



**T.C. İSTANBUL TİCARET
ÜNİVERSİTESİ**

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İMALAT SEKTÖRÜNDEKİ İŞLETMELERDE ENDÜSTRİ 4.0'A GEÇİŞ
İÇİN DİJİTAL OLGUNLUK SEVİYESİNİN BELİRLENMESİ:
YENİ BİR MODEL ÖNERİSİ.**

Adem KAYAR

**Danışman
Doç. Dr. Berk AYVAZ**

**Eş Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Fatih ÖZTÜRK**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
İSTANBUL - 2019**

KABUL VE ONAY SAYFASI

Adem KAYAR tarafından hazırlanan "**İmalat Sektöründeki İşletmelerde Endüstri 4.0'a Geçiş İçin Dijital Olgunluk Seviyesinin Belirlenmesi: Yeni Bir Model Önerisi**" adlı tez çalışması 30/01/2019 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde başarı ile savunularak, İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman **Doç. Dr. Berk AYVAZ**
İstanbul Ticaret Üniversitesi

Jüri Üyesi **Prof. Dr. Mustafa KÖKSAL**
İstanbul Ticaret Üniversitesi

Jüri Üyesi **Doç. Dr. Ali Osman KUŞAKÇI**
İbn Haldun Üniversitesi

Onay Tarihi: 11.02.2019

Prof. Dr. Necip ŞİMŞEK
Enstitü Müdürü

AKADEMİK VE ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı beyan ederim.

30.01.2019

Adem KAYAR

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER	i
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	4
3. DİJİTALİZASYON KAVRAMI VE ENDÜSTRİ 4.0.....	15
3.1. Endüstriyel Otomasyon ve Kontrol Sistemleri	15
3.1.1. PLC.....	15
3.1.2. Dağıtılmış giriş ve çıkış modülleri (I/O).....	16
3.1.3. HMI	18
3.1.4. Endüstriyel ağ.....	20
3.2. Endüstri 4.0	22
3.2.1. Endüstri 4.0'ın tarihçesi	22
3.2.1.1. Birinci sanayi devrimi	23
3.2.1.2. İkinci sanayi devrimi	23
3.2.1.3. Üçüncü sanayi devrimi	23
3.2.1.4. Dördüncü sanayi devrimi.....	24
3.2.2. Endüstri 4.0'ın vizyonu	24
3.2.2.1. Fabrika.....	24
3.2.2.2. İş.....	25
3.2.2.3. Ürünler	25
3.2.2.4. Müşteriler.....	25
3.2.3. Endüstri 4.0'ın sağladığı avantajlar	26
3.2.4. Endüstri 4.0'ın bileşenleri.....	26
3.2.4.1. Otonom robotlar	27

3.2.4.2. Simülasyon	27
3.2.4.3. Dikey ve Yatay Entegrasyon.....	28
3.2.4.4. Nesnelerin interneti (IoT)	28
3.2.4.5. Siber güvenlik	30
3.2.4.6. Bulut bilişim.....	30
3.2.4.7. Siber-Fiziksel yönetim sistemleri	31
3.2.4.8. Artırılmış gerçeklik.....	32
3.2.4.9. Büyük veri ve veri analitiği.....	32
3.2.5. Endüstri 4.0 dijital olgunluk modeli	33
4. METODOLOJİ.....	37
4.1. Karar Verme	37
4.1.1. Karar verme kavramı.....	37
4.1.2. Karar verme süreci ve adımları	38
4.1.3. Çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri	40
4.2. Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP)	42
5. UYGULAMA	51
5.1. Çalışmaya Katılan Uzmanlar	51
5.2. Endüstri 4.0 Dijital Olgunluk Modeli Kriter ve Alt Kriterleri	51
5.3. AHP ile Problemin Çözümü ve Sonuçları	55
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	62
KAYNAKLAR.....	67
EKLER	75
EK A. Çizelgeler.....	76
ÖZGEÇMİŞ.....	78

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

İMALAT SEKTÖRÜNDEKİ İŞLETMELERDE ENDÜSTRİ 4.0'A GEÇİŞ İÇİN DİJİTAL OLGUNLUK SEVİYESİNİN BELİRLENMESİ: YENİ BİR MODEL ÖNERİSİ

Adem KAYAR

İstanbul Ticaret Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Berk AYVAZ

Eş Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fatih ÖZTÜRK
2019, 78

Maliyetlerde azalma. Daha fazla üretim esnekliği. Daha verimli süreçler. Bunların hemen hemen her sektörde üretim yapan işletmelerin ortak talepleri olduğu bilinmektedir. Çok ciddi rekabetlerin olduğu bu pazar ortamında her sektörde karşımıza çıkan en önemli unsurun ise rekabetçilik olduğu görülmektedir. Rekabet avantajlarından en iyi şekilde yararlanmanın yolu ise, entegre ve yenilikçi elektrifikasyon, otomasyon ve dijitalleştirme çözümleri ile olabilmektedir. Endüstri 4.0 konsepti ile birlikte dijitalleşme çalışmaları endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemleri ile birlikte kullanılmaya başlanmış, böylece endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemleri ile bilgi teknolojileri birbirlerini destekleyen kavramlar haline gelmiştir. Mühendislik ve operasyonlardaki verimliliği arttırmayı, işletme maliyetlerini azaltmayı ve ürün kalitesini geliştirmeyi amaçlayan işletmelerde, endüstriyel otomasyon sistemlerine ve dijitalleşmeye geçişin ön plana çıktığı görülmektedir. Son yıllarda tüm Dünya'da gündemde olan, Endüstri 4.0 ve dijitalleşme çalışmalarının, üretim yapan işletmelerinde stratejik planları arasında yer aldığı gözlenmektedir. Üretim yapan işletmeler, Endüstri 4.0 ve dijitalleşme çalışmalarına başlamadan önce mevcut üretim sistemlerinin dijital seviyelerini bilmeyi ve yatırım planlarını buna göre yapmayı istedikleri görülmektedir.

Bu çalışmada üretim yapan işletmelerin Endüstri 4.0'a geçmeden önce, dijital olgunluk seviyelerini belirlemelerine yardımcı olmak için yeni bir model önerisinde bulunulmuştur. Daha sonra, çok kriterli karar verme metodlarından AHP kullanılarak önerilen modelde bulunan ana ve alt kriterlerin önem düzeyleri bulunmuştur. Aynı zamanda bu makalede anlatılan çalışma, son zamanlarda çok gündemde olan dördüncü sanayi devrimini gerçekleştirme çabasında olan kişilere yeni fikirler verecektir.

