektiğinde istedikleri dosyalara çok kısa süre içerisinde hızlıca ulaşabilmektedirler. Bu da iş süreçlerindeki gereksiz zaman kayıplarını ortadan kaldırmalarını sağlayarak işletme performansının artırılmasına yardımcı olmaktadır (Saatçioğlu, 2018).



Şekil 3.6. Bulut bilişim faktörleri (Banger, 2016)

Şekil 3.6.'de gösterilen bulut bilişim faktörleri sayesinde masaüstü bilgisayar, tablet veya akıllı mobil cihazlar üzerinden herhangi bir yazılım ve depolama birimine ihtiyaç duymaksızın internet üzerinden başka sunuculara bağlanarak hizmet almaya imkân tanınmaktadır.

Bulut bilişimin işletmelere sağladığı faydalara bakıldığında; üretim sistemlerinden elde ettiğimiz verileri depolamak için fiziki aygıtlara olan ihtiyaç ortadan kalkmıştır, daha az maliyet ile daha fazla veri depolanabilmektedir, veriler sürekli güncel tutularak istenilen zamanda hızlı bir şekilde erişme açık hale getirilmiştir. Bu avantajların yanı sıra bazı dezavantajlarda bulunmaktadır. İnternet bazlı olarak çalışan bulut sistemlerin istenilen şekilde çalışabilmesi için yüksek hızda internete ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısı ile internet ağında meydana gelebilecek herhangi bir arıza kalıcı veri kayıplarına neden olabilmektedir. Ayrıca internet aracılığı ile depolanan veri güvenlik açısından da tehdit altına olabilir. (Banger,2016).

3.4.7. Eklemeli İmalat / Üç Boyutlu Yazıcılar

Eklemeli üretime Üç boyutlu (3D) baskı da denmektedir. Özellikle nesnelerin interneti, otonom robotlar ve 3 boyutlu yazıcılar sayesinde üretim metotları radikal bir değişime uğramaktadır (Genç, 2018). Üç boyutlu yazıcılar sayesinde üretilmek istenen ürünün bir kopyası elde edilebilmektedir. FDM (Fused Deposition Modeling) olarak adlandırılan teknoloji kullanılan malzemeyi ip gibi ince bir biçimde akıtarak üretimi gerçekleştirirken DLP (Digital Light Processin) ya da SLA (Stereolithography) teknolojileri ışığa karşı hassa olup özel foto polimer reçineyi projektör ya da lazer ışığı sayesinde katılaştırıp ekleme yoluyla üretimi gerçekleştirmektedir. Bir diğer teknoloji olan SLS (Selective Lazer Sintering) ise toz halinde bulunan parçacıkların yapıştırılması yolu ile eklemeli imalat yapmaktadır. 3D yani eklemeli imalat yolu ile elde edilen ürünler hem bilgisayar ortamında tasarlandığı için ekstra bir kalıba ihtiyaç duymadan üretilirler hem farklı materyallerden üretildikleri için talaş ve benzeri kaynakların kayıpları da önlenmiş olur (Bayraktar,2017). Kişisel üretimin gelişmesine olanak sağlayan bu üç boyutlu yazıcılar sosyo-ekonomik değişimleri de beraberinde getirmektedir.Üç boyutlu yazıcılar ile artık tüketici üretici konumuna geçecek olup, ucuz iş gücü ortadan kalkacak ve işçi maliyetleri düşecektir. Aynı zamanda ürünlerin eskiye oranla daha kısa sürede piyasaya sürülmesi üretim maliyetlerini ucuzlatacaktır (Özsoylu,2019). Üç boyutlu yazıcı teknolojisi insanların ellerinden mevcut işini almayacak, aksine iş kapasitesine arttırıp işin niteliğinin yükselmesine sebep olacaktır. Nitelsiz olarak gösterilebilecek iş kollarının bu benzeri teknolojilerle nitelikli iş kollarına dönüşümü sağlanacak olup, iş imkanlarında artışların görülmesi hedeflenecektir (Özdoğan,2017).

3.4.8. Siber Güvenlik

Endüstri 4.0, dijital, biyolojik ve fiziksel teknolojilerin birbiri ile yaklaşması ile yeni küresel tehditlere zemin hazırlamaktadır. Günümüzde de birçok bilgi hala farklı yerlerde depolanmakta ve istenilen zaman ulaşılarak değerlendirilmektedir. Dolayısı ile üretim sistemleri için bu kadar önem arz eden bir yapının korunması da çok önemlidir. İşletme içerisinde var olan yüksek seviyedeki bilginin korunması için de siber güvenlik kavramı büyük önem arz etmekte ve tüm teknolojilerin doğru bir şekilde ilerleyebilmesi için uygulanması gereken ilk adımdır. Endüstri 4.0; akıllı fabrikalar, yapay zekâ, nesnelerin interneti ve otonom robotlar gibi sayısız bileşenden oluşmaktadır. Bu teknolojiler her ne kadar insan hayatını kolaylaştırırsa da doğru bir kullanılmaları için gerekli olan temel yapı internettir. İnternet ile bütünleşik olan her sistemde olduğu gibi burada da siber güvenlik sorununu ortaya

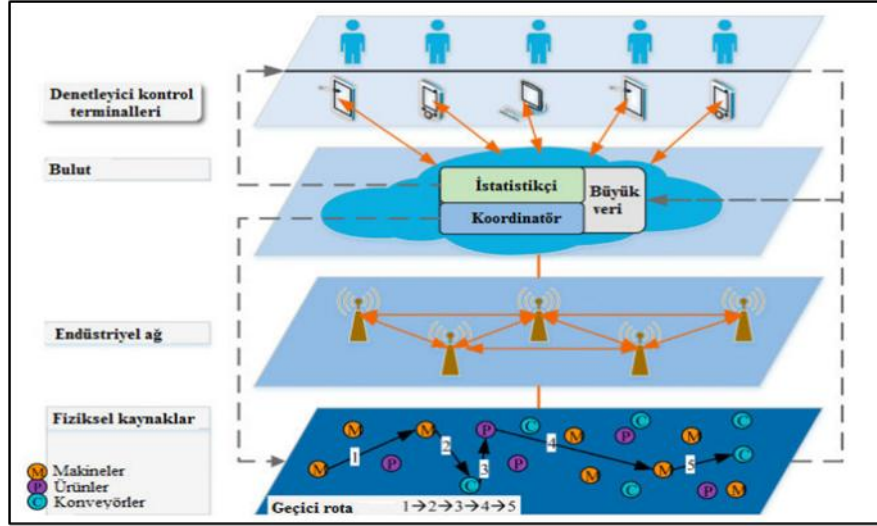
çıkılmaktadır. Bu nedenle işletmelerde dijital sistemlerin kullanımının artması ve otomasyonun genişletilmesi ile siber tehditler daha fazla önem kazanmıştır. Bu sorunlar çözülmediği sürece de endüstri 4.0'ın gerçek potansiyeli elde edilemeyecektir. Dolayısı ile ne konuda ilerlemek isteyen işletmeler siber güvenliğe gereken önemi vermeli ve çalışanlarını da bu konuda bilinçlendirmek amacı ile farklı eğitimlere tabi tutmalılardır.

3.4.9. Arttırılmış Gerçeklik

Arttırılmış gerçeklik son zamanlarda önem kazanan kavramların başında gelmektedir. Gerçek dünya ortamına, bilgisayar tarafından üretilen verilerin entegrasyonu Arttırılmış gerçeklik olarak tanımlanmaktadır. Günümüzde işletmeler endüstri 4.0'ın beraberinde getirdiği teknolojileri uygulamaya devam ettikçe arttırılmış gerçekliğin kullanımına artmaktadır. Bu teknoloji sayesinde üretim sistemlerin gerçekleşen faaliyetler ile ilgili interaktif verileri ulaşılabilmekte ve bu bilgiler paylaşılabilmektedir. Bu sayede dijitalleşme sürecinin daha verimli hale getirilmesi amaçlanmaktadır (Siemens, 2016). Günümüzde arttırılmış gerçeklik teknolojisi birçok alanda kullanılmaktadır. Doğal afet ve nükleer kazalardan korunmaya, sanat, reklam ve pazarlamadan eğlence, sağlık ve müzecilik alanlarından askeri ve güvenlik konularına kadar birçok alanda AR uygulamalarına rastlanılabilir. Lojistik alanında ise coğrafi etiketleme ve GPS örnek verilebilir (İçten ve Bal, 2017).

3.4.10. Akıllı Fabrikalar

Akıllı fabrika, tüm süreçlerin otomasyon kullanılarak yapıldığı ve sürecin kendi kendine iyileşmesinin mümkün olduğu; makine ve ekipman temelli bir işletme ortamı olarak tanımlanmaktadır. Ürün, bilgi ve iletişim teknolojilerinin kombine edilerek üretim ve tedarik süreçlerine entegre edilmesini içeren akıllı fabrikalar; günümüz fabrikalarına kıyasla kişiselleştirilmiş ürünlerin depolama ve dağıtım döngüsünü azaltarak üretimin müşteri talepleri ile eş zamanlı gerçekleştirilmesine yardımcı olmaktadır (Wan ve Zhou, 2015). Akıllı fabrikada, ürünler üretim süreçleri boyunca kendi yollarını bağımsız olarak bulur ve her zaman kolaylıkla tanımlanabilir ve bulunabilir niteliktedirler. Akıllı fabrikalar üretim süreçlerinin artan karmaşıklığını, orada çalışan insanlar için yönetilebilir hale getirerek ve üretimin aynı anda çekici, kentsel çevrede sürdürülebilir ve karlı olmasını sağlamaktadır.



Şekil 3.7. Akıllı fabrikaların çerçevesi (Wang, Wan, Li ve Zhang, 2016)

Akıllı fabrika, akıllı üretim için ağ üretim sistemlerinin dikey entegrasyonunu ifade eden endüstri 4.0'ın önemli bir özelliğidir. Akıllı fabrika uygulanması için, akıllı fabrikalar akıllı nesneleri büyük veri analizi ile birleştirmelidir. Akıllı nesneler, yüksek esnekliği sağlamak için dinamik olarak yeniden yapılandırılabilirken büyük veri analizi, yüksek verim elde etmek için küresel geribildirim ve koordinasyon sağlayabilir. Şekil 3.7'de gösterildiği gibi akıllı fabrika, çift kapalı çevrimli bir sistem olarak görülebilir. Bir döngü fiziksel kaynaklardan ve buluttan oluşurken, diğer döngüler denetleyici kontrol terminallerinden ve buluttan oluşmaktadır (Wang, Wan, Li ve Zhang, 2016). Akıllı fabrikalarda otonom robotların daha fazla kullanılmaya başlanması ile özellikle tehlikeli işlerde insan gücü kullanımı azaltılmıştır. Bu sayede hem iş güvenliği sağlanmış hem de üretimin daha hızlı gerçekleştirilmesinin önü açılmıştır. Bununla birlikte akıllı fabrikalarda üretimin durmaksızın devam etmesi ile üretim miktarı artarken kaynak tasarrufu yapılması da sağlanmıştır. Kaynak ve enerji tasarrufunun sağlanmasındaki temel neden ise üretim sürecinde ortamda insan olmadığı için ışık, ısı ve temel insan ihtiyaçlarının minimum seviyede olmasıdır. Akıllı fabrikaların temel yapısı temiz ve sessiz üretim olduğundan dolayı günümüzdeki karmaşık üretim yapılarının yerini daha yalın süreçler almaktadır. Bu da üretimin daha sürdürülebilir ve karlı hale gelmesini sağlamaktadır (Yıldız, 2018).

4. ENDÜSTRİ 4.0 OLGUNLUK MODELLERİ

Günümüzde teknolojik ve toplumsal gelişmelerin yol açtığı ekonomik zorluklar, işletmelere tüm değer zincirini yönetme yeteneği kazandırmak için onları çevikliklerini ve tepki hızlarını geliştirmeye zorlamaktadır. Bu nedenle işletmeler, iş süreçleri ve operasyonları için iş birliği ve hızlı uyum imkânı sağlayan sanal ve fiziksel teknolojilerin yardımına ihtiyaç duymaktadırlar. (Ganzarain ve Errasti, 2016). Endüstri 4.0 ile önem kazanan dijitalleşme süreci tüm bu teknolojilerin üretim süreçlerine entegre edilmesinin hızlanmasına yol açmıştır. Bu süreçte her işletme rekabet gücünü kaybetmemek için çeşitli stratejiler uygulamakta ve farklı zorluklar ile karşılaşmaktadır. Sürekli gelişen teknolojiler işletmelerin endüstri 4.0 sürecini tam olarak tamamlayabilmesine izin vermemekte ve yapılan planların düzenli olarak güncellenmesine yol açmaktadır.

İşletmelerin karşı karşıya kaldığı tüm bu zorlukların daha kolay tanımlanabilmesi ve çözüm yollarının belirlenebilmesi için ise günümüzde olgunluk modelleri sıklıkla kullanılmaktadır. Olgunluk modelleri, süreçleri veya organizasyonu farklı açılardan değerlendirmek için değerli bir teknik olarak tanımlanmaktadır (Proença ve Borbinha, 2016). Olgunluk modellemesi tekniği kuruluşlara, denetleme ve kalite ölçümü, belirlenen hedefler karşısında ilerlemenin denetlenmesi, güçlüklerin, zayıflıkların ve fırsatların anlaşılması konusunda yol göstericidir (TÜSİAD,2010). Duffy (2001)'in yaptığı çalışmada olgunluk modellerinin kuruluşların ilerlemek için ne zaman ve neden harekete geçmeleri gerektiğine karar vermelerine yardımcı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu tanım doğrultusunda bakıldığında, endüstri 4.0 ve dijitalleşme konusunda olgunluk seviyelerini ölçmek amacı ile kullanılan farklı olgunluk modellerinin tümü işletmelere bulundukları konum hakkında önemli bilgiler sunmakta ve üst olgunluk seviyelerinde yer almak isteyen işletmelere hangi yönde ilerlemeleri gerektiği konusunda yol göstermektedir. Mevcut durumun belirlenerek bir skorun ortaya konulması aynı zamanda güçlü ve zayıf yönlerin tanımlanmasına da yardımcı olmaktadır.

Olgunluk modelleri oluşturulurken farklı ana ve alt kriterler tanımlanmaktadır. Bu kriter tanımlanırken modelin uygulanacağı sektörün baz alınması da modelin verimliliği için temel parametrelerden biridir. Belirlenen kriterler çerçevesinde farklı formülasyonlar tercih edilerek değerlendirilen modellerin sonucunda değerlendirilen işletmenin mevcut olgunluk veya hazırlık durumu görülebilmektedir. Elde edilen bu değer her bir işletmenin gelecekteki uygulamaları için bir alt yapı oluşturmaktadır. Zayıf olunan alanların belirlenmesi ve hedef

seviye ile mevcut seviye arasındaki farkın görülmesi gelecek için işletmelere bir yol haritası hazırlama imkânı sunmaktadır. Aynı zamanda olgunluk modelleri yardımı ile işletmelerin birbiri ile kıyaslanması günümüzdeki rekabet koşulları göz önüne alındığında stratejik planlamalar için büyük bir avantaj sağlamaktadır. Tüm endüstrilere genel olarak bakıldığında Endüstri 4.0'ın uygulanması aşamasında farklı sorunlar ile karşı karşıya kalınmaktadır. Endüstri 4.0'ın stratejik rehberlik eksikliği ve karmaşık olgu sorunu, uygulanması ile oluşacak fayda ve maliyetlerin belirsizliği ve şirketin endüstri 4.0 kapasitesinin belirlenememesi gibi olgular bu problemlere örnek verilebilmektedir (Schumacher, Erol ve Sihn, 2016). Bu üç olgunun şirketler üzerinde oluşturduğu baskıyı azaltmak, yeni nesil teknolojilerin üretim ve yönetim sistemlerine uyarlanmasını kolaylaştırmak ve yöneticiler ile çalışanların rahat bir gelişim/değişim süreci yaşamaları adına olgunluk modellerinin kullanılması büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle literatürde birçok olgunluk modeli bulunmaktadır. Bu modeller bir sonraki bölümde açıklanmaktadır.

4.1. IMPULS-Endüstri 4.0 Hazırlık Modeli

Lichtblau, Stich, Blum, Bertenrath, Schmitt, Millack, Bleider, Schröter ve Schmitz (2015) tarafından 2015 yılında yapılmış olan IMPULS-Endüstri 4.0 Hazırlık Modeli çalışması işletmelerin endüstri 4.0 sürecinde istedikleri konuma ulaşmaları için yapılacakları belirlemelerine yardımcı olmayı amaçlamışlardır. Strateji ve organizasyon, çalışanlar, veri odaklı hizmetler, akıllı ürünler, akıllı fabrika ve akıllı operasyon olmak üzere altı boyut üzerine kurulan olgunluk modeli sekiz kriter içermektedir.

İşletmelerin endüstri 4.0 konusundaki bilgileri, hazırlıklarını ve mevcut uygulamaları üretime entegre etmekteki başarılarını ölçmeyi amaçlayan model, firmaların kendi kendilerini değerlendirmelerini temel almaktadır. Model uygulanırken bir anket çalışması yapılmakta ve değerlendiricilerden 24 soruyu işletmelerini temel alarak değerlendirmeleri istenmektedir. Değerlendirme için Likert ölçeği kullanılmakta olup sorulan sorular yöneticiler ile yapılan çalıştaylar sonucunda belirlenmiştir. Modelin uygulanması sonucunda işletmelerin hangi seviyeye dâhil olduklarını görebilmek adına 0 ile 5 arasında 6 farklı seviye tanımlanmıştır.

4.2. Endüstri 4.0 Öz Değerlendirme Modeli

Pricewaterhouse Coopers isimli danışmanlık firmasının 2015 yılında yaptığı ve bir anket içeren çalışma neticesinde 2016 yılında ortaya konmuştur. Orijinal ismi “Industry 4.0/Digital Operations Self-Assessment” şeklindedir. Yapılan çalışmada işletmeler kendilerini

anket yardımı ile değerlendirmektedirler. Farklı ülkelerde çok sayıda katılımcı ile gerçekleştirilen çalışmanın sonuçları analiz edilmiştir. Model 6 ana boyut üzerine kurulmuştur.

4.3. Endüstri 4.0 Hazırlık ve Olgunluk Modeli

Schumacher vd. (2016)'nın işletmelerin endüstri 4.0'a olan hazırlık seviyelerini belirlemek amacı ile oluşturdukları model daha çok soyut kavramlara dayanmaktadır. Modelde olgunluk seviyesinin belirlenmesi amacı ile dokuz boyut tanımlanmıştır. Liderlik, strateji, ürünler, müşteriler, kültür, operasyon, teknoloji, yönetim ve insan olmak üzere belirlenen bu dokuz boyut altında da 63 farklı kriter sıralanmıştır. Modelin değerlendirilmesi anket yardımı ile gerçekleştirilmiş ve likert ölçeği kullanılmıştır. Bu doğrultuda yapılan değerlendirme sonucunda işletmenin olgunluk seviyesi belirlenmiştir.

4.4. Bağlı Kuramsal Olgunluk Modeli

2014 yılında Rockwell Otomasyon şirketinin geliştirdiği model, Endüstri 4.0 'a geçiş ilgili firmanın süreçleri aşağıdaki 5 basamak altında değerlendirmiştir. Modelin ilk aşamasında organizasyonun bilgi teknolojileri bilgi altyapısı, veri besleyen ve alan cihazlar, tüm bu bilgileri taşıyan ağlar ve güvenlik politikaları olmak üzere 4 boyutta değerlendirilir. Bu aşamadan sonra yeni bir bilgi teknolojileri organizasyonu inşa edilir. Geçmiş dönemde kullanılan yapılar değerlendirilerek uzun vadeli aksiyonlara başlanır. 3. aşamada toplanan verilerin nasıl işleneceği üzerinde düşünülür. Yeni iş akışlarının ve sorumlulukların belirlenmesine odaklanılır. 4. aşamada önemli veriler odak noktasına konularak sürekli gelişme adına adımlar atılır. Önceki aşamada oluşan çok sayıda veriden kaynaklı kafa karışıklığı burada odak veriler sayesinde önlenmiş olmaktadır. Son aşamadaki amaç ise veri paylaşımı yardımı ile işletme ve çevre arasında iş birliği sağlamaktır.

4.5. SIMMI Olgunluk Modeli

Leyh, Bley, Schäffer ve Forstenhäusler (2016)'nın ortaya koydukları modelde 5 farklı olgunluk seviyesi bulunmaktadır. Bu seviyeler; basit dijitalleşme, departmanlar arası dijitalleşme, dikey & yatay dijitalleşme, tamamen dijitalleşme ve optimizasyon olarak belirlenmiştir. Modelde bulunan dört ana boyut bu 5 seviye göz önünde bulundurularak değerlendirilmeye alınmıştır.

4.6. TÜBİTAK Dijital Olgunluk Modeli

Dijital olgunluk modeli TUBİTAK- BİLGEM Yazılım Teknolojileri Araştırma Enstitüsü (YTE) tarafından 2017 yılında getirilmiştir. Bu modelin amacı kamu kurumlarının dijital dönüşüm yetkinliğinin belirlenmesidir. Daha önce kullanılan olgunluk modelleri incelenmiş ve bu modeller göz önüne alınarak dijital olgunluk modeli ortaya konulmuştur. Modelin değerlendirilmesi 5 seviyeden oluşan likert ölçeği ile gerçekleştirilmiştir.

4.7. Akıllı İşletmeler İçin Endüstri 4.0 Hazırlık ve Olgunluk Modeli

Çınar vd.(2021)'in çalışmalarında ortaya koydukları model diğer olgunluk modellerinin aksine işletme içerisinde yer alan dört farklı alanın olgunluğunu ayrı ayrı ölçmeye odaklanmıştır. Fabrika 4.0, Lojistik 4.0, Yönetim 4.0 ve Operatör 4.0 olmak üzere 4 farklı boyut üzerine kurulan model her bir boyut için farklı değerlendirme kriterleri içermektedir. Olgunluk modelini oluşturan kriter arasında büyük veri analizi, makine öğrenmesi, akıllı ürün, siber güvenlik, bulut bilişim, liderlik ve organizasyon, inovasyon stratejileri ve dijital ikiz gibi günümüzde işletmelerin uyguladığında fark yaratabileceği teknolojiler yer almaktadır. Modelin geneline bakıldığında 4 boyut, 5 seviye, 60 ikincil boyut ve 246 alt kriterden oluşmaktadır. Çok sayıda değerlendiricinin katıldığı çalışma otomobil parçası üretim tesisinde gerçekleştirilmiştir. İşletmenin olgunluk seviyesinin saptanması için işletmenin iki yıl içerisindeki hedef puanı ile mevcut endüstri 4.0 puanı ve her bir kriterin işletme için önem seviyesinin belirlenmesi gerekmektedir. İşletmede uzun yıllardır çalışan tecrübeli kişiler tarafından belirlenen bu değerler aşağıda yer alan üç farklı formülasyonun kullanılması ile analiz edilmektedir. Çalışma sonunda dört boyutun her bir kriterine ait olgunluk derecesi, dört boyutun olgunluk derecesi ve işletmenin ortalama olgunluk derecesi radar grafikleri kullanılarak sunulmuştur.

5. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmanın bu kısmında uygulamanın gerçekleştirildiği işletmeye ait genel bir bilgilendirme yapılarak endüstri 4.0 olgunluk modelinin oluşturulma aşamalarına değinilmiştir. İşletmenin dijital olgunluk seviyesini ölçmek için geliştirilecek modelde kullanılacak kriterlerin seçimi ve değerlendirme aşamaları hakkında da bu kısımda bahsedilmiştir.

5.1. İşletme Hakkında Genel Bilgi

Çalışma beyaz eşya sektöründe faaliyet gösteren bir işletmede yapılmıştır. Buzdolabı, çamaşır makinası, bulaşık makinası ve fırın olmak üzere dört farklı alanda üretim yapan işletme üretilen ürünlerin büyük bir kısmını yurt dışına ihraç etmektedir. Dördüncü sanayi devrimi (Endüstri 4.0) ile hayatımıza dahil olan birçok yeni nesil teknoloji işletme içerisindeki proseslerde aktif olarak kullanılmaktadır. Üretilen ürünlerin ilk tedarikçiden alınıp son kullanıcıya kadar ulaştırılmasına kadar geçen süre içerisinde dahil oldukları tüm işlemlerde dijitalleşme çalışmaları en üst düzeyde takip edilmektedir. Endüstri 4.0'ın bize sağladığı en büyük kazançlardan biri olan sürdürülebilirlik kavramı da ayrıca işletmenin en çok değer verdiği noktaların başında gelmektedir. Her bir üretim prosesinde harcanan enerji yeni nesil teknolojiler ile anlık olarak takip edilmekte ve doğaya en az zarar verecek şekilde üretim süreçleri yenilenmektedir. Dolayısı ile hem endüstri 4.0 teknolojilerinin yüksek seviyede kullanımı ile işletmedeki dijitalleşme çalışmalarının stratejik bir öneme sahip olması hem de kullanılan bu teknolojiler ile sürdürülebilirlik çalışmalarına değer katmak için işletmenin dijital olgunluk seviyesi farklı firmalar tarafından düzenli aralıklar ile ölçülerek dijital dönüşüm için bir yol haritası oluşturulmaktadır.