Anahtar Kelimeler: AHP, dijital olgunluk seviyesi, endüstri 4.0, endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemleri, IIoT

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

DETERMINING THE LEVEL OF DIGITAL MATURITY OF ENTERPRISES IN THE MANUFACTURING SECTOR FOR TRANSFORMATION TO INDUSTRY 4.0: A NEW MODEL PROPOSAL

Adem KAYAR

**İstanbul Commerce University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Industrial Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Berk AYVAZ

**Co-Supervisor: Assist. Prof. Dr. Fatih ÖZTÜRK
2019, 78**

Decrease in costs. More production flexibility. More efficient processes. It is known that these are common demands of enterprises producing in almost every sector. In this market environment where there are very serious rivalries, the most important factor encountered in every sector is competitiveness. The best way to benefit from competitive advantages is through integrated and innovative electrification, automation and digitalization solutions. In conjunction with the Industry 4.0 concept, digitalization studies have been used in conjunction with industrial automation and control systems, thus industrial automation and control systems and information technologies have become concepts that support each other. It is seen that the transition to industrial automation systems and digitalization is at the forefront in enterprises aiming to increase efficiency in engineering and operations, decrease operating costs and improve product quality. In recent years, it is observed that Industry 4.0 and digitalization studies, which are on the agenda all over the world, are among the strategic plans in the manufacturing enterprises. Production companies, Industry 4.0 and digitalization studies before starting to know the digital levels of existing production systems and investment plans to do so according to the wants.

In this study, a new model was proposed in order to help the production companies to determine their digital maturity levels before moving to Industry 4.0. Then, AHP was used for multi-criteria decision-making methods and significance levels of the main and sub-criteria found in the proposed model were found. At the same time, the work described in this article will give new ideas to people who have been trying to realize the fourth industrial revolution that has been on the agenda recently.

Keywords: AHP, digital maturity level, industry 4.0, industrial automation and control systems, IIoT

TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda her zaman yardımcı olan değerli Danışman Hocam Doç. Dr. Berk Ayvaz ve destekleriyle hep yanımda olan Doç. Dr. Ali Osman Kuşakcı ile Dr. Öğr. Üyesi Fatih Öztürk hocamıza sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini benden hiç esirgemeyen ve her zorlukta yanımda olan Sevgili Annem Meliha KAYAR başta olmak üzere tüm aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Ayrıca tezimin her aşamasında yardımlarını benden esirgemeyip, tüm vaktini benim için feda edip, değerli fikirleri ile şahsımı aydınlatan ve manevi anlamda desteğini hayatım boyunca en derinden hissettiğim eşim Beliz KAYAR'a çok teşekkür ederim.

Tezimin ortaya çıkmasında çok büyük emekleri olan MCS Factory Digitalization şirketimizin değerli çalışanlarından başta Hakan CEYHAN ve Özkan KAYACAN olmak üzere, tüm çalışma arkadaşlarıma ayrıca teşekkür ederim.

Adem KAYAR
İSTANBUL, 2019

ŞEKİLLER

	Sayfa
Şekil 3.1. Dağıtılmış I/O modüllerinin uygulama örneği.....	17
Şekil 3.2. Endüstri 4.0 modelinin değerlendirilmesi için üç adım prosedürü...	35
Şekil 4.1. Karar verme süreci temel adımları.....	40
Şekil 4.2. AHP hiyerarşik yapısı.....	43



ÇİZELGELER

	Sayfa
Çizelge 3.1. CPU 1510SP-1PN modelinin teknik özellikleri.....	16
Çizelge 3.2. Dağıtılmış I/O modülleri haberleşme protokolleri.....	18
Çizelge 3.3. KTP700 basic OP'nin teknik özellikleri.....	18-20
Çizelge 3.4. Profinet zamanlama özellikleri.....	21
Çizelge 3.5. Mevcut endüstri 4.0 hazırlık ve olgunluk modelleri.....	33-34
Çizelge 3.6. Schumacher olgunluk modelinin parametreleri	34-35
Çizelge 3.7. Önerilen olgunluk modelinin parametreleri ve açıklamaları.....	36
Çizelge 4.1. AHP'de mutlak sayıların temel ölçeği.....	44
Çizelge 4.2. İçeceklerin nispi tüketimi	44
Çizelge 4.3. İkili karşılaştırma matrisi.....	47
Çizelge 4.4. Normalleştirme yapılmış matris	48
Çizelge 4.5. Ağırlıklandırılmış toplam matris.....	48
Çizelge 4.6. Rastsal tutarlılık indeks değerleri.....	49
Çizelge 4.7. Görece önem değeri.....	50
Çizelge 5.1. Endüstri 4.0 dijital olgunluk modeli ana ve alt kriterleri.....	52
Çizelge 5.2. Ana Kriterlerin İkili karşılaştırma matrisi.....	55
Çizelge 5.3. Ana kriterlere ait durulaştırılmış değerler.....	55
Çizelge 5.4. Ana kriterlere ait normalize edilmiş matris.....	56
Çizelge 5.5. Normalize edilmiş ve önem düzeyleri hesaplanmış matris.....	57
Çizelge 5.6. Hesaplanan tutarlılık indeksi değerleri.....	57
Çizelge 5.7. Endüstri 4.0 olgunluk modeli ana kriterlerinin önem düzeyleri...	58
Çizelge 5.8. Strateji kriterinin alt kriterleri.....	59
Çizelge 5.9. İnovasyon kriterinin alt kriterleri	59
Çizelge 5.10. Organizasyon kriterinin alt kriterleri.....	60
Çizelge 5.11. Teknoloji kriterinin alt kriterleri.....	60
Çizelge 5.12. Operasyon kriterinin alt kriterleri.....	60
Çizelge 5.13. Personel kriterinin alt kriterleri.....	61