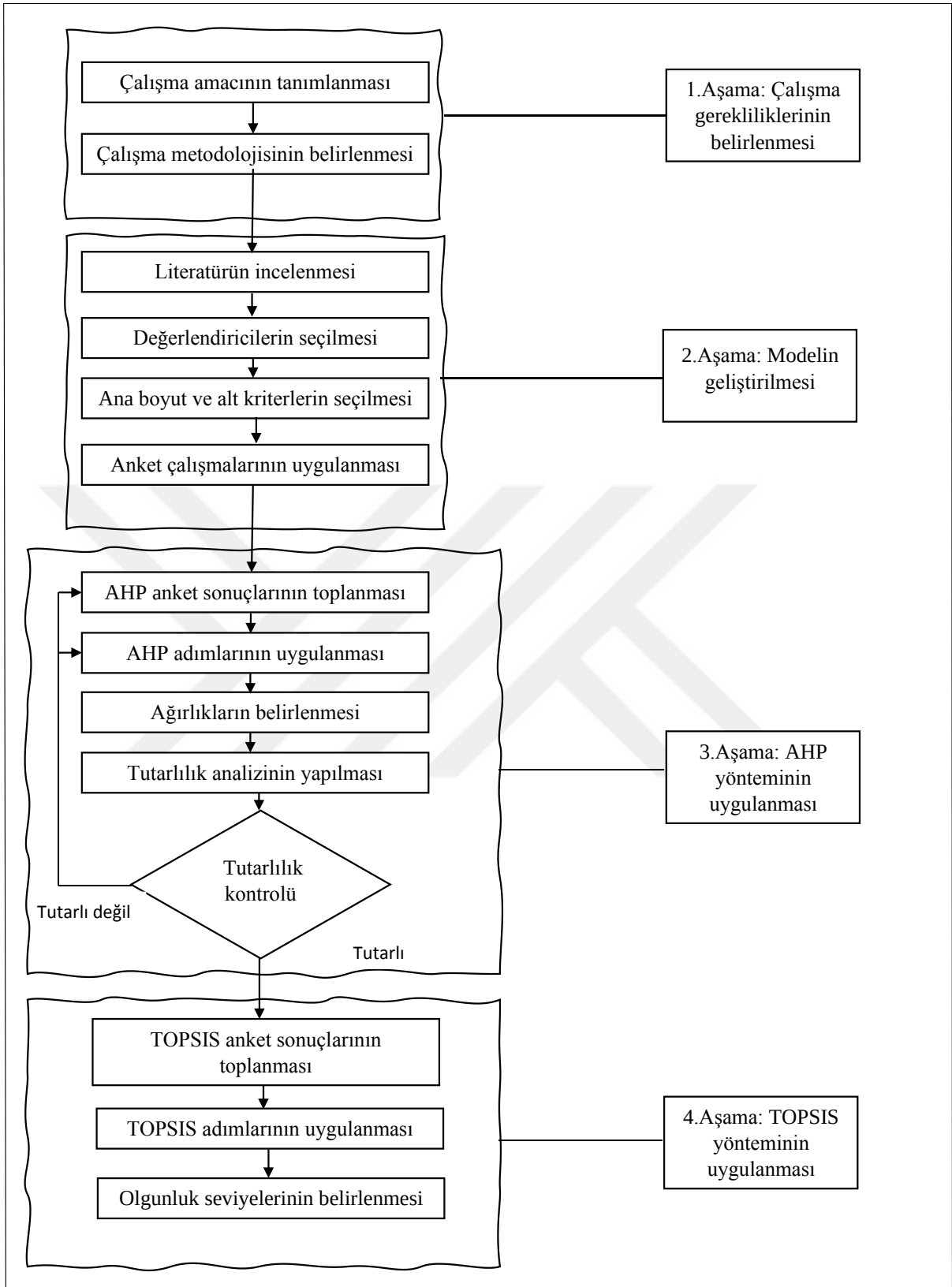
5.2. Çalışmanın Gerçekleştirildiği Alan

Çalışma işletme içerisinde yer alan çamaşır makinası fabrikasında gerçekleştirilmiştir. Bu fabrikanın seçilmiş olmasının nedeni ise günümüzde büyük bir öneme sahip olan “baştan sona izlenebilirlik” kavramının ilk olarak bu fabrika içerisinde uygulamaya alınmış olmasıdır. Birçok teknolojinin birleşimi ile ortaya çıkan izlenebilirlik kavramı aynı zamanda bu konuda uzman insan potansiyelini de gerektirmektedir. Dolayısı ile bu alanın seçilmesi ile modelde yer alan fabrika 4.0, yönetim 4.0, lojistik 4.0 ve operatör 4.0 ana boyutları için geniş bir değerlendirme imkânı sunulmaktadır.

5.3. Olgunluk Modelinin Oluşturulması

Literatürde yer çalışmalarda endüstri 4.0 olgunluk modeli oluşturulması amacı ile çok sayıda farklı ana ve alt farklı kriter tanımlanmış ve bu kriterler çerçevesinde oluşturulan modeller bilimsel yöntemler aracılığıyla analiz edilmiştir. Bu çalışmada kullanılacak olan endüstri 4.0 dijital olgunluk modelinin oluşturulması aşamasında da öncelikle geniş bir literatür araştırması yapılmıştır. Literatür araştırması sonucunda elde edilen tüm olgunluk modelleri analiz edilerek gruplandırılmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda uygulamanın gerçekleştirileceği şletmenin dinamiği ve yönetim faaliyetleri göz önünde bulundurularak ana ve alt kriterlerin seçim şlemi şletmede görev yapan yönetici ve uzman pozisyonundaki 24 kişi tarafından gerçekleştirilmiş olup uzmanlar ile ilgili ayrıntılı bilgi Ek-1’de verilmiştir.

Endüstri 4.0 dijital olgunluk modelinde kullanılacak olan ana ve alt kriterlerin belirlenmesinin ardından şletmenin olgunluk seviyesinin tespit edilmesi için kullanılacak formülasyonun seçim şlemi gerçekleştirilmiştir. Bu adımda iki aşamalı bir değerlendirme yöntemi kullanılması kararlaştırılmış ve AHP ile TOPSIS yöntemleri tercih edilmiştir. Tüm bu adımların takip edilmesi sonucunda modelin genel yapısı ortaya çıkarılmıştır. Modelin geliştirilmesi sürecinde takip edilen tüm adımlar şekil 5.1’de verilmiş olup ilerleyen bölümlerde detaylı olarak açıklanmıştır.



Şekil 5.1. Teknolojik olgunluk modeli geliştirme aşamaları

5.4. Olgunluk Modelinde Yer Alacak Kriterlerin Belirlenmesi

Modelde kullanılacak olan ana ve alt kriterlerin belirlenmesi amacı ile ilk olarak detaylı bir literatür araştırması yapılmıştır. Bu araştırma sonucunda farklı sektörlerde farklı kriterler ve değerlendirme yöntemleri kullanılarak yapılan çok sayıda çalışma incelenmiştir. Bu doğrultuda Lichtblau vd. (2015) ile Schumacher vd. (2016)'nın oluşturdukları olgunluk modelleri literatürde en çok kullanılan iki model olarak belirlenmiştir. İki modelin içerdikleri kriterler benzerlik göstermekte olup daha çok teorik kavramlar üzerine odaklanılmıştır. Aynı zamanda literatürde sıklıkla tercih edilen bu iki model genellikle teorik kavramlar üzerine kurulu olmalarının yanı sıra çok sayıda boyut ve alt kriter içermektedir. Model yapılarında bulunan çok sayıda boyut ayrıntılı bir değerlendirme ortamı oluşturmakla birlikte anlam karmaşıklığı yaratabilmekte ve değerlendirmeler tarafından uygulama zorluğu teşkil edebilmektedir. Bu sebeplerden dolayı iki model yapısı da tam olarak çalışmaya dahil edilmemiştir. Ancak modellerin içerisinde bulunan alt kriterler değerlendirilerek işletme dinamiğine uygun olanlar çalışmaya dahil edilmiştir.

İlk olarak IMPULS modeline bakıldığında modelde yer alan kriterler çok sayıda çalışmada referans olarak alınmıştır (Bibby ve Dehe, 2018; Kiraz vd., 2019; Rafael vd., 2020). Model temel olarak 6 kriter (strateji ve organizasyon, akıllı fabrika, akıllı işlemler, akıllı ürünler, veriye dayalı hizmetler, çalışanlar) içermekte olup bu kriterlerin önemi ve yapılan çalışmada tercih edilip edilmeme nedenleri aşağıda açıklanmıştır.

Strateji ve organizasyon kriteri dijital dönüşüm faaliyetlerinin belirli bir plan doğrultusunda gerçekleştirilmesi gerektiğini ifade etmektedir. Aynı zamanda bu faaliyetlerin gerçekleştirilebilmesi için bir yatırım stratejisine de ihtiyaç duyulmaktadır. İşletmelerin oluşturması gereken bu stratejiler organizasyon tarafından da kabul edilebilir ve uygulanabilir olmalıdır. Dolayısı ile bu kriter dijital dönüşüm süreçlerinin başlangıçtan itibaren programlı bir şekilde yürütülebilmesi için çok önemlidir. Oluşturulan modelde ise endüstri 4.0 stratejisi ve organizasyon ve liderlik kriterleri alt kriter olarak ele alınmıştır.

Akıllı fabrika: Akıllı fabrikalar endüstri 4.0'ın beraberinde getirdiği teknolojilerin aktif olarak uygulandığı fabrikaları ifade etmektedir. Dolayısı ile akıllı fabrikalar endüstri 4.0 olgunluk seviyesini belirlemek için en önemli kriter olmaktadır. Yapılan çalışmada ise akıllı fabrikaların sahip olduğu teknolojiler alt kriter olarak ele alınmıştır.

Üretim yapılarından elde edilen veriler ve bu verilerin depolanarak anlamlı sonuçlara dönüştürülmesi akıllı işlemler olarak adlandırılmaktadır. Verilerin işlenmesi dijital dönüşüm süreçleri için önemli olmakla birlikte geliştirilen olgunluk modelinde büyük veri alt kriter olarak yer almıştır.

Akıllı ürünler, üzerlerine yerleştirilen cihazlar sayesinde çevresinde veri toplanabilen ve takibi yapılabilen ürünlerdir. Akıllı ürünler IMPULS modeline bir ana boyut olarak bulunurken yapılan çalışmada bir alt kriter olarak tanımlanmıştır.

Veriye dayalı hizmetler, işletmede üretilen ürünlerin satış sonrası değerlerinin takip edilmesi anlamına gelmektedir. Çalışmada oluşturulan modelde bu kriter kullanılmamış olup satış sonrası verilerinin değerlendirilmesi farklı alt kriterler yardımı ile gerçekleştirilmiştir.

Son olarak çalışanlar kriterine baktığımızda , dijital dönüşümde faaliyetlerinde en büyük sorumluluğa sahip olan çalışanlar bu süreçte sürekli olarak değerlendirilmeli ve gelişimleri için programlar düzenlenmelidir. Literatürdeki olgunluk modellerinin çoğunluğunda çalışanlar ana veya alt kriter olarak yer almaktadır. Yapılan çalışmada da çalışanlar bir ana boyut olarak ele alınmıştır.

Literatürde en çok kullanılan ve analiz edilen bir diğer endüstri 4.0 olgunluk modeli ise Schumacher vd. (2016)'nın endüstri 4.0 hazırlık seviyesini ölçmek için ortaya koydukları olgunluk modelidir. Oluşturulan model çeşitli çalışmalarda incelenmiş ve referans olarak kabul edilmiştir (Gökalp vd., 2021; Akdil vd., 2018; Santos ve Martinho, 2019). Bu modelde ise liderlik, strateji, ürünler, müşteriler, kültür, operasyon, teknoloji, yönetim ve insan olmak üzere 9 kriter kullanılmıştır. Burada kullanılan kriterlerde yine IMPULS modeli ile benzerlik göstermekte olup stratejiden başlayarak insan faktörüne yapılan yatırıma kadar olan süreci değerlendirmek amacı ile tanımlanmıştır. Bu iki modelin ortak özelliği endüstri 4.0 dönüşüm sürecinde yer alan tüm teknolojilerin, yönetim ve üretim süreçlerinin toplu olarak tek bir başlık halinde değerlendirilmesidir. Dolayısı ile her bir teknolojinin işletmedeki durumu hakkında yorum yapılamamaktadır. Çalışmada oluşturulan modelde literatürde sıklıkla kullanılan bu iki modelin tercih edilmeme sebebi de bu olmuştur.

Olgunluk modelini oluştururken kriterlerin seçimi ve değerlendirilmesi fabrikada farklı birimlerde görev yapan 24 mühendistarafından gerçekleştirilmiştir. Değerlendirici grubu sekiz endüstri mühendisi, iki kontrol ve otomasyon mühendisi, sekiz elektrik ve elektronik mühendisi ve altı makine mühendisinden oluşmakta olup iki ile sekiz yıl arasında tecrübeye sahiptir. Uygulamanın gerçekleştirileceği beyaz eşya fabrikasının üretim ve

yönetim süreçlerinde çok sayıda teknoloji kullanılmakta ve bu teknolojilerin birbiri ile ortaklaşa çalışması üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Dolayısı ile literatürde en çok tercih edilen kriterlerin aksine oluşturulacak modelin her bir teknoloji ve süreci ayrı başlıklar halinde ele alması gerektiğine karar verilmiştir. Bu sayede endüstri 4.0'ın hangi bileşeninin işletmede hangi seviyede uygulandığı ve gelecekteki hedeflere ulaşabilmek için hangi alana daha fazla yatırım yapılması gerektiğine dair çıkarımlar yapmak mümkün olmaktadır. Modeldeki kriterlerin seçimi genel olarak bu amaçlar dikkate alınarak yapılmıştır. Tasarlanacak modelde kullanılacak kriterler Çınar vd. (2021)'nin çalışmalarında ortaya koydukları endüstri 4.0 olgunluk modeli baz alınarak seçilmiştir.

Bu modelin seçilmesinin en önemli nedenlerinden biri model yapısının dört ana kriter üzerine kurulmasıdır. Fabrika 4.0, Lojistik 4.0, Yönetim 4.0 ve Operatör 4.0 olarak belirlenen model çatısı farklı teknolojilerin farklı birimler baz alınarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Dördüncü sanayi devrimi ile birlikte hayatımızagiren yeni nesil teknolojiler özellikle büyük ölçekli işletmelerde çeşitle üretim fonksiyonlarına adapte edilmekte ve farklı amaçlar doğrultusunda kullanılmaktadır. Bu doğrultudan bakıldığında değerlendirmenin bölümler özelinde gerçekleştirilmesi modelin işletmelere yol gösterici olması adına dikkat edilmesi gereken adımlardan biridir.

Yapılan çalışmada oluşturulacak modelin büyük ölçekli ve kurumsal bir işletmede uygulanacak olması da göz önüne alındığında; endüstri 4.0 teknolojilerinin ve kavramlarının belirtilen dört farklı çatı altında değerlendirilmesi modelin doğruluğunu etkileyen önemli faktörlerden biridir. Model için seçilen dört boyut ve bu boyutlar altında değerlendirilen kriterlerin seçim aşaması bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

5.4.1. Fabrika 4.0

Fabrika 4.0 boyutu seçilen fabrikanın üretim sistemleri içerisinde yer alan endüstri 4.0 teknolojilerinin değerlendirilmesi amacı ile oluşturulmuştur. Bu boyutun altında yer alan on beş kriter üretim mühendisliği departmanı çatısı altında çalışan yedi kişinin görüşleri alınarak belirlenmiştir. Değerlendirme aşamasında yer alan kişiler endüstri mühendisi, kontrol ve otomasyon mühendisi ve elektrik ve elektronik mühendisi olarak görev yapmakta olup üç ile beş yıl arasında tecrübeye sahiptir. Bu kişilerin seçilmesinin sebebi üretim içerisinde yer alan dijital dönüşüm projelerinde aktif olarak yer almalarıdır. Dolayısı ile fabrika 4.0 boyutu altında yer alan teknolojilerin mevcut durumlarının değerlendirilmesi ve gelecekteki

hedeflerin belirlenebilmesi için seçilen yedi kişinin bu konudaki uzmanlıkları önem arz etmektedir. Çizelge 5.1’de fabrika 4.0 boyutu altında yer alan alt kriterler verilmiştir.

Çizelge 5.1. Fabrika 4.0 boyutu alt kriterleri

	Alt Kriterler	
	Otomasyon	Arttırılmış Gerçeklik
FABRİKA 4.0	Büyük Veri Analitiği	Siber Güvenlik
	Bulut Bilişim	Dijital İkiz
	Karar Destek Sistemleri	Eklemeli İmalat
	Makine Öğrenmesi	Teknoloji Entegrasyonu
	Üretim Yönetim Sistemleri	Sürdürülebilirlik
	Arttırılmış Gerçeklik	Akıllı Ürün
	Bakım Planlama ve Zamanlama	

Fabrika 4.0 boyutu altında yer alan kriterler değerlendirilirken fabrika içerisinde yer alan uygulamalar göz önünde bulundurulmuş ve hangi teknolojinin veya kavramın üretim sistemi içindeki ne kadar efektif bir rol oynadığı üzerine odaklanılmıştır. Bu doğrultuda 18 kriterin fabrika içerisindeki uygulama alanları ve değerlendirilirken hangi parametrelerin göz önünde bulundurulduğu aşağıdaki açıklanmıştır.

Otomasyon alt kriteri dijital dönüşüm süreçleri için büyük önem arz etmekte olup literatürde yer alan olgunluk modeli çalışmalarında sıklıkla tercih edilmiştir (Köküner, 2018; Mittal, Wuest ve Romero, 2018; Schumacher vd., 2019). Fabrika içerisindeki üretimin farklı alanlarında otomasyon sistemlerinden yararlanılmaktadır. Bu otomasyon sistemleri üretim faaliyetlerinin anlık olarak takip edilmesine olanak sağlamak ile beraber fabrikaları akıllı fabrikalara çevirmektedir. Bu sayede üretim akışı içerisinde meydana gelen hız değişimlerinde, arıza ve duruşlarda anlık takip imkânı tanır. Normal şartlarda fark edilmeyen ve verimliliği büyük ölçüde etkileyen problemler bu sayede kayıt altına alınarak uyarı sistemleri ile hem operatör hem de yöneticiler tarafından takip edilebilir. Ayrıca günümüzde üretimin verimliliğinin takip edilmesi için gerekli olan OEE (Toplam Ekipman Verimliliği) ve duruş analizleri gibi teknik hesaplamalar da bu otomasyon sistemleri sayesinde otomatik olarak sunulmaktadır. Bu kriterin değerlendirme aşamasında baz alınan faktör ise uygulamayı yapılan fabrika içerisinde bu sistemlerin aktif olarak kullanılıp kullanılmadığı ve eğer kullanılıyorsa kaç farklı bölümde kullanıldığının ve gelecekte nasıl bir yapı planlandığı olarak belirlenmiştir. Bu kriterin seçilmesindeki amaç; otomasyon sistemlerinin üretim içerisindeki yaygınlığının ve uygulama seviyesinin ölçülmesidir. Uygulamanın gerçekleştirildiği firmanın

gizlilik politikası gereği otomasyon adı altında yapılan projeler detaylı olarak açıklanamamaktadır.

Makineden makineye kavramı sensörler veya farklı teknolojik cihazlar yardımı ile makinelerin birbiri ile iletişim kurması olarak tanımlanabilmektedir. Mittal vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada da endüstri 4.0 ile hayatımıza giren üst seviye teknolojilerden olan makineden makineye teknolojisi bir kriter olarak yer almıştır. Bu teknolojiyi üretim sistemlerine entegre edebilmek için teknolojik cihazlar ile üst düzey yazılımlara da ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple uygulamanın gerçekleştirildiği fabrika içerisinde bu teknolojiye ait projeler şu an henüz başlangıç seviyesinde bulunmaktadır. Bu projelerin temelinde ise erken uyarı sistemleri yer almaktadır. Şu an fabrika içerisinde özellikle makinelere yerleştirilen farklı sensörler sayesinde makineler bozulmadan önce sorumlu kişilerin telefonlarına uyarı mailleri gönderebilecek yazılımlar üzerinde çalışılmaktadır. Buna ek olarak malzeme planlama bölümünün de efektif çalışabilmesi için üretim içerisindeki stok seviyeleri hakkında gerekli kişi ve bölümlere bilgilendirmede yapabilen erken uyarı sistemleri için de çalışmalar yapılmaktadır. Bu kriterin değerlendirilme aşamasında bu projelerin sayıları ve uygulanma durumları göz önüne alınmış olup işletme politikaları gereği proje ayrıntıları ile ilgili bilgi verilememektedir.

Büyük veri analitiği, dijitalleşme süreçlerinde en çok öneme sahip kriterlerin başında gelmektedir. Endüstri 4.0 ile birlikte üretim sistemlerine dahil olan her bir teknoloji aynı zamanda çok sayıda veriyi de beraberinde getirmiştir. Makineler bağlanan ve izlenebilirliğe yardımcı olan farklı teknolojik aletlerin topladığı verilerin anlamlandırılması büyük veri analitiği sayesinde yapılabilmektedir. Dijital dönüşüm faaliyetleri içerisinde önemli bir yeri olan büyük veri teknolojisi literatürdeki çok sayıda olgunluk modelinde kullanılmıştır (Bibby ve Dehe, 2018; Kökümer, 2018; Pacchini vd., 2019). Fabrika içerisinde toplanan veriler öncelikle temizlenmekte ve daha sonra seçilen büyük veri programları yardımı ile analiz edilmektedir. Bu verilerin anlamlandırılması ile gerekli yerlerde iyileştirmeleri gerçekleştirmek için projeler belirlenmektedir. Bu kriterin değerlendirilmesi için büyük veri ile ilgili yapılan projelerin sayısı ve uygulandıkları bölümler baz alınmaktadır.

Bulut bilişim kullanıcılara veri depolama hizmeti sağlamaktadır. Bu sayede istenilen zamanda, istenilen veri hızlı bir şekilde sağlanmış olmaktadır. Fabrika içerisinde bulut bilişim sistemlerinden şu anda büyük oranda yararlanılmaktadır. Çok sayıda verinin tutulduğu ve bu verilerden anlamlı çıktılar elde etmenin amaçlandığı işletmede elde edilen her bir verinin

depolanması çok önemlidir. Dolayısı ile bu kriter bulut bilişim sistemlerinin ne kadar etkin kullanıldığını değerlendirmek amacı ile tanımlanmış olup literatürde farklı çalışmalarda değerlendirilmeye alınmıştır (Bibby ve Dehe, 2018;Oktay, 2021; Schumacher vd., 2019).

Karar destek sistemleri özellikle üretimde verimliliği arttırmak için kullanılan sistemlerdir. Schumacher vd. (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada da kullanılan bu kriter uygulamanın gerçekleştirildiği fabrika içerisinde özellikle üretim planlama alanında tercih edilmektedir. Makinelerin etkin bir şekilde çalışması ve doğru zamanda doğru miktarda üretim yapılması amacı ile karar destek sistemlerinden yararlanılmaktadır. Şu anda üretimin belirli bölümlerinde kullanılan bu sistemlerin varlığını arttırmak için farklı yazılım programlarından yararlanılmaktadır. Bu kriterin değerlendirme parametresi ise üretimde yer alan karar destek sistemlerinin kaç farklı bölümde kullanıldığı üzerine odaklanmaktadır.

Üretim yönetim sistemleri özellikle karmaşık yapıdaki işletmelerdeki veri akışlarını anlık olarak izleme ve kontrol etme imkânı tanıyan sistemlerdir. Bu sistemler sayesinde fabrika içerisindeki ürünlerin tüm süreçleri görsel olarak takip edilebilmektedir. Üretim yönetim sistemleri, kriter olarak literatürde yer alan olgunluk modeli çalışmalarında da sıklıkla tercih edilmektedir (Bibby ve Dehe, 2018;Çınar vd., 2021;Kökümer, 2048;Wagire vd., 2020). Güncel durumda fabrika içerisindeki üretim hatlarındaki mamul seviyeleri izlenebilmekte ve eğer meydana geldi ise duruşlar ve arızalar anlık olarak kontrol edilebilmektedir. İlerleyen dönemlerde tüm üretim aşamalarına yaygınlaştırılması hedeflenen bu sistemin etkinliği bu kriter yardımı ile değerlendirilmektedir. Burada üretim yönetim sistemlerine hangi bölümlerden gelen verilerin dahil olduğu dikkate alınmış ve kaç farklı bölümün aktif olduğuna göre puanlama yapılmıştır.

Artırılmış gerçeklik, Kökümer (2018), Oktay (2021) ve Pacchini vd. (2019)'un çalışmalarında da kriter olarak ele alınmıştır. Bilgisayardan gelen veriler ile fiziki bir ortamın eşdeğerini oluşturmak amacı ile kullanılan bu teknoloji işletme içerisinde başlangıç seviyesinde kullanılmaktadır. Özellikle bakım bölümünde çalışan kişilerin mekanik ve elektrik eğitimleri arttırılmış gerçeklik kullanılarak 3D gözlükler yardımı ile yapılmaktadır. Buna ek olarak kalite kontrol çalışmalarında ürünleri kontrol etmek amacı ile yine 3D gözlüklerin kullanılacağı projeler üzerine çalışılmaktadır. Bu kriterin değerlendirilmesi bu projelerin sayısına ve uygulanma durumlarına bakılarak gerçekleştirilmiştir. İşletmenin gizlilik politikası gereği planlanan projeler ile ilgili detaylı bilgi verilememiştir.

Bakım planlama ve zamanlama faaliyetleri dijital dönüşüm faaliyetlerinin etkinliğinin en net görüldüğü alandır. Dolayısı ile bakım departmanı teknoloji entegrasyonunun en yoğun gerçekleştiği bölümdür. Üretim mekanizmasının aksamadan çalışması ve üretilen ürün miktarının belirli bir standartta ilerlemesi verimlilik için büyük önem teşkil etmektedir. Carolis, Macchi, Negri, ve Terzi (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada da yer alan bakım kavramı oluşturulan modele eklenmiştir. Burada da en büyük sorumluluk makinelerin aksamadan ve en yüksek verimlilik ile çalışması için bakım departmanına düşmektedir. Özellikle makineden makineye teknolojisi ile çalışılarak makinelerin bozulmadan uyarı vermesi duruşlar yaşanmadan bakım çalışmalarının planlanabilmesi ve bu planlamaların belirli aralıklar ile güncellenmesi bu kriter ile değerlendirilmektedir. Bakım departmanında yapılan projelerin genel içeriği gizlilik politikaları gereği bu şekilde aktarılmıştır. Bakım çalışmaları için yapılan planlamaların ve bunların uygulanması bu değerlendirme aşamasında göz önüne alınmaktadır.

Makine öğrenmesi kriteri, Çınar vd. (2021)'in oluşturduğu olgunluk modelinde de alt kriterler arasında yer almakta ve yapay zekanın bir alt alanı olmakta birlikte bilgisayarların veriden öğrenmesi temeline dayanmaktadır. Şu anda fabrika içerisinde farklı kaynaklardan bilgisayarlara aktarılan verilen bu teknoloji sayesinde süreçlerin performansını arttırmaya yardımcı olmaktadır. Özellikle makinelerden gelen sıcaklık, titreşim ve basınç gibi teknik verilerden yola çıkılarak makinelerin bakım planlamaları bu yöntem ile birlikte makineler arıza yapmadan önce yapılabilmektedir. Aynı zamanda kalite verilerinden öğrenen sistemler oluşturularak hattan çıkan ürünlere kabul veya red verileceği konusunda yine makine öğrenmesinden faydalanılmaktadır. Makine öğrenmesini içeren projeler uzmanlar tarafından işletme yapısına uygun olarak geliştirildiğinden ayrıntılı bilgi verilememiştir. Bu kriterler ile birlikte fabrika içerisinde bu teknolojinin kullanım alanları değerlendirilmiş olacaktır.

Siber güvenlik günümüzde tüm işletmeler için oldukça önemli bir kavram haline gelmiş ve bu sebeple literatürde bulunan olgunluk modellerinde sıklıkla kullanılmıştır (Çınar vd., 2021; Oktay, 2021; Schumacher vd., 2019). Özellikle dördüncü endüstri devrimi sonrasında üretimsel ve yönetsel birçok uygulama internet aracılığı ile gerçekleştirilmeye başlanmış ve bu da işletmelerin verilerini tehlikeye açık hale getirmiştir. Fabrika 4.0 kriteri altında belirtilen kriterlerin gerçekleştirilmesi için de üretimden elde edilen veriler yine bilgisayar tabanlı programlar aracılığı ile işlenmekte ve bu işlenen veriler yönetim tarafında da bilgisayar yolu ile depolanmaktadır. Bu sebeple işletmelerin kaynaklarını internet üzerinde

gelebilecek tehlikelere karşı korumak için siber güvenlik politikaları oluşturulmuştur. Bu kriter diğer tüm teknolojilerin sağlıklı bir şekilde sürdürülebilmesi için önemli olmakla birlikte bu açıdan değerlendirilmiştir.

Dijital İkiz teknolojisi, Weber, Königsberger, Kassner ve Mitschang (2017) tarafından sunulan olgunluk modeli içerisinde de yer almakta ve bize fiziki ortamın birebir aynı sanal bir kopyasını oluşturma imkânı tanımaktadır. Burada önemli olan dijital ikizi oluşturulacak alanda bulunan tüm sensörlerin bu sisteme entegre edilebilmesidir. Dolayısı ile bu uzun ve çok sayıda bileşeni olan bir süreçtir. Şu anda fabrika içerisindeki hatlarda iyileştirme ve hat dengeleme çalışmalarında dijital ikiz teknolojisinden yararlanılmaktadır. Fakat bu konuda az sayıda çalışan olmasından dolayı diğer teknolojilere oranla daha yavaş ilerlemektedir. Günümüzde üretimdeki iyileştirme faaliyetleri için oldukça önemli olan bu teknoloji bu kriter ile değerlendirilmekte ve gelecekteki hedef değere ulaşılabilmesi için planlamalar yapılmaktadır.

Eklemeli imalar üç boyutlu yazıcıların üretim sistemlerine dahil olmasını ifade etmektedir. Özellikle sürdürülebilirliğin ön plana çıkması ile birlikte çok sayıda işleme gerek kalmadan ürünlerin üretilmesi için üç boyutlu yazıcılar kullanılmaktadır. Günümüzde kullanım alanı giderek artmakta olan eklemeli imalat teknolojisi literatürde farklı çalışmalarda değerlendirmeye alınmıştır (Bibby ve Dehe, 2018; Kökümer, 2018; Oktay, 2021; Schumacher vd., 2019). Fabrika içerisinde üç boyutlu yazıcılar deneme aşamasında olup şu an üretim sistemleri ile çalışmamaktadır. Genellikle araştırma ve geliştirme bölümlerinin isteği üzerine denemeler yapılmaktadır. Önümüzdeki süreçte daha sık kullanılması planlanan yazıcıların etkinliği bu kritere yardımı ile değerlendirilmiştir.

Teknoloji Entegrasyonukriteri diğer tüm endüstri 4.0 teknolojilerinin uygulamanın gerçekleştirildiği fabrika içerisindeki kullanımını değerlendirmek amacı ile seçilmiştir. Fabrika içerisinde dijital dönüşüm adı altında çok sayıda proje yapılsa da burada önemli olan bu projelerin üretim alanlarının hepsine aynı şekilde uygulanmasıdır. Dolayısı ile üretim alanlarındaki teknoloji entegrasyonu bu kriter altında değerlendirilmiştir.

Sürdürülebilirlik kavramı doğal kaynakların gün geçtikçe azalması ile birlikte oldukça önem kazanmış ve ana alanı sürdürülebilirlik olan projelerin ortaya çıkışına zemin hazırlamıştır. Bu projeler genellikle karbon ayak izini azaltmak veya tekrarlanan işlemlerden kaynaklı kullanılan maddelerin oranını azaltmak üzerine yapılmaktadır. Kriterlerini baz alınan

modelde yer almayan bu kriter işletmenin sürdürülebilirlik alanında yapılan projeleri değerlendirmek amacı ile modele eklenmiştir. Bu kriter değerlendirilirken sene bazında yapılan sürdürülebilirlik projelerinin sayısı baz alınmıştır.

Akıllı ürün kriteri, Lichtblau vd. (2015)'in gerçekleştirdiği çalışmaya da dahil edilmiş olup günümüzde önem kazana kavramlar arasında yer almaktadır. Fabrika içerisinde üretilen akıllı ürünler için de farklı üretim ve yönetim projeleri bulunmaktadır. Bu kriter ile sene içerisinde yapılması planlanan akıllı ürün projelerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Akıllı ürün projeleri işletmenin gizlilik politikası gereği açıklanamamaktadır. Değerlendirme aşamasında yine sene içerisindeki proje sayıları dikkate alınmıştır.

5.4.2. Lojistik 4.0

Modelin ikinci boyutu olan lojistik 4.0, fabrika içerisindeki en karışık ve en çok veri barındıran süreçlerden biri olan lojistiğin ayrı olarak değerlendirilmesi amacı ile oluşturulmuştur. Olgunluk modelinin uygulanacağı işletme büyük ölçekli bir işletme olup, içerisinde her bir fabrika özelinde lojistik departmanları bulundurmaktadır. Soğutucu, çamaşır makinası, bulaşık makinası ve fırın olmak üzere toplamda dört fabrikanın bulunduğu işletmede her bir fabrikanın lojistik sürecinin analiz edildiğini ve bu süreçlerin daha sonra tek bir lojistik biriminde toplandığını düşünüldüğünde bu sürecin en yüksek verimlilik ile yürütülmesi adına birçok teknolojiye yararlanılmaktadır.

Çizelge 5.2. Lojistik 4.0 boyutaltı kriterleri

LOJİSTİK 4.0	Alt Kriterler	
	Veri Görselleştirme	Depo ve Depolama
	Uçtan Uca Görünürlük	Yalın Lojistik
	Büyük Veri Analitiği	

Çizelge 5.2'de verilmiş olan lojistik 4.0 boyutu altında yer alan 5 alt kriteri lojistik, depolama ve kaynak planlaması süreçlerinde uygulanan veya uygulamaya konulmuş hala adaptasyon sürecinin devam ettiği teknolojiler olarak açıklayabiliriz. Burada yer alan kriterler lojistik bölümden çalışan altı mühendis tarafından değerlendirilmiştir. Bu kişiler dijital dönüşüm projelerinin lojistik tarafında yer alan projelerine destek verdikleri için seçilmiştir. Değerlendiricilerin dördü endüstri mühendisi diğer ikisi ise elektrik ve elektronik mühendisi olup 2 ile 5 yıl arasında tecrübeye sahiptirler. Modelde lojistik 4.0 adı altında bulunan kriterlerin işletmede hangi uygulama alanlarda kullanıldığı ve değerlendirilirken hangi parametrelerin göz önüne alındığı aşağıda verilmiştir.

Veri görselleştirme faaliyetleri lojistik süreçlerinde hem iç hem dış lojistik verilerinin takip edilmesi süreçlerin kontrol altında tutulabilmesi için çok önemlidir. Dolayısı ile üretimdeki farklı proseslerdeki stoklar ve üretimi tamamlanmış ürünlerin anlık takibi üretim içerisinde alınan verilerin görselleştirilmesi ile takip edilmektedir. Bu şekilde gerekli alanlara ihtiyaç duyulan lojistik desteği sağlanmaktadır. Veri görselleştirme kriterinin değerlendirilmesi amacı ile bu alanda yapılan projelerin dağılımı ve sayısı göz önüne alınmıştır. Üretim aşamasında elde edilen verilerin anlık olarak takip edilmesine olanak sağlayan veri görselleştirme faaliyetleri literatürde yer alan çalışmalarda da göz önüne alınmıştır (Çınar vd., 2021; Mittal vd., 2018).

Uçtan uca görünürlük kriteri makinelerden alınan anlık veriler ile üretim proseslerindeki ürün ve malzeme akışı anlık olarak izlenebilmesini ifade etmektedir. Uçtan uca görünürlük teknolojisini tam anlamı ile uygulayabilmek için üretimdeki her bir verinin toplanması ve dijital ortama aktarılması gerekmektedir. Şu anda üzerinde çalışılan en önemli konulardan biri olmakla beraber projeler ile ilgili ayrıntılı bilgi işletme kuralları gereğince verilememiştir. Uçtan uca görünürlük kriterini değerlendirmek amacı ile bu teknolojinin oluşması amacı ile yapılan uygulamalar ve yapılan projelerin sayısı dikkate alınmıştır.

Büyük veri analitiği kriteri endüstri 4.0 teknolojilerinin genelini kapsamakta olup işletmelerin veri yönetimi çalışmalarını değerlendirmektedir. İç ve dış lojistik süreçlerin çok sayıda veri içerdiğinden dolayı bu verilerin toplanması ile analiz edilerek anlamlı sonuçlar çıkarılması da çok önemlidir. Dolayısı ile büyük veri analitiği yöntemleri ile analiz edilen veriler sonucunda doğru projeler ortaya çıkarılmaktadır. Dolayısı ile bu kriterlerin değerlendirilmesi amacı ile büyük veri alanında yapılan projeler ve uygulanma dereceleri göz önüne alınmıştır.

Depo ve depolama kriteri Kökümer (2018) tarafından yapılan tez çalışmasında da kullanılmış olup lojistik 4.0 boyutu altına ilave edilmiş ve depolama süreçlerinin performansının ölçülmesi amaçlanmıştır. Stok alanlarının etkin kullanılması ve sayımların zamanında ve eksiz gerçekleştirilmesi için de farklı sistemler kullanılmaktadır. Örneğin stok sayımlar drone yardımı ile yapılmakta ve insan gücünün gereksiz kullanımının önüne geçilmektedir. Gerçek zamanlı izleme teknolojisi sayesinde de depo içerisinde gerçekleşen her bir faaliyet kayıt altına alınmaktadır. Depolama sistemlerinin etkin bir şekilde çalışabilmesi için yapılan projeler bu kriterin değerlendirilmesi için dikkate alınmaktadır.

Yalın lojistik kriteri lojistik süreçlerindeki yalınlaştırma çalışmalarının performansını değerlendirmek üzere tanımlanmıştır. Üretim faaliyetlerini daha hızlı gerçekleştirebilmek amacı ile lojistik süreçlerindeki israfların ortadan kaldırılmasını amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda fabrikada elektronik kanban sistemi kullanılmakta ve doğru zamanda doğru yere, doğru ürünün ulaşması sağlanmaktadır. Bu sayede üretimin durmadan devam etmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca insansız taşıma araçlarının üretim içinde malzeme taşınması amacı ile kullanılması da gereksiz insan gücü kullanılmasının önüne geçmektedir. Lojistik süreçlerinde yapılan ve üretimin aksamadan devam etmesine olanak sağlayan yalın lojistik kriterinin değerlendirilmesi için de yine bu alana hizmet eden projeler göz önüne alınmıştır.

5.4.3. Yönetim 4.0

Modelin üçüncü boyutu olan yönetim 4.0 için seçilen kriterler de Çizelge 5.3'te verilmiş olup bu kriterler yönetim biriminde de görev yapan beş kişi ile değerlendirilmiştir. Bu kişilerin seçilme amacı, yönetsel süreçlerde ve dijital dönüşüm stratejilerinin oluşturulmasında faaliyetlerinde görev almalarıdır. Bu kişilerin üçü makine mühendisi iken iki kişi elektrik ve elektronik mühendisi olup 5 ile 8 yıl arasında tecrübeye sahiptir.

Çizelge 5.3. Yönetim 4.0 boyutu alt kriterleri

YÖNETİM 4.0	Alt Kriterler	
	I4.0 Yönetim Modeli	I4.0 Yatırım
	Yalın Üretim Stratejisi	Strateji 4.0
	İnovasyon Stratejisi	İş Birliği
	Organizasyon ve Liderlik	

Modelin üçüncü boyutu olan yönetim 4.0, üst yönetimin dijitalleşme sürecine olan bakış açısını anlamak amacı ile düzenlenmiştir. I4.0 yönetim modeli ve inovasyon stratejisi gibi kriterler hızla değişen teknolojilere ve sistemlere karşı işletmenin nasıl bir yol izlediğinin anlaşılmasına yardımcı olacaktır. Yönetim 4.0 aynı zamanda model içerisinde yer alan en önemli boyut olarak görülebilmektedir. Çünkü endüstri 4.0 ile hayatımıza giren yeni nesil teknolojilerin fabrikaların içerisindeki üretim sistemlerine uyarlanması, lojistik süreçlerinin daha verimli bir şekilde ilerleyebilmesi için yeni sistemlerin kurulması ve tüm bu uygulamaların en üst verimlilikte çalışabilmesi için gerekli olan işgücünün yetiştirilmesi ancak üst yönetimin bu sürece değer vermesi ile gerçekleşecektir. Dolayısı ile rekabetin üst düzeyde olduğu şartlarda yöneticilerin çizeceği yol haritası her bir işletmenin geleceğini doğrudan etkilemektedir. Yönetim 4.0 boyutu altında yer alan kriterlerin uygulamanın

gerçekleştirildiği fabrikada uygulama alanları ve kriterler değerlendirilirken hangi parametrelerin göz önüne alındığı aşağıda açıklanmıştır.

I4.0 yönetim modeli kriteri işletmenin dijital dönüşüm sürecinde uyguladığı yönetim tarzını ifade etmektedir. Günümüzde çoğu işletmenin endüstri 4.0'a uyum sağlamak amacı ile farklı yönetim modelleri bulunmaktadır. Bulunulan fabrikada hem içerdeki birimler özelinde hem de geneli kapsayan bir I4.0 yönetim modeli bulunmakta ve yıllık olarak yapılan projelerde bu yönetim modeli de göz önünde bulundurulmaktadır. Dolayısı ile bu kriterin değerlendirilmesi amacı ile yönetim modelinin bulunup, bulunmaması ile fabrika içerisindeki her bir bölümde uygulanıp uygulanmadığı göz önüne alınmıştır.

Yalın üretim stratejisi kriteri Kökümer (2018)'in gerçekleştirdiği olgunluk modeli çalışmasında değerlendirilmeye alınmıştır fakat yönetim 4.0 boyutu altında değerlendirilmesi yönetimin bu konudaki bakış açısını göstermektedir. Yalın üretim süreçlerin daha az kayıpla ve daha hızlı bir şekilde gerçekleşmesini sağlamaktadır. Dolayısı ile sadece üretimde çalışan kişilerin değil üst yönetiminde bu konuda bir strateji oluşturması gerekmektedir. Fabrika içerisinde de üst yönetim tarafından oluşturulan bu strateji uygulanmakta ve içerisinde yer alan maddeler denetimler ile kontrol edilmektedir. Bu kriter ile bu stratejinin hangi bölümler için oluşturulduğu ve denetlendiği göz önüne alındığına dikkat edilerek değerlendirme yapılmıştır.

İnovasyon stratejisi kavramı genellikle endüstri 4.0 ile bağdaştırılmakta ve literatürde yer alan çalışmalarda kriter olarak ele alınmaktadır (Bibby ve Dehe, 2018; Çınar vd., 2021; Lichtblau vd., 2015; Mittal vd., 2018). Değerlendirmenin gerçekleştirildiği fabrika beyaz eşya sektöründe faaliyet gösterdiği için inovasyon çalışmaları önemli süreçlerin başında gelmektedir. Dolayısı ile pazar payını doğrudan etkileyen bu süreç için üst yönetim tarafından inovasyon stratejileri oluşturulmaktadır. Bu kriterde inovasyon stratejilerinin varlığı ve etkinliği değerlendirilmiş olup yönetsel kararlar gereği stratejiler hakkında ayrıntılı bilgi verilememiştir.

Organizasyon ve liderlik kriteri dijital dönüşümün organizasyonlar içerisinde nasıl yürütüldüğünü ele almaktadır. Endüstri 4.0 bileşenlerinin üretim ve yönetim süreçlerine adapte edilebilmesi ve sürdürülebilir olması için organizasyon içerisinde bu süreçleri takip ederek liderlik yapacak kişilerin olması gerekmektedir. Bu sayede daha oluşturulan stratejilere uygun hareket edilip edilmediği denetlenmiş olmaktadır. Organizasyonun dijital dönüşüm

sürecine uyum sağlayabilmesi süreklilik için büyük önem arz ettiğinden dolayı organizasyon kavramı literatürde sıklıkla çalışmalara ana veya alt kriter olarak seçilmiştir (Çınar vd., 2021; Kiraz vd., 2019; Lichtblau vd., 2015; Rafael vd., 2020). Fabrika içerisinde çoğu endüstri 4.0 ve dijitalleşme üzerine çalışan birimler bulunmakta ve burada çalışanlar bu denetim sürecini gerçekleştirmektedir. Bu kriter sayesinde bu birimlerin aktifliği değerlendirilmektedir.

I4.0 yatırım kriteri,işletmelerin dijital dönüşüm sürecine başlayabilmeleri için öncelikle yatırım planlarını oluşturmaları gerektiğinin bir ifadesidir. Dolayısı ile dijitalleşme aşamasında değerlendirilmeye alınması gereken yatırım kriteri farklı olgunluk modeli çalışmalarına da dahil edilmiştir (Bibby ve Dehe, 2018; Çınar vd., 2021; Schumacher vd., 2019; Wagire vd., 2020). Dijitalleşme faaliyetlerinin etkin bir şekilde devam edilebilmesi amacı ile bu alanda yapılacak yatırımlarında yıllık bazda planlanması gerekmektedir. Yapılan bu yatırım planlarına dayanarak yıl içerisinde yapılacak projeler ortaya çıkmaktadır. Bu kriter değerlendirilirken yatırım planlarının yapılma durumunu göz önüne alınmıştır.

Strateji 4.0 dijital dönüşüm süreçleri için en önemli kriterlerden biridir. Bu sebeple literatürde yer alan çalışmalarda ana veya alt kriter olarak olgunluk modellerine dahil edilmektedir (Bibby ve Dehe, 2018; Çınar vd., 2021; Schumacher vd., 2016). Fabrika içerisindeki her bir üretim birimi için belirli endüstri 4.0 hedefleri bulunmaktadır. Dolayısı ile bu hedefler göz önüne alınarak projeler belirlenmektedir. İlerleyen süreçte proje çıktılarına göre stratejiler güncellenmektedir. Bu kriter üretim birimleri için oluşturulmuş herhangi bir stratejinin olup olmadığını değerlendirmek amacı ile oluşturulmuştur.

İş birliği kriteri ise yönetim 4.0 boyutu altında bulunan tüm kriterlerin sistematik bir şekilde ilerleyebilmesi için çok önemlidir. Stratejiler ile belirlenmiş süreçlerden istenilen çıktıların elde edilebilmesi için üst yönetim ile fabrikadaki süreç yöneticilerinin ve hatlarda sorumlu mavi yaka çalışanların dahi iş birliği içinde çalışması istenmektedir. Bu doğrultuda bu kriter organizasyon içerisindeki iş birliğini değerlendirmek amacı ile seçilmiştir.

5.4.4. Operatör 4.0

Operatör 4.0'a boyutuna bakıldığında çalışanların gelişimine ve çalışma ortamına ait kriterlerin değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Üretim içerisinde uygulamaya konulan her teknoloji ve kurulan sistem orada sorumlu olan tüm çalışanlar için anlaşılabilir ve kolay uygulanabilir olmalıdır. Ancak bu şekilde tam olarak bir geçiş süreci sağlanabilir. Bu doğrultuda operatör 4.0 boyutu altı kişi tarafından değerlendirilmeye alınmıştır.

Değerlendirmede bulunan altı kişi üretim süreçlerinden sorumlu olan ve operatörler ile birebir çalışan kişilerden seçilmiştir. Altı kişinin üçü makine mühendisi, bir kişi elektrik ve elektronik mühendisi ve diğer katılımcı da endüstri mühendisi olarak görev yapmakta olup 3 ile 6 yıl arasında tecrübeye sahiptirler.

Çizelge 5.4. Operatör 4.0 boyutu alt kriterleri

OPERATÖR 4.0	Alt Kriterler	
	Bilişsel Ergonomi	Organizasyonel Ergonomi
	Fiziksel Ergonomi	Operatör Becerileri
	I4.0 Yatırımı	İnsan Kaynakları 4.0

Operatör 4.0 boyutu altında bulunan kriterler Çizelge 5.4'te verilmiş olup fabrika içerisindeki kullanım alanları ve kriterlerin değerlendirme aşamasında göz önüne alınan parametreler aşağıda açıklanmıştır.

Bilişsel ergonomi, zihinsel iş yükü, becerili performanslar, karar verebilme, bilgisayar-insan etkileşimi, iş sistemleri, çalışan güvenirliliği gibi konuları içermektedir. Bilişsel ergonomide, bilgisayar- insan sistemlerinde daha verimli ve etkin bir çalışmayı sağlamak için görev-sistem-kullanıcı etkileşimi sistematik biçimde incelenmektedir. Bu doğrultuda bakıldığında çalışanların dijital dönüşüm ile değişen sistemlere uyum sağlayabilmeleri amacı ile yeni nesil makineler ve özellikle bilgisayarlı üretim süreçleri hakkında çalışanlara belirli aralıklar ile eğitimler verilmektedir. Bu sayede kişilerin becerilerine yatırımda bulunularak bilişsel olarak daha rahat bir şekilde çalışmalarını amaçlanmaktadır. Bu kriterin değerlendirilmesi amacı ile yapılan çalışmalara ve planlanan eğitimler göz önünde bulundurulmuştur.