Çizelge EK A.1. Ana kriterlerin geometrik ortalaması.....	76
Çizelge EK A.2. Strateji alt kriterinin geometrik ortalaması.....	76
Çizelge EK A.3. İnovasyon alt kriterinin geometrik ortalaması.....	76
Çizelge EK A.4. Organizasyon alt kriterinin geometrik ortalaması.....	76
Çizelge EK A.5. Teknoloji alt kriterinin geometrik ortalaması.....	77
Çizelge EK A.6. Operasyon alt kriterinin geometrik ortalaması.....	77
Çizelge EK A.7. Personel alt kriterinin geometrik ortalaması.....	77



SİMGELER VE KISALTMALAR

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AHP	Analitik Hiyerarşik Proses
ANP	Analitik Ağ Süreci
APG	Anahtar Performans Göstergeleri
AR	Artırılmış Gerçeklik
BT	Bilişim Teknolojileri
CO ₂	Karbon di Oksit
ÇKKV	Çok Kriterli Karar Verme
ÇKGKV	Çok Kriterli Grup Karar Verme
EOKS	Endüstriyel Otomasyon ve Kontrol Sistemleri
GKV	Grup Karar Verme
HMI	İnsan Makine Arabirimi
ICT	Bilgi ve İletişim Teknolojileri
I/O	Giriş/Çıkış
IOT	Nesnelerin İnterneti
KRG	Kilit Risk Göstergeleri
KV	Karar Verme
LÖF	Lojistik Öğrenme Fabrikası
NRT	Gerçek Zaman Değil
PLC	Programlanabilir Lojik Kontrol Sistemleri
PLM	Ürün Yaşam döngüsü Yönetimi
PN	Profinet
RT	Gerçek Zaman
SFS	Siber Fiziksel Sistemler
SFÜS	Siber Fiziksel Üretim Sistemleri
TDK	Türk Dil Kurumu

1. GİRİŞ

Dünyanın her yerinde üretim yapan işletmeler, globalleşen Dünya ekonomisi içinde çok ciddi rekabet şartları ile karşı karşıya kalmaktadırlar. Bu işletmeler, rekabet ettikleri firmalara göre daha avantajlı hale gelebilmeleri için, üretim maliyetlerinde azalmayı, daha fazla üretim esnekliğini ve daha verimli süreçleri sağlamak zorundadırlar. Bunların hemen hemen her sektörde üretim yapan işletmelerin ortak taleplerinden biri olduğu görülmektedir. Çok ciddi rekabetlerin olduğu bu pazar ortamında her sektörde karşımıza çıkan en önemli unsurun ise rekabetçilik olduğu görülmektedir. Rekabet avantajlarından en iyi şekilde yararlanmanın yolu ise, entegre ve yenilikçi elektrifikasyon, otomasyon ve dijitalleştirme çözümleri ile olabilmektedir.

Dünyanın birçok yerinde üretim yapan şirketler, çevresel, toplumsal, ekonomik ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak büyük zorluklarla karşı karşıya kalmaktadırlar. Bu zorlukları aşabilmenin en önemli yolu, tüm üretim süreçlerinin izlenebilmesi ve tüm değer zincirlerini hızlı ve duyarlı bir şekilde yönetme yeteneklerine sahip olabilmeleridir. Şirketler, inovasyondan üretime ve dağıtımdan tüm yaşam döngüsü boyunca yakın iş birliği ve hızlı adaptasyona izin veren sanal ve fiziksel yapılara ihtiyaç duyacaktır (Gligor ve Holcom, 2012). Mühendislik ve operasyonlardaki verimliliği arttırmayı, işletme maliyetlerini azaltmayı ve ürün kalitesini geliştirmeyi amaçlayan işletmeler için endüstriyel otomasyon sistemleri ve dijitalleşme ön plana çıkan en önemli unsurlardır. Proses kontrol ve otomasyon sistemlerini kullanarak, üretim organizasyonları sistemleri daha düşük maliyetle yönetilebilir, süreç bilgisi optimize edilebilir ve enerji verimliliği artırılabilir (Edgar ve Pistikopoulos, 2018). Proses ve tesis verilerini analiz edip etmemek, sistem bileşenlerini uygulamak ya da sadece süreçleri geliştirmek gibi alınan kararlarda, dijital hizmetler giderek daha önemli bir rol oynamaktadır. Dördüncü sanayi devrimi olarak tanımladığımız Endüstri 4.0, ilk olarak Alman Hükümeti tarafından 2011 yılında dünyaya tanıtılmıştır (Qin vd. 2016). Buhar gücüyle çalışan mekanik sistemlerin kullanımı ile başlayan endüstri devrimi, elektriğin icadı, elektronikleşme ve bilgi teknolojilerinin

endüstriye entegrasyonu ile günümüzdeki halini almıştır. Tarih boyunca sektörel gereksinimlerin; hızlı, güvenilir ve yenilikçi bir anlayış ile karşılamaya çalışan endüstri, hızla gelişen teknoloji olanakları sayesinde şimdilerde yeni bir sanayi devrimi olan Endüstri 4.0'in başlangıcındadır. Endüstri 4.0, modüler yapıları akıllı fabrikalarda, fiziksel işlemleri siber-fiziksel sistemler ile izleyerek, nesnelerin birbirleriyle ve insanlarla iletişime geçmesini ve bu sayede de merkezi olmayan kararların verilmesini yani akıllı üretimi hedeflemektedir. Tamamen birbirine entegre ve endüstriyel ağına bağlı üretim yapan fabrikalar, makineler ve cihazlar, minimum manuel müdahale gerektiren akıllı ve kısmen özerk bir şekilde hareket edebilecektir (Monostori, 2014). Endüstri 4.0 olarak bilinen dördüncü sanayi devrimi, yenilenebilir enerji kaynaklarını entegre ederek sürekli büyüyen enerji talebini yönetmek için modernleştirilmiş enerji şebekesinin sistematik bir şekilde uygulanmasının önünü açmaktadır (Faheem vd. 2018). Nesnelerin İnterneti (IoT), endüstriyel internet, bulut temelli üretim (Gao vd. 2015) ve akıllı üretim gibi yeni kavramlar kısmen bu gereklilikleri ele alır ve genellikle bir dördüncü endüstri devrimi'nin vizyoner kavramı tarafından sınıflandırılır. Endüstri 4.0, internet ve destekleyici teknolojilerin, fiziksel nesnelere, insan aktörleri, akıllı makineleri, üretim hatlarını ve üretim hatlarını bütünleştiren bir omurga olarak hizmet ettiği son teknolojik ilerlemeleri ifade etmektedir (Schumacher vd. 2016).

Akıllı üretim, gerçek zamanlı ve yüksek değerli destek sistemlerini kullanarak, müşteri taleplerine hızlı yanıt veren, enerji ve malzeme kullanımını en aza indiren, sürdürülebilirliği, üretkenliği, yeniliği ve ekonomik rekabeti radikal bir şekilde geliştiren, koordineli ve performans odaklı bir üretim girişimini mümkün kılmıştır (Yuan vd. 2017). Mühendislik ve operasyonlardaki verimliliği arttırmayı, işletme maliyetlerini azaltmayı ve ürün kalitesini geliştirmeyi amaçlayan işletmeler, endüstriyel otomasyon sistemlerine ve dijitalleşmeye yatırım yapmak istemektedirler.

Son yıllarda tüm Dünya'da gündemde olan, Endüstri 4.0 ve dijitalleşme yatırımlarının, üretim yapan işletmelerin stratejik planları arasında yer aldığı gözlenmektedir. Üretim yapan işletmeler, Endüstri 4.0 ve dijitalleşme

çalışmalarına başlamadan önce mevcut üretim sistemlerinin dijital seviyelerini bilmeyi ve yatırım planlarını buna göre yapmayı istemektedirler. Bunun için üretim yapan işletmeler, dijital olgunluk seviyelerinin belirlenmesi için danışmanlık firmalarından ya da dijitalizasyon konusunda uzman olan firmalardan hizmet talep etmektedirler. Bu konularda hizmet verebilecek firmaların sınırlı olması, dijital seviyelerin belirlenmesi için farklı branşlarda uzmanlık gerektirmesi, bu hizmetlerin çok pahalı olmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı birçok üretim yapan işletmeler bu hizmeti alamamakta ya da dijital olgunluk seviyelerini belirlemeden, dijital dönüşüm için yatırım kararı almaktadırlar. Bu gibi durumlarda da ya hatalı uygulamalarla, dijital dönüşümde başarılı olamamaktalar ya da sonradan büyük ek maliyetlerle karşı karşıya kalmaktadırlar.

Bu çalışmada üretim yapan işletmelerin Endüstri 4.0'a geçmeden önce, dijital olgunluk seviyelerini belirlemelerine yardımcı olmak için yeni bir model geliştirilmiştir. Bu model ile, üretim yapan işletmeler, danışmanlık ya da uzman firmalardan destek almadan ve herhangi bir ödeme yapmadan, mevcut üretim sistemlerinin dijital olgunluk seviyelerini öğrenebilmektedirler. Bu modelin oluşturulmasında, endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemlerinde ve dijital fabrika uygulamalarında 20 yılı aşkın süredir konusunda uzman olan 3 kişilik bir ekip çalışma yapmıştır. Önerilen model; üretim yapan işletmelerin dijital olgunluk seviyelerini belirlemek için 6 ana kriter ve her bir kriterle ait 3 alt kriterden oluşmaktadır. Strateji, inovasyon, organizasyon, teknoloji, operasyon ve personel olmak üzere altı ana kriter modelin temelini oluşturmaktadır. Modelin uygulaması, web tabanlı bir yazılımla gerçekleştirilmiştir. Uzmanların verdikleri kararların geometrik ortalaması alınarak ana ve alt kriterlere ait tek bir karar değeri elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen değerler çok kriterli karar verme metodlarından AHP kullanılarak, ana ve alt kriterlerin önem düzeyleri bulunmuştur. Çalışmanın bundan sonraki bölümlerinde, Endüstri 4.0 ve olgunluk modelleri ile ilgili literatür taraması yapılmıştır. Üçüncü bölümde dijitalizasyon kavramı ve Endüstri 4.0 hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde metodoloji anlatılmıştır. Beşinci bölümde uygulama ve çözüm sonuçları açıklanmıştır. Son bölümde ise sonuç ve öneriler aktarılmıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Basl (2017), çalışmasında Çek Cumhuriyeti'ndeki bazı seçkin firmaların Endüstri 4.0 ilkelerini uygulamak için hazır olup olmadığının araştırıldığı anketin sonuçlarını açıklamaktadır. Bu çalışmada Çek firmalarında Endüstri 4.0 prensiplerinin kavranması ve bu yeni trend için Çek şirketlerinin genel hazırlık çalışmaları ele alınmıştır. Bunun için web sayfasında dört sorudan oluşan bir anket düzenlenmiştir. Veri toplama çalışması Haziran/Temmuz 2016'da tamamlanarak web formu doldurularak gerçekleştirilmiştir. Toplamda 161 şirket ele alınmış ve 25'i ankete tam cevap vermiş, bu da %15,5'lik bir cevap oranı sağlamıştır. Genel olarak, seçilen işletmelerden elde edilen bu bilgiler, Çek şirketlerinin Endüstri 4.0 olarak bilinen bu yeni trendin varlığına yüksek bir farkındalığa sahip olduklarını göstermiştir. Bu farkındalık, ortalama çalışan seviyesinden çok, üst düzey yönetimde kendini göstermiştir. BASL'a göre, şirketler hala kendi Endüstri 4.0 stratejisine sahip değiller ve Endüstri 4.0'ın ilkelerinin daha da derinleştirilmesiyle ilgilenecek sorumlu kişileri tahsis etmiyorlar.

Davies vd. (2017), yaptıkları bu çalışmada, Endüstri 4.0 altyapısını incelemiş ve uygulamadan kaynaklanan potansiyel maliyet ve verimlilik artışlarının ötesinde, rekabet avantajı yaratmak için Endüstri 4.0'ı iç yeteneklerden yararlanabilme perspektifinden ileri sürüldüğünü savunmuşlardır. Endüstri 4.0 ve yalın üretim metodlarının, endüstri 4.0 uygulaması için yalın yöntemlerin sağlayıcısı olduğu ve karşılıklı olarak destekleyici olarak sunulduğu ve tersine, Endüstri 4.0, genişletilmiş yalın işletmeyi gerçekleştirdiğini savunmuşlardır. Ayrıca, Endüstri 4.0'ın teknik yönlerini takdir etmenin yanı sıra, başarılı bir uygulama sağlamak için sosyo-teknik gereklilikleri anlamak gerektiğini de ileri sürmektedirler. Yalın/altı sigma girişimleri ile Endüstri 4.0 arasındaki ilişki değerlendirilmiş ve metodolojilerin karşılıklı olarak destekleyici olduğunu belirtmişlerdir.