Fiziksel ergonomi özellikle; insan vücudunun ölçüleri, fiziksel çevre tasarımı (gürültü, havalandırma gibi), çalışanların güvenliği ve sağlığıyla ilgili tasarımlar vevücudun çalışma ortamlarında daha iyi kullanılmasını konu almaktadır(Emre, 1995). Kişilerin çalıştığı ortam koşulların verimliliğe doğrudan etki etmektedir. Dolayısıyla üretim sistemlerinde yapılacak her türlü değişim fiziksel ergonomi kuralları dikkate alınarak gerçekleştirilmektedir. Bilişsel ergonomi de olduğu gibi bu kriterde bu konuda yapılan çalışmaların değerlendirilmesini amaçlamaktadır.

Konu olarak ise organizasyonel ergonomi; iletişim, iş tasarımları, çalışma saatlerinin ayarlanması, ekip kaynaklarının yönetimi, grup çalışması, işbirlikçi çalışmalar ve yeni iş örnekleriyle ilgilenmektedir. (Özok, 1995). Yönetim 4.0 boyutunda bulunan tüm strateji kriterlerinin benimsenmesi ve bir ekip çalışması olarak görülerek uygulanması bu kriterin sağladığı avantajlardan biridir. Çalışma ortamı ve saati gibi çalışanın etkilendiği parametrelerde bu kriter altında değerlendirilmektedir.

Yönetim 4.0 boyutu altında yer alan yatırım kriteri yapılacak endüstri 4.0 projeleri için yapılan yatırım planını ifade etmekteydi. Burada ise yapılacak projelerin en verimli ve hızlı şekilde gerçekleşmesi için mavi yaka çalışanların eğitimleri için oluşturulan yatırım planı değerlendirilmektedir. Değişen teknoloji ile üretim sistemleri de değişmekte ve çalışan yeteneklerinin de bu doğrultuda geliştirilmesi gerekmektedir. Bu kriter ile çalışanların eğitim ve gelişimi için bir yatırım planı olup olmadığı ile ne kadar etkili olduğu üzerinde durulmuştur.

Operatör yetenekleri kriteri dijital dönüşüm ile çalışanların sahip olması gereken yeteneklerin değişim göstermesi ile ilgilidir. Bu değişimi gerçekleştirmek için de çalışanların mevcut durumlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle fabrikada öncelikle yöneticileri tarafından çalışanların mevcut durumları her bir teknoloji için puanlanmakta ve daha sonra olmaları istenen gereken konum belirlenmektedir. Bu matrisin oluşturulması sonrası eğitim bölümü tarafından kişilerin eğitim programları yapılmaktadır. Bu doğrultuda eğitim alan kişilerin durumları çeyreklik bazda tekrar değerlendirilmekte ve eğer gerekiyorsa yineleme eğitimleri ya da bir üst eğitime yönlendirilmeleri yapılmaktadır. Bu kriter ile operatörlerin becerilerini geliştirilmesine yönelik olarak yapılan çalışmalar ve bu çalışmaların yaygınlığı değerlendirilmektedir.

İnsan Kaynakları 4.0 kriteri işletmenin yetenek yönetimi stratejisini değerlendirmek üzere oluşturulmuştur. Fabrika belirlediği yönetim stratejisine uygun olarak elinde bulunan insan kaynağını da en etkin şekilde kullanmak durumundadır. Burada da devreye yetenek yönetimi kavramı girmektedir. Yetenek yöntemi kavramı doğrudan dijital dönüşüm sürecinin performansını etkilediği için önemli bir kriter olarak nitelendirilmekte ve literatürdeki olgunluk modellerinde tercih edilmektedir (Köküner, 2018; Schumacher vd., 2019; Wagire vd., 2020). İnsan kaynakları öncelikle gelişen teknolojik sistemlere uyum sağlamaları amacı ile beyaz yakanın alması gereken eğitimleri planlamakta ve gelecekteki rolleri hakkında şu anda onları hazırlamak durumundadır. Aynı şekilde mavi yakanında istenen yetkinlik

seviyesine gelmesini planlamakta yine bu kapsama girmektedir. Burada amaç tüm çalışanların değişen koşullara uyum sağlayabilmesi ve en verimli şekilde çalışmasını sağlamaktır. Dolayısı ile bu kriter ile insan kaynakları biriminin bu konu ile ilgili hangi alanlarda çalışma yaptığı değerlendirilmektedir.

5.5. Endüstri 4.0 Olgunluk Modelinin Değerlendirme Süreci

Modelde kullanılacak ana ve alt kriterlerin belirlenmesinin ardından modelin değerlendirme aşamasına geçilmiştir. Literatürde yer alan olgunluk modellerinde kriterlerin değerlendirilmesi amacı ile çok kriterli karar verme yöntemlerinden faydalanılmıştır (Elibal ve Özceylan, 2018; Kiraz vd., 2018; Koyuncu, 2019; Oktay, 2021; Sarı, 2020; Wagire vd., 2020). Yapılan çalışmada da dijital olgunluk seviyesinin belirlenmesi için AHP ve TOPSIS yöntemleri birlikte kullanılmış olup veri toplama yöntemi olarak anket yardımı uzman görüşlerine başvurulmuştur.

AHP, karar vermede grup veya bireyin önceliklerini dikkate alan, nitel veya nicel değişkenleri bir arada değerlendirebilen matematiksel bir tekniktir (Dağdeviren, Akay ve Kurt, 2004; Bolloju, 2001; Lin, Lin, Chang, Chao ve Julian, 2008). AHP genel olarak karmaşık problemleri karar vericiler tarafından daha basit ve anlaşılabilir bir hale getirdiği için çalışmalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Buna ek olarak; AHP, probleme hem objektif hem de subjektif düşüncelerin karar sürecine dâhil edilmesine imkân vermekte olup, grup kararları için diğer yöntemlere göre daha uygundur (Tüzemen ve Özdağoğlu, 2007). Bu doğrultuda olgunluk modelinin değerlendirilmesinde ilk adım olan kriter ağırlıklarının belirlenmesi için AHP yöntemi tercih edilmiştir.

Modeldeki tüm ana ve alt kriterlerin ağırlık değerlerinin elde edilmesinden sonra modelin değerlendirilmesinde son adıma geçilmiş ve bu aşamada dört ana kriterin sıralanması amacı ile TOPSIS yönteminden faydalanılmıştır. TOPSIS yöntemi her bir alternatifi ideal çözüme göre karşılaştırmasına imkân tanımaktadır. Bu nedenle teknolojik olgunluğun ölçülmesi için TOPSIS yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir. İki yöntemin de uygulanması ile sonuçta modelin değerlendirme süreci tamamlanmıştır.

5.5.1. AHP Yaklaşımı

Oluşturulan olgunluk modelinde yer alan dört boyut ve bu boyutların altında bulunan tüm alt kriterlerin birbirlerine göre önemi AHP yöntemi ile hesaplanmıştır. Modelin değerlendirme verileri anket yöntemi ile uzman görüşlerinin alınması ile elde edilmiştir

Dolayısı ile her boyut ve alt kriteri farklı sayıda kişiler değerlendirmiştir. Dört ana boyutun birbiri ile karşılaştırılması amacı ile oluşturulan karşılaştırma matrisi çalışmaya katılan 24 uzman tarafından Ek-2’de verilmiş olan yönergeye göre doldurulmuş ve tüm karşılaştırma matrisleri Ek-3’te sunulmuştur. Ardından tüm katılımcıların doldurduğu matrislerdeki verilerin geometrik ortalaması alınarak birleştirilmiş karşılaştırma matrisi oluşturulmuştur. Alt kriterlerin birbiri ile değerlendirilmesi aşamasında ise dört ana kriteri için uzmanlık alanlarına göre farklı sayıda katılımcı değerlendirmeye katılarak karşılaştırma matrislerini doldurmuş ve yine verilerin geometrik ortalamaları alınarak birleştirilmiş karşılaştırma matrisleri elde edilmiştir. Fabrika 4.0 boyutu için oluşturulan karar matrisleri Ek-4’te, lojistik 4.0 boyutu için oluşturulan karar matrisleri Ek-5’de, yönetim 4.0 boyutu için oluşturulan karar matrisleri Ek-6’da ve operatör 4.0 boyutu için oluşturulan karar matrisleri Ek-7’de verilmiştir. Birleştirilmiş karar matrisleri oluşturulurken katılımcıların doldurduğu matrislerdeki verilerin aritmetik ortalaması değil geometrik ortalaması alınmıştır. Çünkü uzman görüşleri alındığında ve çalışmada birden fazla uzmanın değerlendirmesi kullanıldığında aritmetik ortalama yöntemi değil geometrik ortalama yöntemi kullanılmaktadır. Yapılan çalışmada da çok sayıda katılımcı olması sebebi ile birden fazla verinin geometrik ortalaması alınmıştır çünkü tüm verilerin geometrik ortalamasının tersi, her bir verinin tersinin geometrik ortalamasına eşittir.

Bir hiyerarşiyi kümelere ayırmak için öncelikle her kümede hangi öğelerin birlikte gruplandırılacağına karar verilmelidir. Bu, unsurların yerine getirdikleri işlev veya paylaştıkları özellik bakımından yakınlığı veya benzerliğine göre yapılır ve bu unsurların önceliğinin bilinmesi gerekir. Daha sonra kümeler ve alt kümeler üzerinde karşılaştırmalar yapılmalı ve daha sonra genel önceliklerin gerçek bir yansımasını elde etmek için kümeler yeniden oluşturulmalıdır. Eğer bu süreç işe yararsa, ayrıştırma sonrası sonuç, ayrıştırma olmasaydı ortaya çıkan sonuçla aynı olmalıdır(Saaty,1977) Bunu yapmanın tek yolunun sıklıkla kullanılan aritmetik ortalamanın değil, geometrik ortalamanın olduğu kanıtlanmıştır. Bireylerin önem öncelikleri farklıysa, onların yargıları (nihai sonuçları) önceliklerinin gücüne yükseltilir ve ardından geometrik ortalama oluşturulur (Saaty,2007).AHP yönteminin uygulanması aşamasında farklı adımlar takip edilmiştir. İlk olarak standart karar matrisleri (A) oluşturulmaktadır.Standart karar matrisi aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} a_{ii} = 1, a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}, a_{ij} \neq 1 \quad \#(5.1)$$

Yapılan çalışmada beş adet karşılaştırma matrisi elde edilmiştir. Bunlardan biri ana boyutların karşılaştırma matrisi iken diğer dört matris dört boyut altında bulunan alt kriterlerin değerlendirme matrisleridir. Elde edilen bu beş karşılaştırma matrisi çok sayıda uzmanın değerlendirme matrislerindeki değerlerin geometrik ortalamaları alınarak oluşturulan birleştirilmiş karşılaştırma matrisleridir. İkinci aşamada standart karar matrislerine normalleştirme işlemi yapılarak normalleştirilmiş karar matrisleri (A') elde edilmekte ve bu karşılaştırma matrislerinden faydalanarak her karar alternatifinin ağırlığı hesaplanmaktadır. Bu doğrultuda, ikili karşılaştırma matrisindeki her bir sütun değeri, bulunduğu sütun toplamına bölünerek matris normalleştirilmektedir. Normalleştirilmiş matristeki her sütunun toplam değeri 1 olmaktadır. Bu şekilde denklem 5.2'de gösterildiği üzere normalleştirme işlemi yapılmaktadır.

$$A'_{ij} = \begin{bmatrix} a'_{11} & a'_{12} & \dots & a'_{1n} \\ a'_{21} & a'_{22} & \dots & a'_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a'_{n1} & a'_{n2} & \dots & a'_{nn} \end{bmatrix} a'_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (i = 1, 2, 3 \dots n) \quad \#(5.2)$$

Aynı zamanda normalize edilmiş karar matrisinin her bir satırında yer alan değerlerin ortalamaları bulunarak öz vektörler (w) elde edilmektedir. Özvektör matrisi denklem 5.3'te verilmiştir.

$$w = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ \dots \\ w_n \end{bmatrix}, \sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad \#(5.3)$$

Bir önceki adımda elde edilen özvektör matrisi ile standart karar matrisinin çarpılması ile denklem 5.4'te görüldüğü üzere ağırlıklandırılmış ve normalize edilmiş karar matrisleri (A'') oluşturulmaktadır.

$$A'' = A \times w = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 a_{11} & w_1 a_{12} & \dots & w_1 a_{1n} \\ w_2 a_{21} & w_2 a_{22} & \dots & w_2 a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_n a_{n1} & w_n a_{n2} & \dots & w_n a_{nn} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Son aşamada tutarlılık analizini gerçekleştirmek üzere ağırlıklandırılmış karar matrisinin her bir ögesi özvektör matrisinde buna karşılık gelen ögeye bölünür. Elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınır ve denklem 5.5'te verilmiş olan $\lambda_{\max}$ ile edilir.

$$\lambda_{max} = \sum_{j=1}^n \left(\frac{(A.w)_j}{n.w_j} \right) \quad \#(5.5)$$

Denklem x yardımı ile λ_{max} değerinin bulunmasının ardından tutarlılık indeksi (CI) hesaplanmaktadır. Tutarlılık indeksinin hesaplanması için kullanılan formülasyon aşağıda verilmiştir:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \#(5.6)$$

Son adımda tutarlılık oranının bulunması için aşağıdaki verilmiş olan denklem 5.7'den yararlanılmaktadır.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \#(5.7)$$

Formülde yer alan Rastgele İndeks(RI) değerinin bulunması için, karşılaştırılan eleman sayısına bağlı olarak yer alan Çizelge 5.5'te verilmiş olan değerlerden yararlanılır.

Çizelge 5.5. Rastgele index değerleri (Saaty,1990)

Kriter Sayısı (n)	Rastgele Index Değeri (RI)
1	0,00
2	0,00
3	0,58
4	0,90
5	1,12
6	1,24
7	1,32
8	1,41
9	1,45
10	1,49
11	1,51
12	1,48
13	1,56
14	1,57
15	1,59

AHP sonucunda tutarlılık gereksinimlerinin de sağlanması ile her bir alt kriterin ağırlık değeri dahil olduğu ana boyutun ağırlık değeri ile çarpılır. Sonuç olarak her bir alt kriterin küresel ağırlığı elde edilmiş olur.

5.5.2. TOPSIS Yaklaşımı

AHP metodunun uygulanması sonucunda elde edilen final ağırlıkları ile ana kriterlerin sıralanması amacı ile TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Çünkü bu yöntemin kullanılması ile modelde bulunan dört ana boyutun ideal çözüme göre sıralanması mümkün olmaktadır. TOPSIS yöntemi uzmanların öznel yargıları kullanılmadan nesnel sayısal değerler üzerinden işlem yapan, değişkenlere ağırlık atanmasını gerektirebilen birçok kriterli karar verme tekniğidir (Özçalıcı, 2017). Dolayısı ile bu yöntemin seçilmesinin temel nedeni; pozitif ideal çözüme en yakın ve negatif ideal çözüme de en uzak sonucu vermesinden dolayı diğer basit ağırlıklara göre mantıksal bir düşünceye dayanmasıdır. Aynı zamanda karar vericilere önemli bir destek sağlamasından dolayı birçok alanda kullanılmakta ve yöntem sıralama değişiminde en iyi ve en başarılı yöntem olarak bilinmektedir (Kallo, 2015; Özdemir, 2015; Koyuncu ve Özcan, 2014).

TOPSIS yönteminin uygulanması aşamasında problemin amacına bağlı olarak farklı ölçüm ölçekleri kullanılmaktadır. Yapılan çalışmada da her bir alt kriterin endüstri 4.0 teknolojik olgunluk düzeyinin değerlendirilmesi amacı ile doğrusal bir ölçüm ölçeği (1-5 likert ölçeği) kullanılmıştır. Oluşturulan olgunluk modelinde her alt kriter bir endüstri 4.0 teknolojisini temsil etmektedir. Anketin çalışması için oluşturulan ölçek çizelge 5.6'da verilmekte olup endüstri 4.0 teknolojik olgunluk düzeyinin hesaplanabilmesi amacı ile beş farklı seviye tanımlanmıştır.

Çizelge 5.6. TOPSIS yöntemi değerlendirme seviyeleri

Olgunluk Seviyesi	Açıklama
Seviye 1	İşletmede değerlendirilen endüstri 4.0 teknolojisi ile ilgili planlama ve çalışma <i>yapılmamaktadır</i> .
Seviye 2	İşletme değerlendirilen endüstri 4.0 teknolojisi ile ilgi projelendirme aşamasında olup <i>pilot uygulama alanı için çalışmalar yapılmaktadır</i> .
Seviye 3	İşletme değerlendirilen endüstri 4.0 teknolojisi ile ilgili <i>pilot çalışmaların uygulanması aşamasında bulunmaktadır</i> .
Seviye 4	İşletme değerlendirilen endüstri 4.0 teknolojisi <i>farklı bölümlerde uygulanmaktadır</i> .
Seviye 5	İşletmede değerlendirilen endüstri 4.0 teknolojisini <i>tüm bölümlerde aktif olarak uygulamaktadır</i> .

Çizelge 5.6’da görüldüğü üzere, işletmenin mevcut olgunluk seviyesinin değerlendirilmesi için 1: en düşük skor ve 5: en yüksek skoru ifade etmektedir. Öncelikle değerlendirilmesi yapılan kriter ile ilgili fabrika içerisinde yapılan hiçbir çalışma ve plan yok ise bu durum seviye 1 olarak tanımlanmıştır. Seviye 2 ise değerlendirilen kriterin fabrika içerisinde uygulanması amacı ile planlamalar yapıldığı ve işletmenin pilot uygulama alanı seçme aşamasında olduğunu ifade etmektedir. Bu doğrultudan bakıldığında seviye 2, tanımlı kriter ile ilgili projelendirme aşamasında olduğunu yani henüz saha faaliyetine geçilmediğini göstermektedir. Seviye üç ise pilot çalışmaların yürütüldüğünü ifade etmekte olup değerlendirilen teknolojinin henüz başlangıç aşamasında olduğunu temsil etmektedir. Pilot çalışmalardan sonuç alınması ile değerlendirilen kriterin işletme içerisindeki farklı yerlerde uygulamaya alınması ise seviye 4 olarak belirlenmiştir. Seviye 4 değerlendirilmesi yapılan kriterin fabrika içerisinde çok sayıda bölümde kullanıldığını ve aktif olarak uygulanarak sonuçlandığını ifade etmektedir. Son olarak beşinci seviyede kriterin tüm alanlarda aktif olarak kullanıldığı ve sistematik bir şekilde işlediği düşünülmektedir.

Literatürde yer alan çalışmalarda da burada olduğu gibi likert ölçeğinden yararlanılmıştır. Bu çalışmanın farkı; yapılan çalışmada metinsel anket soruları bulunmamaktadır. Örneğin; firmanızın bir endüstri 4.0 teknolojisi var mı? veya büyük veri uygulamalarını kullanıyor musunuz? gibi sorular modelde yer almamaktadır. Bunun iki nedeni bulunmaktadır. İlki oluşturulan modelde her bir teknoloji ayrı kriterler olarak ele alınmış yani literatürdeki çalışmalarda olduğu gibi teknoloji kriteri altında

değerlendirilmemiştir. Bir diğeri ise değerlendirmenin tamamen sayılar üzerinden yapılmasıdır. Sayılar üzerinden değerlendirilmesinin nedeni ise, fabrikada yıl sonunda projeler belirlenirken her projenin hizmet ettiği teknoloji plan içerisinde belirtilmektedir. Örneğin projenin ana alanı makine öğrenmesi, bakım planlama veya veri görselleştirme olarak ifade edilmektedir. Dolayısı ile yıl içerisinde hangi alanda hangi teknolojiye hizmet eden kaç sayıda proje yapılmış ve hangi aşamada net olarak görülebilmektedir. Dolayısı ile buradan yola çıkarak şu anda işletmede hangi teknoloji ile ilgili pilot çalışmalar yürütülüyor? hangi teknolojiler için pilot çalışmalar olumlu sonuç verdi ve bu projeler farklı alanlarda uygulanmaya başlandı? ve son olarak hangi teknoloji işletme içerisindeki tüm alanlarda aktif olarak kullanılıyor? gibi soruların cevapları değerlendirmeyi yapan uzmanlar tarafından rahatlıkla söylenebilmektedir. Buradan yola çıkarak her bir teknolojide beş seviye için en uygun olanı değerlendiriciler tarafından belirlenmiştir.

Dört boyut altında gerçekleştirilen anket çalışmasının ardından TOPSIS yönteminin uygulama aşamalarına geçilmektedir. İlk olarak dört ana boyut altında bulunan alt kriterlerin değerlendiriciler tarafından 1 ile 5 arasında puanlanması ile elde edilen verilerin geometrik ortalaması alınarak ağırlıklandırılmış değerlendirici kararları oluşturulmuştur. Değerlendirici puanlamasının geometrik ortalaması r_{ij} ile ifade edilmektedir.

İkinci adımda pozitif ideal (S^*) ve negatif ideal (S^-) çözüm değerlerinin bulunması için denklem 5.8 ve denklem 5.9 kullanılmakta olup w_j alt kriterlerin AHP metodu ile hesaplanan küresel ağırlıklarını ifade etmektedir.

$$S^*_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2} \quad \#(5.8)$$

$$S^-_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad \#(5.9)$$

r_{ij} = Uzman değerlendirmeleri

v_{ij} = Ağırlıklandırılmış uzman değerlendirmeleri

r_j^* = 5 Pozitif ideal çözüm

r_j^- = 1 Negatif ideal çözüm

$v_j^* = r_j^* \times w_j$ Ağırlıklandırılmış pozitif ideal çözüm

$v_j^- = r_j^- \times w_j$ Ağırlıklandırılmış negatif ideal çözüm

Son aşamada olgunluk seviyelerinin belirlenmesi amacı ile yakınlık katsayısı hesaplanır. Her bir karar noktasının ideal çözüme olan göreceli yakınlığının hesaplamasında yakınlık katsayısı CC^* ile gösterilmektedir. Bu yakınlık katsayısı 0 ile 1 arasında değer almakta ve denklem 5.10'da verilen formülasyon ile hesaplanmaktadır.

$$CC^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^*} \quad \#(5.10)$$

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1. Beyaz Eşya Sektöründe Endüstri 4.0 Teknolojik Olgunluk Modelinin Uygulanması

Beyaz eşya sektörü, günümüzde teknolojik değişimin en hızlı ve en yoğun yaşandığı sektörlerin başında gelmektedir. Dolayısı ile küresel pazarda rekabet gücünü kaybetmemek ve tüketici davranışı odaklı üretim gerçekleştirmek amacı ile bu sektörde faaliyet gösteren birçok firma güncel teknolojik gelişmeleri anlık olarak takip ederek üretim sistemlerine adapte etmek için çalışmaktadır. İçerisinde bulunduğumuz hızlı gelişim ve değişim dönemine ayak uydurabilmek ve işletmelerin sistematik bir adaptasyon süreci geçirebilmesi için de mevcut durumun ilk adımda net bir şekilde ortaya konulması gerekmektedir. Bu tez çalışmasında ortaya konulan olgunluk modelinin amacı da işletmelere mevcut her bir endüstri 4.0 teknolojisi bazında durumlarını göstererek ulaşmak istedikleri hedef ile mevcut durumlarını kıyaslama imkânı sunmaktır.

Fabrika 4.0, yönetim 4.0, lojistik 4.0 ve operatör 4.0 olmak üzere 4 boyut üzerine kurulan olgunluk modelinin değerlendirmesi işletmede aktif olarak görev yapan ve dört boyutun değerlendirilmesi uzman kişiler tarafından yapılmıştır. Değerlendirmeyi yapan kişiler dijital dönüşüm faaliyetlerinde görev alan elektrik ve elektronik mühendisi, makine mühendisi, otomasyon mühendisi ve endüstri mühendisi alanlarından mezun kişilerden oluşmakta olup değerlendiriciler ile ilgili detaylı bilgi Ek-1’de verilmiştir. Modelin değerlendirme aşamasında sırasıyla AHP ve TOPSIS yöntemleri ile veriler analiz edilmiş ve dört ana boyutun olgunluk seviyeleri karşılaştırılmıştır.

6.2. AHP Metodunun Uygulanması

İşletmenin endüstri 4.0 dijital olgunluk seviyesinin belirlenmesi amacı ile ilk olarak toplam 24 katılımcı tarafından oluşturulan karşılaştırma matrisleri analiz edilmiş ve verilerin geometrik ortalamaları alınarak birleştirilmiş karar matrisleri elde edilmiştir. Karşılaştırma matrislerinin oluşturulmasının ardından sırası ile aşağıdaki adımlar izlenmiştir. AHP yönteminin ilk aşamasında modelde bulunan fabrika 4.0 (A1), lojistik 4.0 (A2), yönetim 4.0 (A3) ve operatör 4.0 (A4) boyutlarının yani ana boyutların birleştirilmiş karşılaştırma matrisi oluşturulmuş ve çizelge 6.1’de verilmiştir.