Schumacher vd. (2016), yaptıkları çalışmada üretim şirketlerinin Endüstri 4.0'a hazır olup olmadığını değerlendirmek için olgunluk modeli önermişlerdir. Sanayi 4.0 olgunluğunu değerlendirmek için 9 boyut tanımlayıp, 62 ürün atamışlardır.

Değerlendirmede “Ürünler”, “Müşteriler”, “Operasyonlar” ve “Teknoloji” boyutlarına ek olarak, “Strateji”, “Liderlik”, Yönetim, “Kültür” ve “İnsan” boyutlarını oluşturmuşlardır. Yaptıkları bu çalışmada, üretim işletmelerinin Endüstri 4.0 olgunluğunu değerlendirmek için bir olgunluk modeli aracı geliştirmişlerdir. Modelde, sistematik bir literatür taraması, kavramsal modelleme ve ampirik validasyon için niteliksel ve niceliksel yöntemler içeren multimethodolojik bir yaklaşım kullanmışlardır. Bununla ilgili ilk deneyimlerin, imalat şirketlerinin kendi değerlendirmelerinin sonuçlarını daha ileri stratejik tedbirler için sağlam bir referans noktası olarak kullanabildiklerini göstermişlerdir.

Tupa vd. (2017), Endüstri 4.0 kavramı için risk yönetimini uygulamak için anahtar unsurlar ve çerçeve tasarımı ile ilgili Endüstri 4.0 üzerine araştırma yapmışlardır. Yaptıkları bu çalışmada, Endüstri 4.0 kavramı ile ilgili risk yönetimi üzerine araştırma yapmışlar ve ilgili risk yönetimi uygulamasının tüm yönlerini bulmaya çalışmışlardır. Endüstri 4.0 kavramının literatür taramasında, dinamik, gerçek zamanlı optimize edilmiş ve kendi kendini organize eden, şirketler arası değer yaratma ağları oluşturan insanların, nesnelere ve sistemlerin bağlantısının tüm süreçler üzerinde etkili olabileceği sonucuna ulaşmışlardır. Yaptıkları analizler sonucunda, üretim alanındaki ortak risk faktörlerinin çoğunluğunun bilgi güvenliği ile ilgili olduğunu tespit etmişlerdir. Bu riskler, veri bütünlüğü kaybı gibi siber saldırılarla ilişkilidir. Ayrıca, Endüstri 4.0'da risklerin daha sık ortaya çıkabileceği varsayımında bulunmuşlar, risk yönetimi sürecinin içeriği ve çalışmasının da değişeceğini belirtmişlerdir.

Performans durumunda, performans ölçümü ile ilgili risk yönetiminin uygunluğunu ve uygulanmasını arttırmak için Anahtar Performans Göstergeleri (APG) ve Kilit Risk Göstergeleri (KRG) bağlantısı için şirketlerin bir araç bulundurması gerektiğini vurgulamışlardır.

Ganzarain ve Errasti (2016), kobilerin Endüstri 4.0'a geçişte üç aşamalı olgunluk modeli ile ilgili çalışma yapmışlardır. Endüstri 4.0'da çeşitlendirmeye yönelik yeni fırsatları belirlemek için şirketleri yönlendirecek bir aşama süreci modeli önermişlerdir. Sistematik olarak bu aşamaları yürütmek, bir şirketi kendi

endüstri vizyonu ve Endüstri 4.0 senaryosundaki farklı şirketler arasındaki vizyon ve işbirlikçi vizyonuna götüreceğini belirtmişlerdir.

Olgunluk modellerinin Endüstri 4.0'a uygulanması, kurumların bu metodolojiyi kendi kültürlerine entegre etmelerine yardımcı olabileceğini ve sonuçların, şirkete özgü bir Endüstri 4.0 vizyonu ve spesifik proje planlamasının geliştirilmesinde rehberli destek için gerçek bir ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir.

Bogner vd. (2016), Almanya'daki imalat endüstrisindeki mevcut dijitalleşme derecesi üzerine anket çalışması yapmışlardır. Başlangıçta dikey değer zincirini ve üretim sürecini belirli alt süreçlere ayıran bir anket konsepti geliştirmişlerdir. Bu anketin sonuçları, Almanya'daki dördüncü sanayi devriminin eylem çağrısını, uygulama durumunu ve gerçekleştirilmiş çözümlerini kısaca sunmaktadır. Dördüncü sanayi devriminde, özellikle küçük ve orta ölçekli üretim şirketlerinde dijital dönüşüm ayrıntılı bir şekilde anlaşılmadığını belirtmişlerdir. Dördüncü sanayi devrimi, otomasyon, yaygın ağ oluşturma ve merkezi olmayan kontrol mekanizmaları ile ürün ve süreçlerin esnekliğinde sistematik bir artış ve bilgi ve iletişim teknolojileri yoluyla veri toplama ve entegrasyon olarak tanımlamışlar ve bu tanıma dayanarak bir çalışma konsepti geliştirmişlerdir. Bu çalışmanın amacı, karar vericilere bilgi vermektir. Çalışma için Almanya merkezli 211 üretim şirketi ile görüşme yapılmıştır. Bu şirketler farklı sektörlerden oluşmaktadır. Sadece orta ve büyük ölçekli firmalarla görüşmeler yapılmış, orta ölçekli küçük ölçekli şirketler dikkate alınmamıştır. İncelenen şirketlerin yaklaşık yüzde 90'ının kısmen veya hatta yüksek oranda otomatikleştirilmiş üretim süreçleri olduğu gözlenmiştir. Satış ve ürün geliştirme sonrası pazarlama alanları en düşük otomasyon derecesini göstermektedir. Öte yandan, üretim süreci boyunca otomasyon derecesinin incelenmesi, şirketlerin yüzde 20'sinden daha azının entegre bir mühendislik ve dördüncü sanayi devrimi için koşulları sağladığını belirtmişlerdir.

Wank vd. (2016), küçük ve orta ölçekli işletmelere Endüstri 4.0 yaklaşımlarını aktarmak için bir e-öğrenme ile ilgili bir araştırma projesini ele almışlardır.

Bu, bir fabrikada, zaten var olan bir üretim ayarını başlangıç noktası olarak alan ve Endüstri 4.0 yaklaşımlarını kullanarak optimize etmeyi amaçlayan bir

araştırma projesidir. Burada odaklanan yaklaşımın temel özelliği, bir yeşil alan uygulaması yerine bir proses öğrenme fabrikasının mevcut bir üretim ortamı içindeki kahverengi alan uygulamasıdır. Çeşitli proses aşamaları ve halihazırda uygulanan bir Bilişim Teknolojisi (BT) altyapısına sahip bir pnömatik silindirin üretimi için değer zinciri verilmiştir. Bu araştırma projesine dayanarak, Endüstri 4.0 konseptlerinin küçük ve orta ölçekli işletmelere devredilmesine odaklanan bir yetkinlik merkezi oluşturulmaktadır. Bölgenin yapısal analizine dayanarak, KOBİ'lerin ve zanaat sektörünün dijitalleşme bağlamında harekete geçme ihtiyaçlarını tespit etmişlerdir. Bu ihtiyaçlar, bölgesel odalar, işçi sendikaları ve diğer çarpanları içeren disiplinler arası bir konsorsiyum tarafından ele alınacaktır. Yetkinlik merkezinin genel amacı, bölgesel KOBİ'lerin rekabet gücünü arttırmaktır. Dijitalleşme ve birbirine bağlılık fırsatlarını tanıma ve ilgili kavramları bireysel olarak uygulama yeteneklerine odaklanmaları gerektiğini ifade etmişlerdir. KOBİ'lerin, kendi değer yaratma süreçlerini daha verimli hale getirmek ve yeni pazar fırsatları ile müşteri değerini artırmak için mevcut internet teknolojilerine dayanan iletişim yetenekli nesnelere nasıl bağlayabileceklerini öğrenmeleri gerektiğini vurgulanmıştır.

Park (2016), birbiri ile bağlanmış akıllı fabrikaların kullanımında Kore üretim endüstrisinde yenilikçi stratejilerin geliştirilmesine yönelik yaptığı bu çalışmada, üç entegrasyondan (üretim sisteminin entegrasyonu, ürün yaşam döngüsünün entegrasyonu, şirketler arası değer zincirinin entegrasyonu) bahsetmiş ve hiper bağlantılı bir akıllı fabrikanın başarısı için anahtar faktörler olduğunu belirtmiştir. Bu faktörlerden birincisinin, dikey entegrasyon kabiliyeti olduğunu ifade eden Park, bir üretim sisteminin (sensör-kontrol-MES-ERP) dikey entegrasyonunu ve özelleştirilmiş üretimi ve geleneksel statik üretim süreçlerine cevap verme yeteneğini temsil ettiğini belirtmiştir. İkincisinin, ürün yaşam döngüsünü bütünleştirme yeteneği, ürün yaşam döngüsünün kurumsal entegrasyonundan sonra tam bilgi alışverişi yoluyla özel üretimin optimizasyonu anlamına geldiğini, son olarak, yatay entegrasyonun, şirketler arası değer zinciri ve bilgi ağını entegre ettikten sonra şirket içi yakın iş birliği ile ürün ve hizmetlerin zamanında sağlanabilme yeteneğini ifade etmiştir. Bu bakış açısıyla,

yaptığı bu çalışmada hiper bağlantılı akıllı fabrikanın başarılı bir şekilde tanıtımı için kritik olan başarı faktörlerini önermiştir.

Schuhmacher ve Hummel (2016), yaptıkları çalışmada, lojistik sektöründe öğrenen fabrikaların siber-fiziksel sistemleri (SFS) ile merkezi olmayan kontrolünü ele almışlardır. Bu SFS'nin siber-fiziksel üretim sistemlerine (SFÜS), değişen üretim sistemlerini ve yeni insan-makine-işbirliği biçimlerini planlamak, kontrol etmek ve izlemek için yenilikçi yöntemler gerektiren gelecekteki iş ve lojistik sistemlerinde köklü değişikliklere yol açtığını, özellikle lojistik sistemlerin, SFÜS'nin çok yönlülüğüne uymak zorunda olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca, Almanya'da Reutlingen Üniversitesinde bulunan ESB Lojistik Öğrenme Fabrikasını (LÖF) örnek uygulama olarak ele almışlardır. ESB Lojistik Öğrenme Fabrikası gibi öğrenme fabrikalarının, risksiz ve gerçeğe yakın bir fabrika ortamında yeni yöntemler ve yenilikçi teknik çözümler geliştirmek ve tecrübe ve bilgi aktarımı için çok çeşitli olanaklar sunduğundan bahsetmişlerdir. Gelecek yıllarda, LÖF'nin dijital ve fiziksel öğrenme fabrikası ortamı, SFÜS ile ilgili teknolojiler ve yöntemler için eğitim, öğretim, araştırma ve demonstrasyon ortamı olarak hizmet vermek üzere kademeli olarak çapraz bağlı, merkezi olarak kontrol edilen bir SFÜS'ye aktarılabilceğini belirtmişlerdir. LÖF 'nin başlıca araştırma öncelikleri; üretim, montaj ve lojistik süreçleri için merkezi olmayan kontrol yöntemlerinin geliştirilmesinin yanı sıra, gerçeğe yakın koşullar altında geliştirilecek, test edilecek ve onaylanacak olan iş ve lojistik sistemleri için yenilikçi insan-makine iş birliği yöntemlerinin geliştirilmesi gerektiğini vurgulamışlardır.

Shariatzadeh vd. (2016), nesnelerin İnterneti üzerine kurulu akıllı fabrikada, dijital bir fabrikanın entegrasyonu ile ilgili çalışma yapmışlardır. Üretimde, nesnelerin internetini (IoT), her gün, fiziksel nesnelerin, insanların ve sistemlerin üretim için kritik öneme sahip hizmetler üretmek üzere İnternet tarafından bağlandığı bir gelecek olarak tanımlamış, akıllı fabrika, IoT ile çok uyumlu olan bir fabrikaya doğru bir yol olduğunu, IoT'nin sadece fiziksel nesnelere arasında akıllı bağlantılarla değil, aynı zamanda dijital fabrikada kullanılan farklı Bilişim Teknolojileri (BT) araçlarıyla etkileşim ile de ilgilendiğini belirtmişlerdir.