Birleştirilmiş karar matrisleri her bir boyut özelinde de oluşturulmuş olup fabrika 4.0’a ait birleştirilmiş karar matrisi Ek-8’de, lojistik 4.0’a ait birleştirilmiş karar matrisi Ek-9’da

yönetim 4.0'a ait birleştirilmiş karar matrisi Ek-10'da ve operatör 4.0 ait birleştirilmiş karar matrisi Ek-11'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Ana boyutların birleştirilmiş karar matrisi

	A1	A2	A3	A4
A1	1	1,42	0,49	2,14
A2	0,71	1	0,32	2,19
A3	2,1	3,13	1	4,69
A4	0,47	0,46	0,21	1
Toplam	4,27	6	2,03	10,01

Standart karar matrisinin oluşturulmasının ardından denklem 5.2. uygulanmış ve her bir veri sütun toplamına bölünerek normalleştirilmiş karar matrisi elde edilmiştir. Çizelge 6.2'de verilmiş olan normalize edilmiş karar matrisinin son sütununda özvektör matrisinin elemanları yer almaktadır. Fabrika 4.0'a ait normalize karar matrisi Ek-12'de, lojistik 4.0'a ait normalize karar matrisi Ek-13'te, yönetim 4.0'a ait normalize karar matrisi Ek-14'te ve operatör 4.0 ait normalize karar matrisi Ek-15'de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Ana boyutların normalize karar matrisi

	A1	A2	A3	A4	Özvektör (w)
A1	0,23	0,24	0,24	0,21	0,23
A2	0,17	0,17	0,16	0,22	0,18
A3	0,49	0,52	0,49	0,47	0,49
A4	0,11	0,08	0,11	0,10	0,10

Normalize edilmiş karar matrisinin oluşturulmasının ardından denklem 5.5'in uygulanması ile tutarlılık analizi yapılmış ve çizelge 6.3'te verilmiş olan hesaplamalar sonucunda CR değeri 0,1'in altına bulunmuştur.

Çizelge 6.3. Ana kümenin AHP tutarlılık sonuçları

n=	4	
λ_{max} =	4,03	
CI=	0,00873	
RI=	0,9	
CR=	0,01	

Tutarlılık analizi dört ana boyut için de yapılmış ve sonuçları çizelge 6.4'te verilmiştir.

Çizelge 6.4. Alt boyutlara ait AHP tutarlılık sonuçları

	Boyut	n	λ_{max}	CI	RI	CR	
A1	Fabrika 4.0	15	15,68	0,05	1,59	0,03	$\leq 0,1$
A2	Lojistik 4.0	5	5,19	0,05	1,12	0,04	$\leq 0,1$
A3	Yönetim 4.0	7	7,25	0,04	1,32	0,03	$\leq 0,1$
A4	Operatör 4.0	6	6,21	0,04	1,24	0,03	$\leq 0,1$

AHP metodunun uygulanması ile elde edilen sonuçlara dayanarak dört ana boyutun ağırlıkları sırası ile fabrika 4.0 (A1) 0,23, lojistik 4.0 (A2) 0,18, yönetim 4.0 (A3) 0,49 ve operatör 4.0 (A4) 0,10 olarak hesaplanmıştır. AHP metodunun uygulanmasının son aşamasında alt kümelerde bulunan her bir kriterin ağırlığı ile bağlı bulunduğu ana boyutun ağırlığı çarpılmıştır. Bu yöntem ile her bir alt kriterin küresel ağırlığı bulunmuş olup çizelge 6.5'te verilmiştir.

Çizelge 6.5. AHP kriterlerinin ağırlıklandırılmış değerleri

Ana Kriter Ağırlıkları			Alt Kriter Ağırlıkları			Alt Kriterlerin Küresel Ağırlıkları
A1	Fabrika 4.0	0,23	A1.1	Otomasyon	0,11	0,026
			A1.2	Büyük Veri Analitiği	0,07	0,016
			A1.3	Bulut Bilişim	0,02	0,005
			A1.4	Bakım Planlama ve Zamanlama	0,10	0,024
			A1.5	Karar Destek Sistemleri	0,05	0,011
			A1.6	Makine Öğrenmesi	0,09	0,021
			A1.7	Siber Güvenlik	0,05	0,012
			A1.8	Dijital İkiz	0,02	0,006
			A1.9	Sürdürülebilirlik	0,08	0,020
			A1.10	Eklemeli İmalat	0,02	0,004
			A1.11	Teknoloji Entegrasyonu	0,12	0,027
			A1.12	Arttırılmış Gerçeklik	0,02	0,004
			A1.13	Akıllı Ürün	0,05	0,011
			A1.14	Üretim Yönetim Sistemi	0,14	0,031
			A1.15	Makineden Makineye	0,06	0,013
A2	Lojistik 4.0	0,18	A2.1	Veri Görselleştirme	0,10	0,018
			A2.2	Uçtan Uca Görünürlük	0,20	0,037
			A2.3	Büyük Veri Analitiği	0,23	0,041
			A2.4	Yalın Lojistik	0,35	0,063
			A2.5	Depo ve Depolama	0,12	0,021
A3	Yönetim 4.0	0,49	A3.1	I4.0 Yönetim Modeli	0,20	0,100
			A3.2	İş birliği	0,05	0,025
			A3.3	I4.0 Yatırım	0,23	0,113
			A3.4	İnovasyon Stratejisi	0,10	0,049
			A3.5	Organizasyon ve Liderlik	0,06	0,030
			A3.6	Strateji 4.0	0,22	0,110
			A3.7	Yalın Üretim Sistemi	0,13	0,062
A4	Operatör 4.0	0,1	A4.1	Bilişsel Ergonomi	0,10	0,010
			A4.2	I4.0 Yatırımı	0,31	0,031
			A4.3	Operatör Becerileri	0,19	0,019
			A4.4	Organizasyonel Ergonomi	0,06	0,006
			A4.5	Fiziksel Ergonomi	0,18	0,018
			A4.6	İnsan Kaynakları 4.0	0,16	0,016
	Toplam	1,0				

AHP yönteminin uygulanması sonucunda elde edilen küresel kriter ağırlıkları hem dört ana boyut hem de ana boyutlar altında bulunan alt kriterlerin önem seviyeleri hakkında bilgi vermektedir. İlk olarak dört ana boyutun ağırlıklarını incelendiğinde; önem seviyeleri sırası ile yönetim 4.0, fabrika 4.0, lojistik 4.0 ve operatör 4.0 olmak üzere büyükten küçüğe sıralanmıştır. İşletme içerisinde yapılan değerlendirmelerde dijital dönüşümün planlı bir şekilde başlaması ve istikrarlı bir şekilde yürütülebilmesi için en önemli boyutun yönetimin desteği olduğu belirtilmiş ve sonuçlarda yönetim 4.0 en yüksek ağırlığa sahip olmuştur. Daha sonra fabrika 4.0 ve lojistik 4.0 birbirlerini takip etmektedirler. Bunun sebebi ise lojistik faaliyetlerinin iyileştirilebilmesi ve organize edilebilmesi için ilk olarak üretimin belirli standartlarda gerçekleşmesi gerektiğidir. Operatör 4.0 boyutu ise en az ağırlığa sahip olan boyut olarak görülmektedir. Genel yapıya bakıldığında, öncelikle yönetim tarafından dijitalleşme adımlarının atılması ile fabrika ve lojistik bölümlerinde dijital dönüşüm faaliyetleri başlamaktadır. Bu faaliyetlerin hız kazanması ve yaygınlaştırılması için son bileşen operatörler olacaktır. Bu açıdan bakıldığında operatör 4.0 kavramın dijital dönüşümün hızlandırıcı faktörü olarak görülmektedir.

Fabrika 4.0 boyutu altındaki kriterlere bakıldığında en yüksek ağırlığa sahip olan kriterler üretim yönetim sistemleri, teknoloji entegrasyonu, otomasyon, bakım planlama ve makine öğrenmesi olarak görülmektedir. Bu kriterlerin ortak noktası ise hepsinin birçok çok sayıda teknolojiyi aynı anda bünyelerinde barındırmalarıdır. Dolayısı ile bu kriterlerde verilmiş olan teknolojilerin uygulanması ile daha fazla katma değer elde edilmektedir. Sürdürülebilirlik ise bu teknolojilerin aktif olarak uygulanması ile gerçekleştirilebilecek bir kriterdir. Daha sonra bu kriterleri büyük veri ve makineden makineye kriterleri takip etmektedir. Bu kriterler de sürdürülebilirlikte olduğu gibi otomasyon ve teknoloji entegrasyonu gibi kriterlerin uygulanması ile devreye alınabilecektir. Akıllı ürün, siber güvenlik ve karar destek sistemleri aynı ağırlık seviyesine sahip olarak bulunmuştur. Bu kriterler ile ilgili projelendirmeler az sayıda olduğundan değerlendiriciler tarafından önem seviyesi de düşük olarak verilmiştir. En az ağırlığa sahip olan kriterler ise bulut bilişim, dijital ikiz, eklemeli imalat ve arttırılmış gerçeklik olarak bulunmuştur. Bunun sebebi ise diğer kriterlere oranla işletme içerisinde çok daha az uygulama alanına sahip olmaları ve işletmenin gelecek planlamaları içerisinde yüksek önem düzeyine sahip olmamalarıdır.

Lojistik 4.0 boyutu içerisinde en yüksek ağırlıkların yalın lojistik ve büyük veri kriterlerine ait olduğu görülmektedir. Dijital dönüşüme başlamadan önce lojistik içerisinde gerçekleşen faaliyetlerin yalınlaştırılması gerektiğinden en yüksek değer yalın lojistiğin

olmuştur. Bununla birlikte çok sayıda veri barındıran iç ve dış lojistik faaliyetleri için büyük veri teknolojisi de süreçlerin iyileştirilmesi ve takibi için sıklıkla kullanılmaktadır. Büyük veri teknolojisinin aktif olarak kullanılması ile devreye alınabilecek bir diğer teknoloji ise uçtan uca görünürlük olup büyük veriden sonra en yüksek ağırlığa sahip olan kriterdir. Depo ve depolama ile veri görselleştirme alt kriterleri ise ağırlık olarak bu üç kriterden sonra gelmektedir. Genel olarak lojistik 4.0 boyutunda öncelikle yalınlaştırma ve veri toplama faaliyetlerine öncelik verilmiştir.

Yönetim 4.0 boyutu için en yüksek ağırlığa sahip olan kriterler I4.0 yatırım, strateji 4.0 ve I4.0 yönetim modeli olarak belirlenmiştir. Bir işletmenin dijital dönüşüm sürecini sağlam temeller üzerine kurması için gerekli olan bu üç kavram yapılan çalışmada da değerlendiriciler tarafından yüksek öneme sahip olarak puanlanmıştır. Yalın üretim sistemi ise dijitalleşme faaliyetleri öncesinde yürütülmesi gereken bir süreç olduğundan lojistik 4.0 boyutunda olduğu gibi burada da önemli bir alt kriter olarak görülmektedir. En az ağırlığa sahip olan alt kriterler ise inovasyon, organizasyon ve liderlik ve iş birliği olarak görülmektedir. Bu alt kriterlerin diğer yönetim 4.0 alt kriterlerine oranla daha az ağırlığa sahip olmasının nedeni uygulanması zaman alan uygulamalar olmasıdır.

Operatör 4.0 ana boyutunda da en yüksek ağırlığa sahip olan alt kriter I4.0 yatırım olarak görülmektedir. Yatırım planlaması üretim ve yönetim süreçlerinin başlangıcını temsil ettiğinden dolayı yüksek önem düzeyine sahiptir. Daha sonra sırası ile operatör becerileri, fiziksel ergonomi ve insan kaynakları 4.0 alt kriterleri gelmektedir. Bu üç kriterin ortak noktası ise çalışan konforu ve yetenek yönetimi üzerine yoğunlaşmasıdır. İnsan kaynağına yapılacak yatırımın belirlenmesinin ardından bu yatırım hem yeni yeteneklerin işe alımında hem de mevcut çalışanların gelişimi ve güvenliği için değerlendirilecektir. Son olarak bilişsel ergonomi ve organizasyonel ergonomi alt kriterlerinin küresel ağırlıklarının daha az çıkması işletmenin bu konularda daha yavaş aksiyon almasından kaynaklanmaktadır. Operatör 4.0 boyutu değerlendirilirken çalışanların yetenek gelişimine ve güvenliğine daha fazla ağırlık verilmiştir.

6.3. TOPSIS Metodunun Uygulanması

TOPSIS metodunun ilk aşamasında Ek-16'da verilmiş olan TOPSIS değerlendirme anketi ile elde edilmiş olan sonuçlar analiz edilmektedir. Bu aşamada modelde yer alan dört ana boyut içerisinde yer alan endüstri 4.0 teknolojilerinin teknolojik olgunluk seviyelerinin değerlendirilmesi amacı ile 1-5 arasında puanlamaya sahip anket çalışması yapılmıştır. Dört

ana boyutun anket çalışmasına farklı sayıda kişiler katılmış olup bu anketlerdeki değerlerin geometrik ortalaması alınarak TOPSIS adımlarının uygulanmasına devam edilmiştir. İlk olarak Fabrika 4.0 (A1) boyutuna ait anket çalışmasına yedi kişi, lojistik 4.0 (A2) boyutuna ait anket çalışmasına 6 kişi, yönetim 4.0 (A3) boyutuna ait anket çalışmasına beş kişi ve son olarak operatör 4.0 (A4) boyutuna ait anket çalışmasına 6 kişi katılmıştır. Fabrika 4.0 boyutuna ilişkin uzman değerlendirmeleri Ek-17’de, lojistik 4.0 boyutuna ait uzman değerlendirmeleri Ek-18’de yönetim 4.0 boyutuna ait uzman değerlendirmeleri Ek-19’de ve operatör 4.0 boyutuna ait uzman değerlendirmeleri Ek-20’de verilmiştir. Katılımcıların ankette kullandıkları puanların geometrik ortalamalarının alınması ile dört ana boyut için çizelge 6.6, çizelge 6.7, çizelge 6.8 ve çizelge 6.9’de alt kriterlere ilişkin uzman görüşleri verilmiştir.

Çizelge 6.6. A1 boyutu alt kriterlerine ait uzman görüşleri

Alt Kriterler		Değerlendiricilerin Alt Kriterlere İlişkin Yargıları
A1.1	Otomasyon	3,54
A1.2	Büyük Veri Analitiği	3,50
A1.3	Bulut Bilişim	4,54
A1.4	Bakım Planlama ve Zamanlama	4,26
A1.5	Karar Destek Sistemleri	3,13
A1.6	Makine Öğrenmesi	3,54
A1.7	Siber Güvenlik	4,13
A1.8	Dijital İkiz	2,12
A1.9	Sürdürülebilirlik	3,54
A1.10	Eklemeli İmalat	2,00
A1.11	Teknoloji Entegrasyonu	3,54
A1.12	Arttırılmış Gerçeklik	2,25
A1.13	Akıllı Ürün	3,39
A1.14	Üretim Yönetim Sistemi	3,39
A1.15	Makineden Makineye	2,38

Çizelge 6.7. A2 boyutu alt kriterlerine ait uzman görüşleri

Alt Kriterler		Değerlendiricilerin Alt Kriterlere İlişkin Yargıları
A2.1	Veri Görselleştirme	3,81
A2.2	Uçtan Uca Görünürlük	3,46
A2.3	Büyük Veri Analitiği	3,30
A2.4	Yalın Lojistik	3,63
A2.5	Depo ve Depolama	3,30

Çizelge 6.8. A3 boyutu alt kriterlerine ait uzman görüşleri

Alt Kriterler		Değerlendiricilerin Alt Kriterlere İlişkin Yargıları
A3.1	I4.0 Yönetim Modeli	4,18
A3.2	İş birliği	3,57
A3.3	I4.0 Yatırım	5,00
A3.4	İnovasyon Stratejisi	4,57
A3.5	Organizasyon ve Liderlik	4,18
A3.6	Strateji 4.0	4,37
A3.7	Yalın Üretim Sistemi	3,37

Çizelge 6.9. A4 boyutu alt kriterlerine ait uzman görüşleri

Alt Kriterler		Değerlendiricilerin Alt Kriterlere İlişkin Yargıları
A4.1	Bilişsel Ergonomi	2,45
A4.2	I4.0 Yatırımı	4,15
A4.3	Operatör Becerileri	3,15
A4.4	Organizasyonel Ergonomi	2,62
A4.5	Fiziksel Ergonomi	3,30
A4.6	İnsan Kaynakları 4.0	3,46

Her bir boyuta ait uzman görüşlerinin hesaplanmasının ardından her alt kriter kendi küresel ağırlığı ile çarpılarak kriterlerin ağırlıklı uzman değerlendirmeleri elde edilmiştir. Dört ana boyut için hesaplanan ağırlıklı uzman değerlendirmeleri çizelge 6.10, çizelge 6.11, çizelge 6.12 ve çizelge 6.13'te verilmiştir.

Çizelge 6.10. A1 boyutu kriterlerine ait ağırlıklı uzman görüşleri

Alt Kriterler		Alt Kriterlerin Ağırlıklı Uzman Değerlendirmeleri
A1.1	Otomasyon	0,09
A1.2	Büyük Veri Analitiği	0,06
A1.3	Bulut Bilişim	0,02
A1.4	Bakım Planlama ve Zamanlama	0,10
A1.5	Karar Destek Sistemleri	0,03
A1.6	Makine Öğrenmesi	0,07
A1.7	Siber Güvenlik	0,05
A1.8	Dijital İkiz	0,01
A1.9	Sürdürülebilirlik	0,07
A1.10	Eklemeli İmalat	0,01
A1.11	Teknoloji Entegrasyonu	0,09
A1.12	Arttırılmış Gerçeklik	0,01
A1.13	Akıllı Ürün	0,04
A1.14	Üretim Yönetim Sistemi	0,11
A1.15	Makineden Makineye	0,03

Çizelge 6.11. A2 boyutu kriterlerine ait ağırlıklı uzman görüşleri

Alt Kriterler		Alt Kriterlerin Ağırlıklı Uzman Değerlendirmeleri
A2.1	Veri Görselleştirme	0,76
A2.2	Uçtan Uca Görünürlük	0,14
A2.3	Büyük Veri Analitiği	0,13
A2.4	Yalın Lojistik	0,22
A2.5	Depo ve Depolama	0,07

Çizelge 6.12. A3 boyutu kriterlerine ait ağırlıklı uzman görüşleri

Alt Kriterler	Alt Kriterlerin Ağırlıklı Uzman Değerlendirmeleri
A3.1 I4.0 Yönetim Modeli	0,42
A3.2 İş birliği	0,07
A3.3 I4.0 Yatırım	0,55
A3.4 İnovasyon Stratejisi	0,23
A3.5 Organizasyon ve Liderlik	0,13
A3.6 Strateji 4.0	0,48
A3.7 Yalın Üretim Sistemi	0,20

Çizelge 6.13. A4 boyutu kriterlerine ait ağırlıklı uzman görüşleri

Alt Kriterler	Alt Kriterlerin Ağırlıklı Uzman Değerlendirmeleri
A4.1 Bilişsel Ergonomi	0,02
A4.2 I4.0 Yatırımı	0,12
A4.3 Operatör Becerileri	0,06
A4.4 Organizasyonel Ergonomi	0,03
A4.5 Fiziksel Ergonomi	0,07
A4.6 İnsan Kaynakları 4.0	0,07

Ağırlıklı uzman görüşlerinin belirlenmesinin ardından ideal çözüme göre yakınlık katsayılarını hesaplayabilmek için öncelikle pozitif ideal ve negatif ideal çözüm değerlerine olan uzaklıkların hesaplanması gerekmektedir. Üçüncü aşamada alt kriterlerin ağırlıklandırılmış pozitif ideal ve negatif ideal puanlarını belirlemek için çizelge 6.14'te verilmiş olan pozitif ve negatif ideal puanlar kullanılmıştır.

Çizelge 6.14. Alt kriterlerin pozitif ideal ve negatif ideal puanları

Alt Kriterler		Pozitif İdeal	Negatif İdeal
A1.1	Otomasyon	5	1
A1.2	Büyük Veri Analitiği	5	1
A1.3	Bulut Bilişim	5	1
A1.4	Bakım Planlama ve Zamanlama	5	1
A1.5	Karar Destek Sistemleri	5	1
A1.6	Makine Öğrenmesi	5	1
A1.7	Siber Güvenlik	5	1
A1.8	Dijital İkiz	5	1
A1.9	Sürdürülebilirlik	5	1
A1.10	Eklemeli İmalat	5	1
A1.11	Teknoloji Entegrasyonu	5	1
A1.12	Arttırılmış Gerçeklik	5	1
A1.13	Akıllı Ürün	5	1
A1.14	Üretim Yönetim Sistemi	5	1
A1.15	Makineden Makineye	5	1
A2.1	Veri Görselleştirme	5	1
A2.2	Uçtan Uca Görünürlük	5	1
A2.3	Büyük Veri Analitiği	5	1
A2.4	Yalın Lojistik	5	1
A2.5	Depo ve Depolama	5	1
A3.1	I4.0 Yönetim Modeli	5	1
A3.2	İş birliği	5	1
A3.3	I4.0 Yatırım	5	1
A3.4	İnovasyon Stratejisi	5	1
A3.5	Organizasyon ve Liderlik	5	1
A3.6	Strateji 4.0	5	1
A3.7	Yalın Üretim Sistemi	5	1
A4.1	Bilişsel Ergonomi	5	1
A4.2	I4.0 Yatırımı	5	1
A4.3	Operatör Becerileri	5	1
A4.4	Organizasyonel Ergonomi	5	1
A4.5	Fiziksel Ergonomi	5	1
A4.6	İnsan Kaynakları 4.0	5	1

Alt kriterlerin pozitif ideal ve negatif ideal puanlarının belirlenmesinin ardından her bir kriterin pozitif ve negatif ideal puanları ile küresel ağırlıkları çarpılarak ağırlıklandırılmış pozitif ve negatif ideal puanları hesaplanmış ve çizelge 6.15'te verilmiştir.

Çizelge 6.15. Alt kriterlerin ağırlıklandırılmış pozitif ideal ve negatif ideal puanları

Alt Kriterler		Ağırlıklandırılmış Pozitif İdeal	Ağırlıklandırılmış Negatif İdeal
A1.1	Otomasyon	0,132	0,026
A1.2	Büyük Veri Analitiği	0,082	0,016
A1.3	Bulut Bilişim	0,026	0,005
A1.4	Bakım Planlama ve Zamanlama	0,120	0,024
A1.5	Karar Destek Sistemleri	0,052	0,010
A1.6	Makine Öğrenmesi	0,104	0,021
A1.7	Siber Güvenlik	0,061	0,012
A1.8	Dijital İkiz	0,029	0,006
A1.9	Sürdürülebilirlik	0,098	0,020
A1.10	Eklemeli İmalat	0,021	0,004
A1.11	Teknoloji Entegrasyonu	0,134	0,027
A1.12	Arttırılmış Gerçeklik	0,019	0,004
A1.13	Akıllı Ürün	0,053	0,011
A1.14	Üretim Yönetim Sistemi	0,157	0,031
A1.15	Makineden Makineye	0,064	0,013
A2.1	Veri Görselleştirme	0,10	0,018
A2.2	Uçtan Uca Görünürlük	0,20	0,037
A2.3	Büyük Veri Analitiği	0,20	0,041
A2.4	Yalın Lojistik	0,32	0,063
A2.5	Depo ve Depolama	0,11	0,021
A3.1	I4.0 Yönetim Modeli	0,50	0,10
A3.2	İş birliği	0,10	0,02
A3.3	I4.0 Yatırım	0,55	0,11
A3.4	İnovasyon Stratejisi	0,25	0,05
A3.5	Organizasyon ve Liderlik	0,15	0,03
A3.6	Strateji 4.0	0,55	0,11
A3.7	Yalın Üretim Sistemi	0,30	0,06
A4.1	Bilişsel Ergonomi	0,05	0,01
A4.2	I4.0 Yatırımı	0,15	0,03
A4.3	Operatör Becerileri	0,10	0,02
A4.4	Organizasyonel Ergonomi	0,05	0,01
A4.5	Fiziksel Ergonomi	0,10	0,02
A4.6	İnsan Kaynakları 4.0	0,10	0,02

Dört ana boyutun olgunluk seviyesi belirlenmek amacı denklem 5.8 ile denklem 5.9 kullanılarak bu kümelerin pozitif ideal çözüme uzaklığı (S^*) ve negatif ideal çözüme uzaklığı (S^-) hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar 6.16'da verilmiştir.