Yaptıkları bu çalışmada, neyin, ne zaman ve nasıl, bilginin entegre edilmesi gerektiğini belirlemeye yönelik bir yaklaşım önermişlerdir. Aynı zamanda, anlamsal web teknolojilerini kullanan IoT ve PLM (Product Lifecycle Management) platformları ile takım olarak birlikte çalışabilirliğinde yaşam döngüsü iş birliği için açık hizmetler standardını birleştirmeyi önerildiğini söylemişlerdir. Akıllı bir fabrika (gerçek zamanlı veri) ile dijital bir fabrika arasında üç katmanda, birlikte çalışabilirliğini sağlamak için dikkate alınması gerektiğinin altını çizerek, ilkinin veri aktarımı protokolleri, ikincisinin, veri temsili ve sunumu, üçüncüsünün de semantikler ve verilerin anlaşılması olduğunu belirtmişlerdir.

Gjeldum vd. (2016), Hırvatistan'ın imalat sanayisinin, rekabet gücü üzerinde büyük etkisi olan birçok sorunla ve engellerle karşı karşıya olduğunu, özellikle üretim ve yönetim alanlarında yetersiz eğitilmiş ve vasıfsız personelin, küresel pazarda hayatta kalmak için gerekli olan rekabet gücünü azalttığını belirtmişlerdir. Eğitilmiş ve vasıflı personel yetiştirmek için, yalın öğrenme fabrikası olarak özel bir öğrenme ortamı oluşturarak, yani özel bir ekipmanla gerçek bir fabrikanın simülasyonunu tasarlamışlardır. Yalın öğrenme fabrikası, yalın yönetimin araç ve yöntemlerini kullanarak deneysel ve problem tabanlı öğrenmeyi vurgulayarak bölgesel kalkınmada önemli bir kural yürütme potansiyeline sahiptir. Ürün yaşam boyu yönetimi için donanım ve yazılım ile donatılmış olup, 3 boyutlu tarayıcı kullanarak ek üretim süreci ve tersine mühendislik ile hızlı prototipleme ile güçlendirmişlerdir. Didaktik tabanlı ekipman ve oyunlar, öğrenci veya endüstri çalışanı tarafından yalın araçlar ve yöntemlerin uygulanması için bir platform sağlamıştır. Her nasılsa, gömülü uygulamalı simülasyon oyunları ile öğrenme sürecinin ciddiyeti, oyuncaklar kullanılarak gerçekleştirildiği için tehlikeye girebileceğini söyleyip, gerçek ürünler için montaj hattı, özellikle endüstri çalışanları olmak üzere öğrenciler tarafından daha çok kabul göreceğini belirtmişlerdir.

Prinz vd. (2016), endüstri 4.0 akıllı fabrikalar için öğrenen fabrika modülleri ile ilgili yaptıkları bu araştırmada, şu anda, birçok şirkette bilgi ve iletişim teknolojisi gibi birçok teknolojinin mevcut olduğunu, ancak şirketlerin, Endüstri 4.0'ın

başarılı bir şekilde kullanımına yönelik zorluklarla karşı karşıya olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle, öğrenen fabrikaların Endüstri 4.0'ın anlaşılmasına yönelik önemli bir katkı sağlayabildiğini, öğrencilere ve çalışanlara öğretmek için daha sık kullanılabilceği üzerinde durmuşlardır. Yaptıkları bu çalışmada, Endüstri 4.0 akıllı fabrika için çeşitli öğrenme modülleri sunmuşlardır. Verimlilik, esneklik ve kalitenin sürekli artması Alman üretim sanayisi için önemli bir faktör olduğunu belirtip, devam eden dijitalleşme ve üretim süreçlerinin birbirine bağlanmasının Alman şirketlerinin işini zorlaştıracağını ve Endüstri 4.0'ın karmaşıklığının, yeni teknoloji, işyeri ve iş modeli geliştirmelerine yol açacağını belirtmişlerdir.

Liebrecht vd. (2017), endüstri 4.0 kavramından yola çıkarak belirsizlik altında imalat sistemleri 4.0'ın çok ölçütlü değerlendirilmesi ile ilgili çalışma yapmışlardır. Rekabetçi sanayi şirketlerinin varlığı için Üretim Sistemleri 4.0'ın tanıtılmasının esas olduğunu ve bununla birlikte, Üretim Çözümleri 4.0'ın faydaları hakkında bilginin sınırlı olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları bu çalışmada, imalat için bir değerlendirme yöntemi sunmuşlardır. Sunulan değerlendirme yöntemi, bir vaka çalışması şeklinde bir siber-fiziksel adaptasyon yatırımı ile ilgili yarı otomatik montaj hattında uygulanmıştır. Ana montaj hattı yedi manuel, bir yarı otomatik, iki tam otomatik çalışma istasyonu ve bir manuel kalite kontrol istasyonu içermektedir. Siber-fiziksel adaptasyon olarak, üretilen parçaların takibi için, parçalar RFID ile donatılmıştır. Hızlı üretim kontrolü ve bilgi dağıtımını sağlamak için bir Üretim Yürütme Sistemi yerleştirilmiştir. Makine kurulum prosedürleri ve kalite kontrol istasyonu, video-optik girişe bağlı olarak tamamen otomatiktir. Değerlendirme süresi dört yıldır. Kritik seçim, siber-fiziksel teknolojilerin avantajlarını tam olarak değerlendirmek için on altı niteliksel ve niceliksel, parasal olmayan kriterler ile sonuçlandırılmıştır. Değerlendirme modeli, dilsel belirsizliği değerlendirmek için fuzzy set teorisini ve stokastik belirsizliği betimlemek için beta dağılımları yoluyla stokastik modellemeyi içermektedir. Parasallaştırma fonksiyonları, on altı parasal olmayan kriterlerin her biri için tanımlanmıştır. Toplama, bir Monte-Carlo Simülasyonu ile yürütülmüş ve sonuçlar, histogramlar ve değerlendirme portföyü olarak görüntülenmiştir. Son olarak, sonuçların değerlendirilmesi için

risk oranı hesaplanmıştır. Değerlendirilen imalat sisteminin risk ve potansiyellerini analiz etmek için çeşitli risk göstergeleri ve analizleri önerilmiştir.