Çizelge 6.16. Alt kriterlerin pozitif ideal ve negatif ideal çözümlere uzaklığı

Ana Kriterler	Pozitif İdeal Çözüme Uzaklık	Negatif İdeal Çözüme Uzaklık
A1 Fabrika 4.0	0,106	0,176
A2 Lojistik 4.0	0,674	0,761
A3 Yönetim 4.0	0,151	0,705
A4 Operatör 4.0	0,0748	0,123

Son olarak pozitif ve negatif çözümlere olan uzaklıkların ölçülmesinden sonra denklem 5.10'un uygulanması ile dört ana boyut için hesaplanan yakınlık katsayıları yani endüstri 4.0 teknolojik olgunluk seviyeleri çizelge 6.17'da verilmiştir.

Çizelge 6.17. Endüstri 4.0 teknolojik olgunluk seviyeleri

Ana Kriterler	Endüstri 4.0 Teknolojik Olgunluk Seviyesi
A1 Fabrika 4.0	0,624
A2 Lojistik 4.0	0,530
A3 Yönetim 4.0	0,824
A4 Operatör 4.0	0,622

AHP ve TOPSIS metotlarının uygulanması ile elde edilen sonuçlara bakıldığında dört boyutun olgunluk seviyeleri büyükten küçüğe sırası ile yönetim 4.0, fabrika 4.0, lojistik 4.0 ve operatör 4.0 olarak belirlenmiştir. TOPSIS yönteminin uygulanması ile elde edilen bu sıralama ile AHP yöntemi sonucunda elde edilen ana boyutların ağırlıklarının sıralanması ile aynıdır. Dolayısı ile değerlendiriciler tarafından önem seviyesi yüksek olarak belirlenen boyutların olgunluk seviyeleri de aynı oranda yüksek çıkmıştır. Çıkan bu sonuç işletme için bir olumlu olarak değerlendirilmektedir. Modelde en yüksek olgunluk seviyesine sahip olan boyutun yönetim 4.0 olduğu görülmektedir. Yönetim 4.0 aynı zamanda AHP yönteminin uygulanması ile en yüksek ağırlığa sahip olan boyut olarak bulunmuştu. Buradan yola çıkarak dijital dönüşüm sürecinde en çok önem verilen boyutun en yüksek olgunluğa sahip olduğunu söyleyebiliriz. Aynı zamanda yönetim 4.0'ın ilk sırada yer alması işletmedeki dijitalleşme sürecinin gelişimi açısından önemlidir. Yönetimin hem üretime hem de çalışanlara yatırım yapma konusundaki istekliliği ve yol haritasındaki planlı ilerlemesi, endüstri 4.0 sürecinde emin adımlarla ilerlediğini göstermektedir. Fabrika 4.0 boyutu ise içerisinde çok fazla alt kriter bulundurmasına rağmen bu kriterlerde yer alan teknolojilerin planlı ve istikrarlı bir şekilde uygulanmasına bağlı olarak ikinci sırada yer almaktadır. Lojistik 4.0'ın kapsadığı alt

kriterlerin uygulamaya alınabilmesi için fabrika 4.0 teknolojilerinin büyük ölçüde uygulanabiliyor olması gerekmektedir. Dolayısı ile lojistik 4.0 boyutu sıralamada üçüncü sırada yer almakta ve alt kriterlerinde yer alan teknolojilerin uygulanmaya alınması daha fazla zaman gerektirmektedir. Son sırada ise operatör 4.0 boyutu yer almaktadır. Bunun temel sebebinin hızla gelişen teknolojiye çalışanların adaptasyon ve eğitim süreçlerinin daha uzun sürmesi olduğu düşünülmektedir. Dördüncü sanayi devrimi ile işletmelerde çalışan sayısının azalacağı düşünülse de günümüz koşullarında belli bir eğitim düzeyine sahip nitelikli insanlara olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Dolayısı ile bu açıdan bakıldığında operatör 4.0 geliştirilmeye en fazla ihtiyaç duyulan bölümü oluşturmaktadır.



7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, beyaz eşya sektöründe faaliyet gösteren ve beş farklı ürün özelinde üretim gerçekleştiren bir işletmenin endüstri 4.0 dijital olgunluk seviyesinin belirlenmesi ve ortaya çıkan sonuç doğrultusunda dijital dönüşüm için bir yol haritası oluşturulması amacı ile gerçekleştirilmiştir. Öncelikli olarak literatürde yer alan mevcut olgunluk modelleri incelenmiş ve farklı endüstrilerde kullanılan kriterler toplanarak analiz edilmiştir. Modelde kullanılan dört boyut Çınar vd. (2021)'in çalışması ve işletme dinamikleri birlikte değerlendirilerek belirlenmiş olup fabrika 4.0, lojistik 4.0, yönetim 4.0 ve operatör 4.0 olarak seçilmiştir. Olgunluk modelini oluştururken bu modelin seçilmiş olmasının sebebi uygulamanın gerçekleştirileceği fabrikanın teknoloji entegrasyonunu departmanlar özelinde ayırarak projelendirmiş olmasıdır. Bunun yanı sıra fabrika 4.0 ve lojistik 4.0 çoğunlukla yeni nesil teknolojilerin bu alanlar içerisindeki süreçlere entegrasyonunu değerlendirmek için kullanılmakta olup yönetim 4.0 ve operatör 4.0 boyutları daha çok kuramsal ve teorik kriterler içererek yönetimin ve çalışanların dijital dönüşüm sürecine uyum sağlama ve destek verme düzeyini ortaya çıkarabilmek için önem arz etmektedir.

Modelini içerdiği dört boyutun kararlaştırılması ile birlikte her bir boyut altında değerlendirilecek alt kriterlerin seçim işlemi literatürde yapılan çalışmaların yanı sıra, işletmede aktif olarak görev yapmakta olan uzmanlar tarafından gerçekleştirilmiştir. Kriterlerin seçim aşamasından önce literatürde yer alan olgunluk modeli çalışmalarında kullanılan ana ve alt kriterler tüm değerlendiriciler tarafından incelenmiş ve modelde yer alacak kriterler işletmenin dinamiklerine ve yönetim süreçlerine uygun olarak seçilmiştir. Modelin ana hatları belirlendikten sonra değerlendirme yöntemi olarak iki aşamalı bir süreç belirlenmiştir. Literatürde de sıklıkla kullanılan çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP ve TOPSIS'in bütünleşik kullanımı çalışmada tercih edilmiştir. Değerlendirme aşamasında kullanılacak olan verilerin toplanması iki ayrı anket yardımı ile gerçekleştirilmiştir. İlk olarak AHP yöntemi için gerekli olan karşılaştırma matrislerinin oluşturulması için bir çalışma yapılmış ve değerlendiricilerden matrisleri doldurmaları istenmiştir. Diğer aşamada ise her ana boyut altında yer alan alt kriterlerin olgunluk seviyesi değerlendiriciler tarafından 1 ile 5 arasında puanlanmış ve TOPSIS yönteminde kullanılmak üzere hazırlanmıştır. Öncelikle AHP metodu ile ana boyutların ve içerdikleri alt kriterlerin küresel ağırlıkları belirlenmiş ardından TOPSIS metodu ile dört ana boyutun (fabrika 4.0, lojistik 4.0, yönetim 4.0 ve operatör 4.0) olgunluk seviyeleri hesaplanmıştır. Modelin sonuçları incelendiğinde en yüksek olgunluk

seviyesine sahip boyutlar sırasıyla yönetim 4.0, fabrika 4.0, lojistik 4.0 ve operatör 4.0 olarak belirlenmiştir.

Yönetim 4.0 boyutunun en yüksek olgunluğa sahip olması dijital dönüşüm sürecinde üst yönetimin ve yönetici konumunda çalışan kişilerin süreci sahiplendiğini ve bunun diğer çalışanlar tarafından kavrandığını ifade etmektedir. Dolayısı ile sürdürülebilir bir dijital dönüşüm planı oluşturmak için gerekli olan alt kriterleri içeren yönetim 4.0 boyutunun en yüksek skora sahip olması işletme açısından büyük bir avantaj olarak görülmektedir. Sıralamada ikinci olarak yer alan fabrika 4.0 boyutu ise birçok teknolojiyi bünyesinde barındırmakta olup dijitalleşme faaliyetlerinin en yoğun olarak gerçekleştirildiği alanı temsil etmektedir. İçerdiği alt kriterlerin genel ortalamasına bakıldığında ise endüstri 4.0 teknolojilerinin genellikle pilot çalışma ve üstü seviyede konumlandığı görülmektedir. Bir işletmenin endüstri 4.0 yolculuğunda elde ettiği başarıya en çok etki eden teknoloji ve kavramlar fabrika 4.0 boyutu altında yer aldığından olgunluk sıralamasında ikinci olarak yer alması yönetim 4.0 boyutu altında değerlendirilen strateji alt kriterinin de aktif bir şekilde uygulandığını göstermektedir.

Olgunluk sıralamasında üçüncü sırada yer alan lojistik 4.0 boyutu ise dijital dönüşüm faaliyetlerinin lojistik departmanında hangi seviyede yürütüldüğünü ifade etmektedir. Lojistik 4.0'ın fabrika 4.0'ın alt sırasında yer almasının sebebi ise lojistik bölümü içerisinde gerçekleştirilecek olan çalışmaların fabrika içerisindeki çalışmalar ile bağlantılı olmasından kaynaklanmaktadır. Örneğin iç ve dış lojistikte uçtan uca görünürlük sağlamak isteniyorsa bunun için üretilen ürünün fabrika içerisinden başlayarak barkodlar yardımı ile takip edilmesi gerekmektedir. Dolayısı ile projeler fabrika ile bağlantılı ilerlemek durumundadır. Son olarak operatör 4.0'a bakıldığında olgunluk sıralamasında son sırada yer almaktadır. Bunun sebebi ise önceliğin teknoloji entegrasyonunu sağlamak amacı ile fabrika ve lojistik bölümlerine verilmesidir. Çalışanların eğitime geçilmeden önce dijitalleşme faaliyetlerinin belirli yol kat etmesi gerekmektedir. İşletme içerisindeki dijital dönüşüm hız kazanması ile birlikte operatör 4.0 boyutu altında bulunan alt kriterlerin olgunluk seviyesi de giderek artacaktır. Çünkü fabrika ve lojistik bölümlerinde uygulanmaya başlanan projelerin devamlılığın sağlanması ve ilerleyen dönemlerde geliştirilmesinde en büyük sorumluluk çalışanlara düşmektedir. Bu doğrultudan bakıldığında gün geçtikçe nitelikli insan gücüne olan ihtiyaç artacak ve operatör 4.0 boyutu altında konumlandırılan alt kriterlerin uygulanma seviyesi artacaktır.

Tüm bu sonuçlar dikkate alındığında değerlendirilen firma sektörel bazda oldukça iyi bir konumda bulunmakta ve birçok teknolojinin uygulanmasına öncülük etmektedir. Modelin çıktıları da uzman görüşleri ile uyumludur ve mevcut durumun analizi için iyi bir gösterge oluşturmaktadır. Dört ana alanın puan sıralamasına bakıldığında yönetimin en yüksek puana sahip olması sürecin temelini sağlam olduğunu göstermektedir.

Yapılan çalışmanın içerdiği dört farklı boyut ve altında yer alan kriterler ile daha sonraki çalışmalara yol gösterici olması amaçlanmaktadır. Hem endüstri 4.0 teknolojilerinin hem de teorik kriterlerin birleşimi ile oluşturulmuş model literatürde bu yönleri ile farklılık yaratmaktadır. Bunun yanı sıra beyaz eşya sektöründe uygulaması gerçekleştirilen model bu açıdan da sektöre farklı bir bakış açısı kazandırmıştır. Oluşturulan modelin farklı sektörlerde kullanılmasında kısıtlayıcı etkenler bulunmamaktadır. Modelde bulunan dört ana boyut ve altında bulunan alt kriterler uygulamanın yapılacağı işletmenin dinamiklerine ve dijitalleşme seviyesine göre revize edilebilmektedir. Sonuç olarak farklı işletme dinamikleri özelinde tekrar dizayn edilip uygulanması ile oluşturulan modelin şirketlere mevcut dijital dönüşüm süreçlerini analiz etme ve gelecekte sahip olmak istedikleri konum ile kıyaslama imkânı sunmaktadır. Bu sayede uygulandığı takdirde birçok işletmeye günümüzde karşı karşıya kaldığı hızlı değişim ve gelişim sürecinde iyi bir yol haritasına sahip olma imkânı verecektir.

Uygulamanın gerçekleştirildiği işletmenin gizlilik politikası gereği modelde bulunan endüstri 4.0 teknolojilerinin uygulama alanları ve teknik detayları hakkında detaylı bilgi verilememiş olup bu çalışmanın kısıtlayıcı yanını oluşturmaktadır. Bununla birlikte modelde analiz yöntemi olarak AHP ve TOPSIS yöntemleri bütünleşik olarak kullanılmıştır. Gelecek çalışmalarda olgunluk modelleri uygulanırken hem modelin alt kriterlerine ait teknik detayların proje bazlı olarak açıklanması hem de farklı değerlendirme yöntemleri kullanılması ile süreçler işletme dinamiklerine göre tasarlanabilir.

KAYNAKLAR

- Akben, İ. ve Avşar, İ.İ. (2018). Endüstri 4.0 ve karanlık üretim: genel bir bakış. *Türk Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi*, 3(1), 26-37.
- Aracıoğlu, B. (2010). Üretim / işlemler yönetimi alanında yaşanan paradigmat değişimler kapsamında sürdürülebilir üretim. *Ege Akademik Bakış*, 10(1), 141-156.
- Arkan, Ö. (2018). *Endüstri 4.0 kavramı ve endüstri 4.0 dönüşümünün üretim maliyetlerine etkisi üzerine bir vaka çalışması: bebek bezi üretimi* (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Arel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Akdil, K.Y., Üstündağ, A. and Çevikcan, E. (2018). Maturity and Readiness Model for Industry 4.0 Strategy. *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation* (1st ed.) (61-94). Switzerland: Springer International Publishing.
- Ataman, A. (2018). *Savunma sanayinde endüstri 4.0 olgunluk parametrelerinin tereddütlü bulanık AHP yöntemi ile önceliklendirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi), Bahçeşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Asdecker, B. and Felch, V. (2018). Development of an industry 4.0 maturity model for the delivery process in supply chains. *Journal of Modelling in Management*, 13 (4), 840- 883.
- Bağcı, E. (2018). Endüstri 4.0: Yeni üretim tarzını anlamak. *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Elektronik Dergisi*, 9(24), 122-146.
- Baki, B. and Serdar, D. (2020). Sanayi 4.0 olgunluk modeli uygulamaları üzerine literatür incelemesi. *Kafkas Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 11(22), 766-787.
- Bibby, L. and Dehe, B. (2018). The management of operations defining and assessing industry 4.0 maturity levels-case of the defence sector. *Production Planning and Control*, 29(12), 1030-1043.
- Comuzzi, M. and Patel, A. (2016). How organisations leverage big data: A maturity model. *Industrial Management & Data Systems*, 116(8), 1468-1492.
- Chonsawat, N. and Sopadang, A. (2019, March 5-7). *The development of the maturity model to evaluate the smart smes 4.0 readiness*. Paper presented at the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Bangkok, Thailand. Erişim adresi: <http://www.ieomsociety.org/ieom2019/papers/97.pdf>
- Carvalho, N., Chaim, O., Cazarini, E. and Gerolamo, M. (2018). Manufacturing in the fourth industrial revolution: A positive prospect in sustainable manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 21, 671-678.
- Çınar, M.Z., Zeeshan, Q. and Korhan, O. (2021). A Framework for industry 4.0 readiness and maturity of smart manufacturing enterprises: a case study. *Sustainability*, 13(12), 1-32.
- Çiray, Ü. (2019). *Küçük ve orta ölçek imalat firmalarında olgunluk modeli: beyaz eşya sektöründe bir uygulama* (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Durgut, A. (2019). *Plastik parça imalat sanayinde endüstri 4.0 uygulamaları* (Yüksek Lisans Tezi), Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Elibal, K. ve Özceylan, E. (2022). Comparing industry 4.0 maturity models in the perspective of TQM principles using Fuzzy MCDM methods. *Technological Forecasting & Social Change*, 175, 1-16.
- Elnagar, S., Weistroffer, H. and Thomas, M. (2019, October 4-5). *Agile requirement engineering maturity framework for industry 4.0*. Paper presented at the Fifteenth European, Mediterranean, and Middle Eastern Conference, Limassol, Cyprus. Erişim adresi https://www.researchgate.net/publication/330334077_Agile_Requirement_Engineering_Maturity_Framework_for_Industry_40_15th_European_Mediterranean_and_Middle_Eastern_Conference EMCIS_2018_Limassol_Cyprus_October_4-5_2018_Proceedings
- Gökalp, E., Şener, U. and Eren, P.E. (2017, October 4-5). *Development of an assessment model for industry 4.0: industry 4.0-mm*. Paper presented at the Seventeenth International Conference on Software Process Improvement and Capability Determination, Palma de Mallorca, Spain. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.csi.2017.03.004>
- Ganzarain, J. and Errasti, N. (2016). Three stage maturity model in sme's toward industry 4.0. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 9(5), 1119-1128.
- Hu, J. and Gao, S. (2019), Research and application of capability maturity model for chinese intelligent manufacturing. *Procedia CIRP*, 83, 794-799.
- Hamidi, S.R., Aziz, A.A., Shuhidan, S.M., Aziz, A.A. and Mokhsin, M. (2018, March 19-22). *SMEs maturity model assessment of RI4. 0 digital transformation*. Paper presented at the Seventh International Conference on Kansei Engineering and Emotion Research, Kuching, Malaysia. Erişim adresi: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-8612-0_75
- Häberer, S., Lau L.K. and Behrendt, F. (2017, October 11-13). *Development of an industrie 4.0 maturity index for small and medium-sized enterprises*. Paper presented at the Seventh International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, Saarbrücken, Germany. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/publication/320415942_Development_of_an_Industrie_40_Maturity_Index_for_Small_and_Medium-Sized_Enterprises
- Jæger, B. and Halse, L. L. (2017, September 3-7). *The Iot technological maturity assessment scorecard: a case study of norwegian manufacturing companies*. Paper presented at the IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems, Hamburg, Germany. Erişim adresi: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-66923-6_17
- Kiraz, A., Canpolat, O., Erkan, F.E. ve Uygun, Ö. (2019). Impuls kriterleri ile endüstri 4.0 eğiliminin değerlendirilmesi: bir bulanık bilişsel harita uygulaması. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 7(1), 14-23.
- Keskin, F.D., İ. Kabasakal, İ., Kaymaz, Y. ve Soyuer, H. (2019, August 28-30). *An assessment model for organizational adoption of industry 4.0 based on multi-criteria decision techniques*. Paper presented at the International Symposium for Production Research, Vienna, Austria. Erişim adresi: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-92267-6_7

- Koyuncu,C.(2019). *Endüstri 4.0 Mevcut Durum Analizi ve Benzetim Uygulamalı Geçiş Metodolojisi* (Yüksek Lisans Tezi), Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Kolla, S., Minoufekar, M. ve Plapper, P. (2019). Deriving essential components of lean and industry 4.0 assessment model for manufacturing SMEs. *Procedia CIRP*, 81, 753–758.
- Kaltenbach, F., Marber, P., Gosemann, C., Bolts, T. ve Kuhn, A. (2018, June 17-20). *Smart services maturity level in Germany*. Paper presented at the 2018 IEEE International Conference of Engineering, Technology Innovation, Stuttgart, Germany. Erişim adresi: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8436329>
- Klötzer, C. ve Pflaum, A. (2017, January 4-7). *Toward the development of a maturity model for digitalization within the manufacturing industry's supply chain*. Paper presented at the Hawaii International Conference on System Sciences, Big Island, United States. Erişim adresi: <https://scholarspace.manoa.hawaii.edu/items/a2c2e302-07e8-4b68-bc62-b52b832efe11>
- Lichtblau, K., Stich, V., Bertenrath, R., Blum, M., Bleider, M., Millack, A., Schmitt, K., Schmitz, E. ve Schröter, M. (2015). IMPULS - Industrie 4.0- Readiness. 20 Ocak 2022, Erişim adresi: <https://www.industrie40-readiness.de/?lang=en>
- Mittal, S., Khan, M.A., Romero, D. ve Wuest, T. (2018). A critical review of smart manufacturing & industry 4.0 maturity models: implications for small and medium-sized enterprises (SMEs). *Journal of Manufacturing Systems*, 49, 194-214.
- Methavitakul, B. and Santiteerakul, S. (2018, July 31- August 2), *Analysis of key dimension and subdimension for supply chain of industry to fourth industry*. Paper presented at the International Conference on Service Operations and Logistics and Informatics, Singapore, Singapore. Erişim adresi: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8476765>
- Oktay, U. (2021). *Türk savunma sanayisi için endüstri 4.0 olgunluk modeli geliştirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Sakarya.
- PricewaterhouseCoopers. (2016). The Industry 4.0/Digital Operations Self-Assessment. Erişim adresi: <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf>
- Pessl, E., Sorko, S.R. and Mayer, B. (2017). Roadmap industry 4.0 – implementation guideline for enterprises. *International Journal of Science, Technology and Society*, 5(6), 193-202.
- Pirola, F., Cimini, C. and Pinto, R. (2019). Digital readiness assessment of Italian SMEs: A case-study research. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(5), 1045-1083.
- Pacchini, A. P. T., Lucato, W. C., Facchini, F. and Mummolo, G. (2019). The degree of readiness for the implementation of Industry 4.0. *Computers in Industry*, 113, 103125.
- Rafael, L. D., Jaione, G. E., Cristina, L. ve Ibon, S. L. (2020). An industry 4.0 maturity model for machine tool companies. *Technological Forecasting and Social Change*, 1-18.

- Rauch, E., Unterhofer, M., Rojas, R.A., Gualtieri, L., Woschank, M. and Matt, D.T. (2020). A maturity level-based assessment tool to enhance the implementation of industry 4.0 in small and medium-sized enterprises. *Sustainability*, 12(9), 3559.
- Rockwell Automation. (2014). The Connected Enterprise Maturity Model. 15 Haziran 2022, Erişim adresi <http://www.rockwellautomation.com>
- Schumacher, A., Erol, S. and Sihh, W. (2016). A maturity model for assessing industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. *Procedia CIRP*, 52, 161–166.
- Santos, R.C. and Martinho, J.L. (2019). An industry 4.0 maturity model proposal. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(5), 1023-1043.
- Sarı, T. (2020). Endüstri 4.0 teknolojik olgunluk düzeyinin analitik hiyerarşi prosesi ile modellenmesi: gıda ve içecek imalat sektörü örneği. *BMIJ*, 8(3), 3526-3549.
- Sjödin, D., Vinit, P., Leksell, M. and Petrovic, A.(2018). Smart factory implementation and process innovation. *Research Technology Management*, 61(5), 22-30.
- Schiffer, M., Wiendahl, H.H. and Saretz, B. (2019, September 1-5). *Self-assessment of industry 4.0 technologies in intralogistics for SME's*. Paper presented at the International Conference on Advances in Production Management Systems, TX, USA. Erişim adresi: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-29996-5_39
- Trotta, D. and Garengo, P. (2019, March 2-4). *Assessing industry 4.0 maturity: an essential scale for SMEs*. Paper presented at the Eighth International Conference on Industrial Technology and Management, Cambridge, UK. Erişim adresi: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8710716>
- Yalpa, Ö. (2020). *Endüstri 4.0 ve endüstri 4.0 teknolojilerinin işletme fonksiyonları üzerine olası etkileri* (Yüksek Lisans Tezi), Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Osmaniye.
- Yüce, G. (2020). *Dijital dönüşüm ve endüstri 4.0 olgunluk modeli: türkiye çimento sektörü üzerine bir uygulama* (Doktora Tezi), Mersin Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Mersin.
- Wagire, A.A., Joshi, R., Rathore, A.P.S. and Jain, R. (2020). Development of maturity model for assessing the implementation of industry 4.0: learning from theory and practice. *Production Planning & Control*, 32(8), 1-20.

EK-1. ÇALIŞMAYA KATILAN UZMANLARIN PROFİLLERİ

	Eğitimi	Deneyimi	Çalışmaya katıldığı aşamalar
Uzman 1	Endüstri mühendisi	4 yıl	Kriterlerin seçilmesi ve fabrika 4.0 boyutunun değerlendirilmesi
Uzman 2	Kontrol ve otomasyon mühendisi	5 yıl	Kriterlerin seçilmesi ve fabrika 4.0 boyutunun değerlendirilmesi
Uzman 3	Endüstri mühendisi	3 yıl	Kriterlerin seçilmesi ve fabrika 4.0 boyutunun değerlendirilmesi
Uzman 4	Endüstri mühendisi	3 yıl	Kriterlerin seçilmesi ve fabrika 4.0 boyutunun değerlendirilmesi
Uzman 5	Elektrik- elektronik mühendisi	5 yıl	Kriterlerin seçilmesi ve fabrika 4.0 boyutunun değerlendirilmesi
Uzman 6	Kontrol ve otomasyon mühendisi	4 yıl	Kriterlerin seçilmesi ve fabrika 4.0 boyutunun değerlendirilmesi
Uzman 7	Endüstri mühendisi	3 yıl	Kriterlerin seçilmesi ve fabrika 4.0 boyutunun değerlendirilmesi
Uzman 8	Elektrik- elektronik mühendisi	5 yıl	Kriterlerin seçilmesi ve lojistik 4.0 boyutunun değerlendirilmesi
Uzman 9	Endüstri mühendisi	3 yıl	Kriterlerin seçilmesi ve lojistik 4.0 boyutunun değerlendirilmesi
Uzman 10	Endüstri mühendisi	3 yıl	Kriterlerin seçilmesi ve lojistik 4.0 boyutunun değerlendirilmesi
Uzman 11	Endüstri mühendisi	2 yıl	Kriterlerin seçilmesi ve lojistik 4.0 boyutunun değerlendirilmesi
Uzman 12	Elektrik- elektronik mühendisi	2 yıl	Kriterlerin seçilmesi ve lojistik 4.0 boyutunun değerlendirilmesi
Uzman 13	Endüstri mühendisi	3 yıl	Kriterlerin seçilmesi ve lojistik 4.0 boyutunun değerlendirilmesi
Uzman 14	Makine mühendisi	6 yıl	Kriterlerin seçilmesi ve yönetim 4.0 boyutunun değerlendirilmesi
Uzman 15	Makine mühendisi	5 yıl	Kriterlerin seçilmesi ve yönetim 4.0 boyutunun değerlendirilmesi
Uzman 16	Elektrik- elektronik mühendisi	6 yıl	Kriterlerin seçilmesi ve yönetim 4.0 boyutunun değerlendirilmesi
Uzman 17	Elektrik- elektronik mühendisi	8 yıl	Kriterlerin seçilmesi ve yönetim 4.0 boyutunun değerlendirilmesi
Uzman 18	Makine mühendisi	8yıl	Kriterlerin seçilmesi ve yönetim 4.0 boyutunun değerlendirilmesi
Uzman 19	Makine mühendisi	4 yıl	Kriterlerin seçilmesi ve operatör 4.0 boyutunun değerlendirilmesi
Uzman 20	Endüstri mühendisi	4 yıl	Kriterlerin seçilmesi ve operatör 4.0 boyutunun değerlendirilmesi
Uzman 21	Makine mühendisi	6 yıl	Kriterlerin seçilmesi ve operatör 4.0 boyutunun değerlendirilmesi
Uzman 22	Elektrik- elektronik mühendisi	5 yıl	Kriterlerin seçilmesi ve operatör 4.0 boyutunun değerlendirilmesi
Uzman 23	Elektrik- elektronik mühendisi	3 yıl	Kriterlerin seçilmesi ve operatör 4.0 boyutunun değerlendirilmesi
Uzman 24	Makine mühendisi	6 yıl	Kriterlerin seçilmesi ve operatör 4.0 boyutunun değerlendirilmesi

EK-2.ANALİTİK HİYERARŞİ PROSESİ ANKET ÇALIŞMASI

Aşağıdaki verilmiş olan dört ana boyutun birbirlerine göre önemi sizler tarafından kıyaslanarak değerlendirilecektir. Boyutların kendi aralarında kıyaslaması yapılırken puanlamalar aşağıda verilmiş olan tabloyu dikkate alınarak yapılmalıdır.

Standart Tercih Tablosu	
Önem Değerleri	Değer Tanımları
1	Eşit önemde
3	Biraz daha önemli (Az üstünlük)
5	Oldukça önemli (Fazla üstünlük)
7	Çok önemli (Çok üstünlük)
9	Son derece önemli (Kesin üstünlük)
2,4,6,8	Ara Değerler (Uzlaşma değerleri)

Aşağıda değerlendirilmenin nasıl yapılacağına yönelik örnek çalışma verilmiştir.

	A	B	C
A	1	3	1/2
B	1/3	1	5
C	2	1/5	1

Örneğin; B kriteri C kriterine göre oldukça önemli ise BC hücresine 5 değeri yazılır. Bu şekilde CB hücresi otomatik olarak 1/5 değerini almış olacaktır.

EK-3. ANA BOYUTLARA İLİŞKİN UZMAN GÖRÜŞLERİ (AHP YÖNTEMİ İLE)

Uzman 1				
	A1	A2	A3	A4
A1	1,00	3,00	0,50	1,00
A2	0,33	1,00	0,50	0,33
A3	2,00	2,00	1,00	2,00
A4	1,00	3,00	0,50	1,00

Uzman 4				
	A1	A2	A3	A4
A1	1,00	1,00	2,00	2,00
A2	1,00	1,00	0,25	2,00
A3	0,50	4,00	1,00	5,00
A4	0,50	0,50	0,20	1,00

Uzman 7				
	A1	A2	A3	A4
A1	1,00	3,00	0,33	2,00
A2	0,33	1,00	0,25	2,00
A3	3,00	4,00	1,00	6,00
A4	0,50	0,50	0,17	1,00

Uzman 2				
	A1	A2	A3	A4
A1	1,00	1,00	2,00	1,00
A2	1,00	1,00	0,33	0,50
A3	0,50	3,00	1,00	3,00
A4	1,00	2,00	0,33	1,00

Uzman 5				
	A1	A2	A3	A4
A1	1,00	3,00	0,25	2,00
A2	0,33	1,00	0,20	2,00
A3	4,00	5,00	1,00	5,00
A4	0,50	0,50	0,20	1,00

Uzman 8				
	A1	A2	A3	A4
A1	1,00	0,50	1,00	2,00
A2	2,00	1,00	0,33	2,00
A3	1,00	3,00	1,00	7,00
A4	0,50	0,50	0,14	1,00

Uzman 3				
	A1	A2	A3	A4
A1	1,00	3,00	1,00	1,00
A2	0,33	1,00	0,50	2,00
A3	1,00	2,00	1,00	2,00
A4	1,00	0,50	0,50	1,00

Uzman 6				
	A1	A2	A3	A4
A1	1,00	1,00	3,00	4,00
A2	1,00	1,00	5,00	2,00
A3	0,33	0,20	1,00	5,00
A4	0,25	0,50	0,20	1,00

Uzman 9				
	A1	A2	A3	A4
A1	1,00	3,00	0,20	3,00
A2	0,33	1,00	0,17	3,00
A3	5,00	6,00	1,00	7,00
A4	0,33	0,33	0,14	1,00

	Uzman 10			
	A1	A2	A3	A4
A1	1,00	3,00	0,20	3,00
A2	0,33	1,00	0,17	4,00
A3	5,00	6,00	1,00	8,00
A4	0,33	0,25	0,13	1,00
	Uzman 13			
	A1	A2	A3	A4
A1	1,00	4,00	1,00	2,00
A2	0,25	1,00	0,50	3,00
A3	1,00	2,00	1,00	4,00
A4	0,50	0,33	0,25	1,00
	Uzman 16			
	A1	A2	A3	A4
A1	1,00	3,00	0,50	2,00
A2	0,33	1,00	0,25	4,00
A3	2,00	4,00	1,00	5,00
A4	0,50	0,25	0,20	1,00

	Uzman 11			
	A1	A2	A3	A4
A1	1,00	0,50	0,50	1,00
A2	2,00	1,00	0,33	2,00
A3	2,00	3,00	1,00	2,00
A4	1,00	0,50	0,50	1,00
	Uzman 14			
	A1	A2	A3	A4
A1	1,00	0,50	0,50	3,00
A2	2,00	1,00	0,25	2,00
A3	2,00	4,00	1,00	5,00
A4	0,33	0,50	0,20	1,00
	Uzman 17			
	A1	A2	A3	A4
A1	1,00	1,00	0,25	3,00
A2	1,00	1,00	0,25	4,00
A3	4,00	4,00	1,00	6,00
A4	0,33	0,25	0,17	1,00

	Uzman 12			
	A1	A2	A3	A4
A1	1,00	2,00	0,33	2,00
A2	0,50	1,00	0,25	2,00
A3	3,00	4,00	1,00	6,00
A4	0,50	0,50	0,17	1,00
	Uzman 15			
	A1	A2	A3	A4
A1	1,00	2,00	0,25	3,00
A2	0,50	1,00	0,20	2,00
A3	4,00	5,00	1,00	6,00
A4	0,33	0,50	0,17	1,00
	Uzman 18			
	A1	A2	A3	A4
A1	1,00	2,00	0,33	3,00
A2	0,50	1,00	0,20	4,00
A3	3,00	5,00	1,00	7,00
A4	0,33	0,25	0,14	1,00

	Uzman 19			
	A1	A2	A3	A4
A1	1,00	3,00	0,50	3,00
A2	0,33	1,00	0,50	2,00
A3	2,00	2,00	1,00	3,00
A4	0,33	0,50	0,33	1,00

	Uzman 22			
	A1	A2	A3	A4
A1	1,00	0,33	0,50	2,00
A2	3,00	1,00	0,50	3,00
A3	2,00	2,00	1,00	4,00
A4	0,50	0,33	0,25	1,00

	Uzman 20			
	A1	A2	A3	A4
A1	1,00	1,00	0,25	3,00
A2	1,00	1,00	0,25	4,00
A3	4,00	4,00	1,00	5,00
A4	0,33	0,25	0,20	1,00

	Uzman 23			
	A1	A2	A3	A4
A1	1,00	1,00	0,33	2,00
A2	1,00	1,00	0,33	2,00
A3	3,00	3,00	1,00	4,00
A4	0,50	0,50	0,25	1,00

	Uzman 21			
	A1	A2	A3	A4
A1	1,00	0,25	0,33	2,00
A2	4,00	1,00	0,20	4,00
A3	3,00	5,00	1,00	7,00
A4	0,50	0,25	0,14	1,00

	Uzman 24			
	A1	A2	A3	A4
A1	1,00	2,00	0,33	3,00
A2	0,50	1,00	0,25	2,00
A3	3,00	4,00	1,00	7,00
A4	0,33	0,50	0,14	1,00

EK-4. FABRİKA 4.0 BOYUTUNA İLİŞKİN UZMAN GÖRÜŞLERİ (AHP YÖNTEMİ İLE)

Uzman 1															
	A1.1	A1.2	A1.3	A1.4	A1.5	A1.6	A1.7	A1.8	A1.9	A1.10	A1.11	A1.12	A1.13	A1.14	A1.15
A1.1	1,00	2	3	1,00	2,00	1,00	3,00	4,00	0,50	5,00	2,00	4,00	3,00	2,00	5,00
A1.2	0,50	1,00	3	0,50	2,00	1,00	2,00	5,00	0,33	4,00	0,33	5,00	4,00	0,33	2,00
A1.3	0,33	0,33	1,00	0,25	0,33	0,25	1,00	3,00	0,20	3,00	0,20	3,00	0,33	0,17	0,25
A1.4	1,00	2,00	4,00	1,00	3,00	2,00	4,00	7,00	2,00	7,00	0,50	8,00	4,00	1,00	2,00
A1.5	0,50	0,50	3,00	0,33	1,00	0,33	4,00	5,00	0,33	5,00	2,00	6,00	3,00	0,50	2,00
A1.6	1,00	1,00	4,00	0,50	3,00	1,00	4,00	5,00	0,50	5,00	2,00	5,00	3,00	2,00	3,00
A1.7	0,33	0,50	1,00	0,25	0,25	0,25	1,00	2,00	0,33	4,00	0,20	3,00	0,50	0,20	0,33
A1.8	0,25	0,20	0,33	0,14	0,20	0,20	0,50	1,00	0,20	2,00	0,25	2,00	0,33	0,25	0,25
A1.9	2,00	3,00	5,00	0,50	3,00	2,00	3,00	5,00	1,00	5,00	0,50	5,00	2,00	0,33	2,00
A1.10	0,20	0,25	0,33	0,14	0,20	0,20	0,25	0,50	0,20	1,00	0,33	2,00	0,33	0,25	0,25
A1.11	0,50	3,00	5,00	2,00	0,50	0,50	5,00	4,00	2,00	3,00	1,00	4,00	2,00	0,50	3,00
A1.12	0,25	0,20	0,33	0,13	0,17	0,20	0,33	0,50	0,20	0,50	0,25	1,00	0,33	0,25	0,25
A1.13	0,33	0,25	3,00	0,25	0,33	0,33	2,00	3,00	0,50	3,00	0,50	3,00	1,00	0,50	0,50
A1.14	0,50	3,00	6,00	1,00	2,00	0,50	5,00	4,00	3,00	4,00	2,00	4,00	2,00	1,00	2,00
A1.15	0,20	0,50	4,00	0,50	0,50	0,33	3,00	4,00	0,50	4,00	0,33	4,00	2,00	0,50	1,00

Uzman 2															
	A1.1	A1.2	A1.3	A1.4	A1.5	A1.6	A1.7	A1.8	A1.9	A1.10	A1.11	A1.12	A1.13	A1.14	A1.15
A1.1	1,00	2	4	2,00	2,00	1,00	3,00	4,00	0,50	5,00	2,00	4,00	3,00	2,00	5,00
A1.2	0,50	1,00	3	0,50	2,00	1,00	2,00	5,00	0,33	4,00	0,33	5,00	4,00	0,33	2,00
A1.3	0,25	0,33	1,00	0,25	0,33	0,25	1,00	3,00	0,20	3,00	0,20	3,00	0,33	0,17	0,25
A1.4	0,50	2,00	4,00	1,00	4,00	2,00	4,00	7,00	2,00	7,00	0,50	8,00	4,00	1,00	2,00
A1.5	0,50	0,50	3,00	0,25	1,00	0,33	4,00	5,00	0,33	5,00	2,00	6,00	3,00	0,50	2,00
A1.6	1,00	1,00	4,00	0,50	3,00	1,00	4,00	5,00	0,50	5,00	2,00	7,00	3,00	2,00	3,00
A1.7	0,33	0,50	1,00	0,25	0,25	0,25	1,00	2,00	0,33	4,00	0,20	3,00	0,50	0,20	0,33
A1.8	0,25	0,20	0,33	0,14	0,20	0,20	0,50	1,00	0,20	2,00	0,25	2,00	0,33	0,25	0,25
A1.9	2,00	3,00	5,00	0,50	3,00	2,00	3,00	5,00	1,00	5,00	0,50	5,00	2,00	0,33	2,00
A1.10	0,20	0,25	0,33	0,14	0,20	0,20	0,25	0,50	0,20	1,00	0,33	2,00	0,33	0,25	0,25
A1.11	0,50	3,00	5,00	2,00	0,50	0,50	5,00	4,00	2,00	3,00	1,00	4,00	2,00	0,50	3,00
A1.12	0,25	0,20	0,33	0,13	0,17	0,14	0,33	0,50	0,20	0,50	0,25	1,00	0,33	0,25	0,25
A1.13	0,33	0,25	3,00	0,25	0,33	0,33	2,00	3,00	0,50	3,00	0,50	3,00	1,00	0,50	0,50
A1.14	0,50	3,00	6,00	1,00	2,00	0,50	5,00	4,00	3,00	4,00	2,00	4,00	2,00	1,00	2,00
A1.15	0,20	0,50	4,00	0,50	0,50	0,33	3,00	4,00	0,50	4,00	0,33	4,00	2,00	0,50	1,00

Uzman 3															
	A1.1	A1.2	A1.3	A1.4	A1.5	A1.6	A1.7	A1.8	A1.9	A1.10	A1.11	A1.12	A1.13	A1.14	A1.15
A1.1	1,00	1,00	3,00	0,33	2,00	0,50	3,00	5,00	0,50	6,00	1,00	6,00	2,00	0,50	3,00
A1.2	1,00	1,00	4,00	0,33	3,00	3,00	4,00	5,00	0,50	6,00	0,33	5,00	0,33	1,00	2,00
A1.3	0,33	0,25	1,00	0,25	0,33	0,25	0,50	0,50	0,25	0,33	0,20	0,50	0,20	0,17	0,20
A1.4	3,00	3,00	4,00	1,00	3,00	2,00	4,00	5,00	2,00	5,00	0,50	5,00	2,00	0,33	3,00
A1.5	0,50	0,33	3,00	0,33	1,00	0,33	3,00	4,00	0,33	5,00	0,25	5,00	0,33	0,25	0,50
A1.6	2,00	0,33	4,00	0,50	3,00	1,00	4,00	5,00	2,00	5,00	0,50	5,00	2,00	0,33	2,00
A1.7	0,33	0,25	2,00	0,25	0,33	0,25	1,00	2,00	0,25	2,00	0,20	3,00	2,00	0,50	2,00
A1.8	0,20	0,20	2,00	0,20	0,25	0,20	0,50	1,00	0,25	2,00	0,25	3,00	0,50	0,33	0,25
A1.9	2,00	2,00	4,00	0,50	3,00	0,50	4,00	4,00	1,00	5,00	0,50	5,00	3,00	0,33	2,00
A1.10	0,17	0,17	3,00	0,20	0,20	0,20	0,50	0,50	0,20	1,00	0,20	2,00	0,33	0,17	0,33
A1.11	1,00	3,00	5,00	2,00	4,00	2,00	5,00	4,00	2,00	5,00	1,00	6,00	3,00	2,00	3,00
A1.12	0,17	0,20	2,00	0,20	0,20	0,20	0,33	0,33	0,20	0,50	0,17	1,00	0,25	0,20	0,25
A1.13	0,50	3,00	5,00	0,50	3,00	0,50	0,50	2,00	0,33	3,00	0,33	4,00	1,00	0,20	0,33
A1.14	2,00	1,00	6,00	3,00	4,00	3,00	2,00	3,00	3,00	6,00	0,50	5,00	5,00	1,00	4,00
A1.15	0,33	0,50	5,00	0,33	2,00	0,50	0,50	4,00	0,50	3,00	0,33	4,00	3,00	0,25	1,00

Uzman 4															
	A1.1	A1.2	A1.3	A1.4	A1.5	A1.6	A1.7	A1.8	A1.9	A1.10	A1.11	A1.12	A1.13	A1.14	A1.15
A1.1	1,00	4,00	5,00	1,00	2,00	3,00	2,00	6,00	0,50	7,00	1,00	7,00	3,00	0,50	4,00
A1.2	0,25	1,00	4,00	0,33	3,00	1,00	0,50	5,00	0,33	5,00	0,33	6,00	2,00	0,33	3,00
A1.3	0,20	0,25	1,00	0,33	0,50	0,25	0,50	0,25	0,20	0,50	0,20	0,50	0,25	0,20	0,33
A1.4	1,00	3,00	3,00	1,00	3,00	2,00	0,50	4,00	2,00	5,00	0,33	6,00	2,00	0,50	2,00
A1.5	0,50	0,33	2,00	0,33	1,00	0,33	0,33	3,00	0,33	4,00	0,20	4,00	2,00	0,20	0,50
A1.6	0,33	1,00	4,00	0,50	3,00	1,00	3,00	5,00	2,00	6,00	0,33	6,00	2,00	0,33	3,00
A1.7	0,50	2,00	2,00	2,00	3,00	0,33	1,00	2,00	0,50	3,00	0,50	4,00	2,00	0,33	0,50
A1.8	0,17	0,20	4,00	0,25	0,33	0,20	0,50	1,00	0,25	3,00	0,25	4,00	0,33	0,20	0,25
A1.9	2,00	3,00	5,00	0,50	3,00	0,50	2,00	4,00	1,00	5,00	2,00	3,00	2,00	0,50	2,00
A1.10	0,14	0,20	2,00	0,20	0,25	0,17	0,33	0,33	0,20	1,00	0,25	0,50	0,33	0,20	0,33
A1.11	1,00	3,00	5,00	3,00	5,00	3,00	2,00	4,00	0,50	4,00	1,00	3,00	2,00	1,00	3,00
A1.12	0,14	0,17	2,00	0,17	0,25	0,17	0,25	0,25	0,33	2,00	0,33	1,00	0,33	0,20	0,25
A1.13	0,33	0,50	4,00	0,50	0,50	0,50	0,50	3,00	0,50	3,00	0,50	3,00	1,00	0,25	0,33
A1.14	2,00	3,00	5,00	2,00	5,00	3,00	3,00	5,00	2,00	5,00	1,00	5,00	4,00	1,00	4,00
A1.15	0,25	0,33	3,00	0,50	2,00	0,33	2,00	4,00	0,50	3,00	0,33	4,00	3,00	0,25	1,00

Uzman 5															
	A1.1	A1.2	A1.3	A1.4	A1.5	A1.6	A1.7	A1.8	A1.9	A1.10	A1.11	A1.12	A1.13	A1.14	A1.15
A1.1	1,00	4,00	5,00	0,50	5,00	3,00	2,00	6,00	2,00	6,00	0,50	6,00	2,00	2,00	3,00
A1.2	0,25	1,00	4,00	0,50	3,00	1,00	2,00	5,00	0,50	6,00	0,33	6,00	2,00	0,50	2,00
A1.3	0,20	0,25	1,00	0,33	0,50	0,20	0,33	2,00	0,33	2,00	0,25	2,00	0,33	0,20	0,25
A1.4	2,00	2,00	3,00	1,00	3,00	2,00	0,50	5,00	0,50	5,00	0,33	6,00	2,00	0,33	0,50
A1.5	0,20	0,33	2,00	0,33	1,00	0,33	0,33	3,00	0,33	3,00	0,25	3,00	0,33	0,20	0,33
A1.6	0,33	1,00	5,00	0,50	3,00	1,00	2,00	4,00	0,50	5,00	0,33	5,00	3,00	0,33	2,00
A1.7	0,50	0,50	3,00	2,00	3,00	0,50	1,00	4,00	0,50	4,00	0,50	4,00	0,50	0,33	0,50
A1.8	0,17	0,20	0,50	0,20	0,33	0,25	0,25	1,00	0,33	3,00	0,20	4,00	0,33	0,20	0,33
A1.9	0,50	2,00	3,00	2,00	3,00	2,00	2,00	3,00	1,00	3,00	0,50	3,00	0,50	0,33	0,50
A1.10	0,17	0,17	0,50	0,20	0,33	0,20	0,25	0,33	0,33	1,00	0,20	3,00	0,33	0,20	0,33
A1.11	2,00	3,00	4,00	3,00	4,00	3,00	2,00	5,00	2,00	5,00	1,00	5,00	3,00	0,50	3,00
A1.12	0,17	0,17	0,50	0,17	0,33	0,20	0,25	0,25	0,33	0,33	0,20	1,00	0,25	0,17	0,33
A1.13	0,50	0,50	3,00	0,50	3,00	0,33	2,00	3,00	2,00	3,00	0,33	4,00	1,00	0,20	0,33
A1.14	0,50	2,00	5,00	3,00	5,00	3,00	3,00	5,00	3,00	5,00	2,00	6,00	5,00	1,00	4,00
A1.15	0,33	0,50	4,00	2,00	3,00	0,50	2,00	3,00	2,00	3,00	0,33	3,00	3,00	0,25	1,00

Uzman 6															
	A1.1	A1.2	A1.3	A1.4	A1.5	A1.6	A1.7	A1.8	A1.9	A1.10	A1.11	A1.12	A1.13	A1.14	A1.15
A1.1	1,00	2,00	3,00	2,00	4,00	2,00	2,00	4,00	3,00	5,00	2,00	6,00	3,00	0,50	3,00
A1.2	0,50	1,00	3,00	0,50	2,00	1,00	0,50	4,00	2,00	5,00	0,50	5,00	0,50	0,25	0,33
A1.3	0,33	0,33	1,00	0,33	0,50	0,20	0,50	0,33	0,25	2,00	0,20	2,00	0,25	0,17	0,33
A1.4	0,50	2,00	3,00	1,00	3,00	2,00	2,00	4,00	2,00	5,00	1,00	5,00	2,00	0,33	2,00
A1.5	0,25	0,50	2,00	0,33	1,00	0,33	0,50	2,00	0,33	3,00	0,33	3,00	0,50	0,25	0,50
A1.6	0,50	1,00	5,00	0,50	3,00	1,00	2,00	4,00	0,50	5,00	0,50	5,00	2,00	0,33	2,00
A1.7	0,50	2,00	2,00	0,50	2,00	0,50	1,00	3,00	2,00	3,00	2,00	4,00	3,00	2,00	3,00
A1.8	0,25	0,25	3,00	0,25	0,50	0,25	0,33	1,00	0,33	4,00	0,25	3,00	0,50	0,20	0,50
A1.9	0,33	0,50	4,00	0,50	3,00	2,00	0,50	3,00	1,00	4,00	0,50	4,00	2,00	0,33	2,00
A1.10	0,20	0,20	0,50	0,20	0,33	0,20	0,33	0,25	0,25	1,00	0,20	2,00	0,33	0,20	0,33
A1.11	0,50	2,00	5,00	1,00	3,00	2,00	0,50	4,00	2,00	5,00	1,00	5,00	3,00	2,00	2,00
A1.12	0,17	0,20	0,50	0,20	0,33	0,20	0,25	0,33	0,25	0,50	0,20	1,00	0,33	0,20	0,33
A1.13	0,33	2,00	4,00	0,50	2,00	0,50	0,33	2,00	0,50	3,00	0,33	3,00	1,00	0,20	0,33
A1.14	2,00	4,00	6,00	3,00	4,00	3,00	0,50	5,00	3,00	5,00	0,50	5,00	5,00	1,00	5,00
A1.15	0,33	3,00	3,00	0,50	2,00	0,50	0,33	2,00	0,50	3,00	0,50	3,00	3,00	0,20	1,00

Uzman 7															
	A1.1	A1.2	A1.3	A1.4	A1.5	A1.6	A1.7	A1.8	A1.9	A1.10	A1.11	A1.12	A1.13	A1.14	A1.15
A1.1	1,00	3,00	5,00	0,50	4,00	2,00	0,50	4,00	2,00	5,00	2,00	6,00	3,00	0,50	4,00
A1.2	0,33	1,00	3,00	0,50	3,00	2,00	0,33	4,00	0,50	4,00	0,50	5,00	2,00	0,33	2,00
A1.3	0,20	0,33	1,00	0,33	0,50	0,25	0,50	0,50	0,33	3,00	0,25	3,00	0,33	0,20	0,33
A1.4	2,00	2,00	3,00	1,00	3,00	2,00	0,50	3,00	2,00	5,00	0,50	5,00	2,00	0,33	2,00
A1.5	0,25	0,33	2,00	0,33	1,00	0,33	0,33	2,00	0,33	3,00	0,25	3,00	0,33	0,25	0,50
A1.6	0,50	0,50	4,00	0,50	3,00	1,00	0,50	4,00	2,00	4,00	2,00	4,00	2,00	0,50	3,00
A1.7	2,00	3,00	2,00	2,00	3,00	2,00	1,00	2,00	2,00	3,00	2,00	3,00	2,00	2,00	3,00
A1.8	0,25	0,25	2,00	0,33	0,50	0,25	0,50	1,00	0,33	2,00	0,25	3,00	0,33	0,25	0,50
A1.9	0,50	2,00	3,00	0,50	3,00	0,50	0,50	3,00	1,00	3,00	0,50	3,00	2,00	0,50	2,00
A1.10	0,20	0,25	0,33	0,20	0,33	0,25	0,33	0,50	0,33	1,00	0,20	2,00	0,33	0,20	0,33
A1.11	0,50	2,00	4,00	2,00	4,00	0,50	0,50	4,00	2,00	5,00	1,00	4,00	3,00	4,00	4,00
A1.12	0,17	0,20	0,33	0,20	0,33	0,25	0,33	0,33	0,33	0,50	0,25	1,00	0,33	0,20	0,50
A1.13	0,33	0,50	3,00	0,50	3,00	0,50	0,50	3,00	0,50	3,00	0,33	3,00	1,00	0,20	0,33
A1.14	2,00	3,00	5,00	3,00	4,00	2,00	0,50	4,00	2,00	5,00	0,25	5,00	5,00	1,00	6,00
A1.15	0,25	0,50	3,00	0,50	2,00	0,33	0,33	2,00	0,50	3,00	0,25	2,00	3,00	0,17	1,00

EK-5. LOJİSTİK 4.0 BOYUTUNA İLİŞKİN UZMAN GÖRÜŞLERİ (AHP YÖNTEMİ İLE)

Uzman 1					
	A2.1	A2.2	A2.3	A2.4	A2.5
A2.1	1,00	2,00	0,50	0,33	3,00
A2.2	0,50	1,00	2,00	0,50	2,00
A2.3	2,00	0,50	1,00	2,00	3,00
A2.4	3,00	2,00	0,50	1,00	3,00
A2.5	0,33	0,50	0,33	0,33	1,00

Uzman 4					
	A2.1	A2.2	A2.3	A2.4	A2.5
A2.1	1,00	0,50	0,33	0,33	0,50
A2.2	2,00	1,00	0,50	0,33	2,00
A2.3	3,00	2,00	1,00	0,50	2,00
A2.4	3,00	3,00	2,00	1,00	2,00
A2.5	2,00	0,50	0,50	0,50	1,00

Uzman 2					
	A2.1	A2.2	A2.3	A2.4	A2.5
A2.1	1,00	0,50	0,25	0,25	2,00
A2.2	2,00	1,00	3,00	0,33	2,00
A2.3	4,00	0,33	1,00	0,33	4,00
A2.4	4,00	3,00	3,00	1,00	4,00
A2.5	0,50	0,50	0,25	0,25	1,00

Uzman 5					
	A2.1	A2.2	A2.3	A2.4	A2.5
A2.1	1,00	0,50	0,33	0,33	2,00
A2.2	2,00	1,00	2,00	0,33	0,50
A2.3	3,00	0,50	1,00	2,00	3,00
A2.4	3,00	3,00	0,50	1,00	2,00
A2.5	0,50	2,00	0,33	0,50	1,00

Uzman 3					
	A2.1	A2.2	A2.3	A2.4	A2.5
A2.1	1,00	0,33	0,50	0,25	0,33
A2.2	3,00	1,00	2,00	0,50	2,00
A2.3	2,00	0,50	1,00	0,33	2,00
A2.4	4,00	2,00	3,00	1,00	2,00
A2.5	3,00	0,50	0,50	0,50	1,00

Uzman 6					
	A2.1	A2.2	A2.3	A2.4	A2.5
A2.1	1,00	0,50	0,33	0,25	0,50
A2.2	2,00	1,00	3,00	0,50	0,50
A2.3	3,00	0,33	1,00	0,50	2,00
A2.4	4,00	2,00	2,00	1,00	3,00
A2.5	2,00	2,00	0,50	0,33	1,00

EK-6. YÖNETİM 4.0 BOYUTUNA İLİŞKİN UZMAN GÖRÜŞLERİ (AHP YÖNTEMİ İLE)

	Uzman 1						
	A3.1	A3.2	A3.3	A3.4	A3.5	A3.6	A3.7
A3.1	1,00	3,00	1,00	3,00	4,00	2,00	3,00
A3.2	0,33	1,00	0,25	0,33	1,00	0,33	0,25
A3.3	1,00	4,00	1,00	4,00	3,00	2,00	3,00
A3.4	0,33	3,00	0,25	1,00	2,00	0,33	0,50
A3.5	0,25	1,00	0,33	0,50	1,00	0,33	0,33
A3.6	0,50	3,00	0,50	3,00	3,00	1,00	3,00
A3.7	0,33	4,00	0,33	2,00	3,00	0,33	1,00

	Uzman 3						
	A3.1	A3.2	A3.3	A3.4	A3.5	A3.6	A3.7
A3.1	1,00	4,00	0,50	3,00	3,00	0,50	3,00
A3.2	0,25	1,00	0,33	0,33	0,50	0,25	0,33
A3.3	2,00	3,00	1,00	3,00	3,00	1,00	2,00
A3.4	0,33	3,00	0,33	1,00	3,00	0,50	0,50
A3.5	0,33	2,00	0,33	0,33	1,00	0,25	0,33
A3.6	2,00	4,00	1,00	2,00	4,00	1,00	2,00
A3.7	0,33	3,00	0,50	2,00	3,00	0,50	1,00

	Uzman 2						
	A3.1	A3.2	A3.3	A3.4	A3.5	A3.6	A3.7
A3.1	1,00	2,00	2,00	1,00	2,00	0,33	2,00
A3.2	0,50	1,00	0,33	0,50	0,50	0,25	0,50
A3.3	0,50	3,00	1,00	3,00	4,00	1,00	2,00
A3.4	1,00	2,00	0,33	1,00	3,00	0,50	0,33
A3.5	0,50	2,00	0,25	0,33	1,00	0,33	0,50
A3.6	3,00	4,00	1,00	2,00	3,00	1,00	2,00
A3.7	0,50	2,00	0,50	3,00	2,00	0,50	1,00

	Uzman 4						
	A3.1	A3.2	A3.3	A3.4	A3.5	A3.6	A3.7
A3.1	1,00	5,00	2,00	2,00	3,00	1,00	2,00
A3.2	0,20	1,00	0,25	0,50	0,33	0,25	0,33
A3.3	0,50	4,00	1,00	3,00	4,00	1,00	3,00
A3.4	0,50	2,00	0,33	1,00	3,00	0,50	0,50
A3.5	0,33	3,00	0,25	0,33	1,00	0,33	0,33
A3.6	1,00	4,00	1,00	2,00	3,00	1,00	4,00
A3.7	0,50	3,00	0,33	2,00	3,00	0,25	1,00

Uzman 5							
	A3.1	A3.2	A3.3	A3.4	A3.5	A3.6	A3.7
A3.1	1,00	3,00	0,33	2,00	3,00	2,00	3,00
A3.2	0,33	1,00	0,25	0,50	0,50	0,33	0,33
A3.3	3,00	4,00	1,00	3,00	4,00	0,50	2,00
A3.4	0,50	2,00	0,33	1,00	3,00	0,33	0,50
A3.5	0,33	2,00	0,25	0,33	1,00	0,25	0,25
A3.6	0,50	3,00	2,00	3,00	4,00	1,00	3,00
A3.7	0,33	3,00	0,50	2,00	4,00	0,33	1,00

EK-7.OPERATÖR 4.0 BOYUTU UZMAN GÖRÜŞLERİ (AHP YÖNTEMİ İLE)

	Uzman 1					
	A4.1	A4.2	A4.3	A4.4	A4.5	A4.6
A4.1	1,00	0,33	0,50	2,00	1,00	0,33
A4.2	3,00	1,00	3,00	2,00	2,00	3,00
A4.3	2,00	0,33	1,00	4,00	3,00	2,00
A4.4	0,50	0,50	0,25	1,00	0,50	2,00
A4.5	1,00	0,50	0,33	2,00	1,00	2,00
A4.6	3,00	0,33	0,50	0,50	0,50	1,00

	Uzman 1					
	A4.1	A4.2	A4.3	A4.4	A4.5	A4.6
A4.1	1,00	0,25	2,00	1,00	0,50	0,25
A4.2	4,00	1,00	4,00	4,00	3,00	1,00
A4.3	0,50	0,25	1,00	2,00	2,00	2,00
A4.4	1,00	0,25	0,50	1,00	0,33	0,33
A4.5	2,00	0,33	0,50	3,00	1,00	3,00
A4.6	4,00	1,00	0,50	3,00	0,33	1,00

	Uzman 2					
	A4.1	A4.2	A4.3	A4.4	A4.5	A4.6
A4.1	1,00	0,20	0,33	2,00	0,33	2,00
A4.2	5,00	1,00	2,00	3,00	0,50	2,00
A4.3	3,00	0,50	1,00	3,00	2,00	2,00
A4.4	0,50	0,33	0,33	1,00	0,25	0,50
A4.5	3,00	2,00	0,50	4,00	1,00	2,00
A4.6	0,50	0,50	0,50	2,00	0,50	1,00

	Uzman 5					
	A4.1	A4.2	A4.3	A4.4	A4.5	A4.6
A4.1	1,00	0,20	0,33	3,00	0,25	0,33
A4.2	5,00	1,00	3,00	4,00	3,00	2,00
A4.3	3,00	0,33	1,00	5,00	0,50	0,50
A4.4	0,33	0,25	0,20	1,00	0,25	0,20
A4.5	4,00	0,33	2,00	4,00	1,00	0,50
A4.6	3,00	0,50	2,00	5,00	2,00	1,00

	Uzman 3					
	A4.1	A4.2	A4.3	A4.4	A4.5	A4.6
A4.1	1,00	0,25	0,33	3,00	1,00	0,50
A4.2	4,00	1,00	2,00	4,00	2,00	0,50
A4.3	3,00	0,50	1,00	3,00	2,00	1,00
A4.4	0,33	0,25	0,33	1,00	0,33	0,25
A4.5	1,00	0,50	0,50	3,00	1,00	3,00
A4.6	2,00	2,00	1,00	4,00	0,33	1,00

	Uzman 6					
	A4.1	A4.2	A4.3	A4.4	A4.5	A4.6
A4.1	1,00	0,20	0,50	4,00	3,00	0,50
A4.2	5,00	1,00	2,00	3,00	2,00	2,00
A4.3	2,00	0,50	1,00	4,00	2,00	0,50
A4.4	0,25	0,33	0,25	1,00	0,33	0,20
A4.5	0,33	0,50	0,50	3,00	1,00	2,00
A4.6	2,00	0,50	2,00	5,00	0,50	1,00

EK-8. FABRİKA 4.0 BOYUTU BİRLEŞTİRİLMİŞ KARAR MATRİSİ

	A1.1	A1.2	A1.3	A1.4	A1.5	A1.6	A1.7	A1.8	A1.9	A1.10	A1.11	A1.12	A1.13	A1.14	A1.15
A1.1	1,00	2,34	3,89	0,85	2,78	1,51	1,95	4,64	0,96	5,53	1,35	5,46	2,67	0,91	3,77
A1.2	0,43	1,00	3,39	0,45	2,52	1,29	1,15	4,69	0,51	4,79	0,37	5,27	1,55	0,40	1,64
A1.3	0,26	0,29	1,00	0,29	0,42	0,23	0,58	0,87	0,25	1,51	0,21	1,60	0,29	0,18	0,27
A1.4	1,17	2,25	3,39	1,00	3,13	2,00	1,49	4,80	1,64	5,50	0,49	6,02	2,44	0,48	1,74
A1.5	0,36	0,40	2,38	0,32	1,00	0,33	0,98	3,22	0,33	3,89	0,46	4,10	0,85	0,29	0,70
A1.6	0,66	0,77	4,26	0,50	3,00	1,00	2,34	4,54	0,91	4,97	0,81	5,22	2,38	0,59	2,52
A1.7	0,51	0,87	1,74	0,67	1,02	0,43	1,00	2,34	0,60	3,20	0,50	3,39	1,17	0,51	0,91
A1.8	0,22	0,21	1,15	0,21	0,31	0,22	0,43	1,00	0,27	2,48	0,24	2,90	0,37	0,24	0,32
A1.9	1,04	1,95	4,05	0,61	3,00	1,10	1,67	3,77	1,00	4,19	0,61	3,89	1,74	0,37	1,64
A1.10	0,18	0,21	0,66	0,18	0,26	0,20	0,31	0,40	0,24	1,00	0,24	1,74	0,33	0,21	0,31
A1.11	0,74	2,67	4,69	2,03	2,19	1,24	1,99	4,13	1,64	4,19	1,00	4,34	2,52	1,10	2,95
A1.12	0,18	0,19	0,62	0,17	0,24	0,19	0,29	0,34	0,26	0,58	0,23	1,00	0,31	0,21	0,30
A1.13	0,37	0,65	3,50	0,41	1,17	0,42	0,85	2,67	0,58	3,00	0,40	3,26	1,00	0,27	0,37
A1.14	1,10	2,52	5,55	2,07	3,50	1,70	1,96	4,22	2,67	4,81	0,91	4,81	3,73	1,00	3,59
A1.15	0,27	0,61	3,65	0,58	1,43	0,40	1,10	3,15	0,61	3,26	0,34	3,34	2,67	0,28	1,00

EK-9. LOJİSTİK 4.0 BOYUTU BİRLEŞTİRİLMİŞ KARAR MATRİSİ

	A2.1	A2.2	A2.3	A2.4	A2.5
A2.1	1,00	0,59	0,36	0,29	1,00
A2.2	1,70	1,00	1,82	0,41	1,26
A2.3	2,75	0,55	1,00	0,69	2,57
A2.4	3,46	2,45	1,44	1,00	2,57
A2.5	1,00	0,79	0,39	0,39	1,00

EK-10. YÖNETİM 4.0 BOYUTU BİRLEŞTİRİLMİŞ KARAR MATRİSİ

	A3.1	A3.2	A3.3	A3.4	A3.5	A3.6	A3.7
A3.1	1,00	3,25	0,92	2,05	2,93	0,92	2,55
A3.2	0,31	1,00	0,28	0,43	0,53	0,28	0,34
A3.3	1,08	3,57	1,00	3,18	3,57	1,00	2,35
A3.4	0,49	2,35	0,31	1,00	2,77	0,43	0,46
A3.5	0,34	1,89	0,28	0,36	1,00	0,30	0,34
A3.6	1,08	3,57	1,00	2,35	3,37	1,00	2,70
A3.7	0,39	2,93	0,43	2,17	2,93	0,37	1,00

EK-11. OPERATÖR 4.0 BOYUTU BİRLEŞTİRİLMİŞ KARAR MATRİSİ

	A4.1	A4.2	A4.3	A4.4	A4.5	A4.6
A4.1	1,00	0,23	0,51	2,29	0,71	0,49
A4.2	4,26	1,00	2,57	3,24	1,82	1,51
A4.3	1,94	0,39	1,00	3,36	1,70	1,12
A4.4	0,44	0,31	0,30	1,00	0,32	0,39
A4.5	1,41	0,55	0,59	3,09	1,00	1,82
A4.6	2,04	0,66	0,89	2,59	0,55	1,00

EK-12. FABRİKA 4.0 BOYUTU NORMALİZE KARAR MATRİSİ

	A1.1	A1.2	A1.3	A1.4	A1.5	A1.6	A1.7	A1.8	A1.9	A1.10	A1.11	A1.12	A1.13	A1.14	A1.15	Özvektör (w)
A1.1	0,12	0,14	0,09	0,08	0,11	0,12	0,11	0,10	0,08	0,10	0,17	0,10	0,11	0,13	0,17	0,11
A1.2	0,05	0,06	0,08	0,04	0,10	0,11	0,06	0,10	0,04	0,09	0,05	0,09	0,06	0,06	0,07	0,07
A1.3	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,01	0,03	0,01	0,02
A1.4	0,14	0,13	0,08	0,10	0,12	0,16	0,08	0,11	0,13	0,10	0,06	0,11	0,10	0,07	0,08	0,10
A1.5	0,04	0,02	0,05	0,03	0,04	0,03	0,05	0,07	0,03	0,07	0,06	0,07	0,04	0,04	0,03	0,05
A1.6	0,08	0,05	0,10	0,05	0,12	0,08	0,13	0,10	0,07	0,09	0,10	0,09	0,10	0,08	0,11	0,09
A1.7	0,06	0,05	0,04	0,07	0,04	0,03	0,06	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,05	0,07	0,04	0,05
A1.8	0,03	0,01	0,03	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,05	0,03	0,05	0,02	0,03	0,01	0,02
A1.9	0,12	0,12	0,09	0,06	0,12	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,05	0,07	0,08
A1.10	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,01	0,03	0,01	0,02
A1.11	0,09	0,16	0,11	0,20	0,08	0,10	0,11	0,09	0,13	0,08	0,12	0,08	0,10	0,16	0,13	0,12
A1.12	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,03	0,02	0,01	0,03	0,01	0,02
A1.13	0,04	0,04	0,08	0,04	0,05	0,03	0,05	0,06	0,05	0,06	0,05	0,06	0,04	0,04	0,02	0,05
A1.14	0,13	0,15	0,13	0,20	0,13	0,14	0,11	0,09	0,21	0,09	0,11	0,09	0,16	0,14	0,16	0,14
A1.15	0,03	0,04	0,08	0,06	0,05	0,03	0,06	0,07	0,05	0,06	0,04	0,06	0,11	0,04	0,05	0,06

EK-13. LOJİSTİK 4.0 BOYUTU NORMALİZE KARAR MATRİSİ

	A2.1	A2.2	A2.3	A2.4	A2.5	Özvektör (w)
A2.1	0,10	0,11	0,07	0,10	0,12	0,10
A2.2	0,17	0,19	0,36	0,15	0,15	0,20
A2.3	0,28	0,10	0,20	0,25	0,31	0,23
A2.4	0,35	0,46	0,29	0,36	0,31	0,35
A2.5	0,10	0,15	0,08	0,14	0,12	0,12

EK-14. YÖNETİM 4.0 BOYUTU NORMALİZE KARAR MATRİSİ

	A3.1	A3.2	A3.3	A3.4	A3.5	A3.6	A3.7	Özvektör (w)
A3.1	0,21	0,17	0,22	0,18	0,17	0,21	0,26	0,20
A3.2	0,07	0,05	0,07	0,04	0,03	0,07	0,04	0,05
A3.3	0,23	0,19	0,24	0,28	0,21	0,23	0,24	0,23
A3.4	0,10	0,13	0,07	0,09	0,16	0,10	0,05	0,10
A3.5	0,07	0,10	0,07	0,03	0,06	0,07	0,04	0,06
A3.6	0,23	0,19	0,24	0,20	0,20	0,23	0,28	0,22
A3.7	0,08	0,16	0,10	0,19	0,17	0,09	0,10	0,13

EK-15. OPERATÖR 4.0 BOYUTU NORMALİZE KARAR MATRİSİ

	A4.1	A4.2	A4.3	A4.4	A4.5	A4.6	Özvektör (w)
A4.1	0,09	0,07	0,09	0,15	0,12	0,08	0,10
A4.2	0,38	0,32	0,44	0,21	0,30	0,24	0,31
A4.3	0,18	0,12	0,17	0,22	0,28	0,18	0,19
A4.4	0,04	0,10	0,05	0,06	0,05	0,06	0,06
A4.5	0,13	0,18	0,10	0,20	0,16	0,29	0,18
A4.6	0,18	0,21	0,15	0,17	0,09	0,16	0,16

EK-16. TOPSIS DEĞERLENDİRME ANKETİ

Aşağıda verilmiş olan ölçeği göz önünde bulundurarak **ilgili olduğunuz** boyutun (fabrika 4.0, lojistik 4.0, yönetim 4.0 ve operatör 4.0) altında bulunan alt kriterleri (endüstri 4.0 teknolojilerini) puanlayınız.

Olgunluk Seviyesi	Açıklama
Seviye 1	İşletmede değerlendirilen endüstri 4.0 teknolojisi ile ilgili planlama ve çalışma yapılmamaktadır.
Seviye 2	İşletme değerlendirilen endüstri 4.0 teknolojisi ile ilgi projelendirme aşamasında olup pilot uygulama alanı için çalışmalar yapılmaktadır.
Seviye 3	İşletme değerlendirilen endüstri 4.0 teknolojisi ile ilgili pilot çalışmaların uygulanması aşamasındadır.
Seviye 4	İşletme değerlendirilen endüstri 4.0 teknolojisini birçok bölümde uygulamamaktadır.
Seviye 5	İşletmede değerlendirilen endüstri 4.0 teknolojisini tüm bölümlerde aktif olarak uygulamaktadır.

EK-17. FABRİKA 4.0 BOYUTU İÇİN UZMAN GÖRÜŞLERİ (TOPSIS YÖNTEMİ İLE)

Uzman	A1.1	A1.2	A1.3	A1.4	A1.5	A1.6	A1.7	A1.8	A1.9	A1.10	A1.11	A1.12	A1.13	A1.14	A1.15
1	3	4	5	4	3	4	4	2	3	2	4	2	3	3	2
2	3	3	5	4	3	4	4	2	3	2	4	2	3	4	3
3	4	5	5	4	4	4	4	2	3	2	4	2	4	3	2
4	3	3	4	4	3	3	4	2	4	2	4	3	4	4	2
5	4	3	5	5	3	4	4	2	4	2	3	3	4	3	3
6	4	3	4	4	3	3	4	3	4	2	3	2	3	3	2
7	4	4	4	5	3	3	5	2	4	2	3	2	3	4	3
Geometrik Ortalama Değerleri	3,54	3,50	4,54	4,26	3,13	3,54	4,13	2,12	3,54	2,00	3,54	2,25	3,39	3,39	2,38

EK-18. LOJİSTİK 4.0 BOYUTU İÇİN UZMAN GÖRÜŞLERİ (TOPSIS YÖNTEMİ İLE)

Uzman	A2.1	A2.2	A2.3	A2.4	A2.5
1	4	4	3	3	3
2	4	4	4	4	4
3	3	3	3	3	3
4	4	4	3	4	3
5	4	3	4	4	3
6	4	3	3	4	4
Geometrik Ortalama Değerleri	3,81	3,46	3,30	3,63	3,30

EK-19. YÖNETİM 4.0 BOYUTU İÇİN UZMAN GÖRÜŞLERİ

Uzman	A3.1	A3.2	A3.3	A3.4	A3.5	A3.6	A3.7
1	4	4	5	4	5	5	3
2	4	3	5	4	4	5	3
3	4	4	5	5	4	4	4
4	4	4	5	5	4	4	4
5	5	3	5	5	4	4	3
Geometrik Ortalama Değerleri	4,18	3,57	5,00	4,57	4,18	4,37	3,37

EK-20. OPERATÖR 4.0 BOYUTU İÇİN UZMAN GÖRÜŞLERİ (TOPSIS YÖNTEMİ İLE)

Uzman	A4.1	A4.2	A4.3	A4.4	A4.5	A4.6
1	3	4	3	3	3	4
2	2	4	3	3	3	4
3	2	5	3	2	4	3
4	3	4	3	3	4	4
5	2	4	4	2	3	3
6	3	4	3	3	3	3
Geometrik Ortalama Değerleri	2,45	4,15	3,15	2,62	3,30	3,46