Weber vd. (2017), veriye dayalı üretim için bir olgunluk modeli geliştirmişlerdir. Global bir pazarda rekabet edebilmek için şirketlerin, Bilişim Teknolojileri (BT) mimarilerini Endüstri 4.0'ın özelliklerine göre ayarlamaya çalıştığını ve bu, değer zincirinin yatay ve dikey entegrasyonunu ve tüm ürün yaşam döngüsü boyunca verilerin yönetimini içeren, veriye dayalı bir üretim modelinin uyarlanması anlamına geldiğini belirtmişlerdir. Şu anda şirketlerin, BT mimarilerinin bu dönüşümünde iki büyük sorunla karşı karşıya kaldıklarını söyleyerek, bu sorunları şöyle sıralamışlardır.

1. Endüstri 4.0 için, uygunluğu basit bir şekilde değerlendirilmemiş olan birden fazla referans mimarisi vardır.
2. Veri odaklı BT mimarilerini objektif olarak değerlendirmek için olgunluk modelleri yoktur.

Yaptıkları bu çalışmada, birden fazla referans mimarisinde Endüstri 4.0 özelliklerine genel bir bakış sunarak ve veri odaklı üretim için BT mimarileri için bir olgunluk modeli geliştirmişler bu sorunları ele almışlardır. Öncelikle, mevcut olgunluk modellerine, veriye dayalı üretimin bakış açıları hakkında genel bir bakış sunmuşlardır. Bu genel bakışa dayanarak, Endüstri 4.0 için üç referans mimarisini incelemişlerdir:

- a) endüstriyel internet referans mimarisi
- b) referans mimari modeli Endüstri 4.0
- c) üretim için Stuttgart BT mimarisi

Suginouchi vd. (2017), otonom mekanizmasını kullanan operasyon metotları ve akıllı fabrika kavramını ele alarak, özel kauçuk ayakkabı üretimi için akıllı üretim sistemleri ile ilgili bir uygulama önermişlerdir. Bilgi ve iletişim teknolojisinin gelişmesiyle, akıllı algılama cihazlarıyla gömülü imalat makineleri ve ürünleri birbirine bağlanabilir ve her bir makine ve ürünün mevcut koşullarının ve değişikliklerinin edinebilir olduğunu belirtmişlerdir. Bu makalede, kullanıcıların zevklerini geliştirmek için birlikte oluşturma kavramına odaklanıp Siber Fiziksel

Sistemler (SFS) tabanlı akıllı fabrika modeli sistemini tanımlamışlardır. Simüle edilmiş üretim makinelerinin ve ürünlerinin mevcut koşullarını ve değişikliklerini RFID sistemleri kullanarak elde etmişlerdir. Akıllı fabrika sistemi ve kombinatorial açık artırma kullanılarak bir üretim planlama yöntemi önerilmiştir. Simüle edilmiş deneylere dayanan sonuçlar, sipariş sayısı 50 olduğunda, kesin çözümün %102,6'sında hedef işlev değerinin elde edilebildiğini göstermiştir.

Leineweber vd. (2018), bir evrimsel olgunluğa dayalı Endüstri 4.0 geçiş modeli için konsept çalışması yapmışlardır. Endüstri 4.0'ın imalat sanayisinde popüler bir konu olmasına rağmen, özellikle küçük ve orta ölçekli işletmelerin, bu konunun kapsamlarının farkında olmadıklarını belirtmişlerdir. Sonuç olarak, Endüstri 4.0'a doğru nasıl gelişeceğini bilmediklerini ve çoğunlukla, ilk ilerleme girişimleri, sosyo teknik yaklaşımın üç boyutu (teknoloji, organizasyon, çalışanlar) arasındaki karşılıklı bağımlılık bilgisi eksikliğinden dolayı başarısız olduğunu söylemişlerdir. Bu nedenle, bu çalışma evrimsel olgunluğa dayalı göç modeli için bir kavram ortaya koymakta, bu da işletmeleri teknoloji, organizasyon ve çalışanların boyutları dikkate alınarak Endüstri 4.0'a yönlendirmektedir. Bu bağlamda, model aynı zamanda kriterlerin çeşitli özelliklerinin bağımlılıklarını da göz önünde bulundurmakta ve bu nedenle Endüstri 4.0'a giden yollarda ve daha önce yapılması gereken diğer adımlar için işletmelerin potansiyel olarak sonraki adımlarını ortaya koymuştur. Ana hedefin, özellikle küçük ve orta ölçekli işletmelerin, dış danışmanlık kullanmadan, Endüstri 4.0'a doğru gelişmesini sağlamak olduğunu belirtmişlerdir.

Leipzig vd. (2017), işletmelerde müşteri odaklı dijital dönüşümün başlatılması başlıklı çalışmada, dijitalleşmede karşılaşılan sorun ve zorluklara değinmişler ve işletmelerde dijital dönüşümü başlatmak için bir model geliştirmişlerdir. Model sürekli bir iyileştirme döngüsüne dayanmaktadır ve aynı zamanda girişim içinde yenilikçi ve dijital düşünme için tetikleyicileri de içermektedir. Modelin, Alman hizmet sektöründe başarıyla doğrulandığını belirtmişlerdir. Geliştirilen kavramsal modelin ilk validasyonu olarak, Alman hizmet sektöründe bölgesel olarak odaklanmış bir şirkette uygulanmıştır. Model hiçbir şekilde dijitalleşmeyi

tamamlamaya yönelik bir yol haritası değildir. Bunun yerine, dijital bir strateji ve vizyonun formüle edilebileceği bir noktaya yaklaşmak için bir başlangıç noktası ve prosedürü olan net bir dijital strateji veya vizyona sahip olmayan şirketlere sunulabileceğini belirtmişlerdir.

Schuh vd. (2017), bir öğrenme fabrikası morfolojisinde hibrid üretim altyapısının sınıflandırılması ile ilgili yaptıkları bu çalışmada, öğrenen fabrikaların, yeni teknolojilerin test edilmesine, entegre çalışma ve öğrenme ortamlarının sağlanmasına ve yeni çalışanları eğitmek için değerli bir çerçeve sağladığını belirtmişlerdir. Çok sayıda mevcut öğrenme fabrikası, endüstri üretiminin mühendislik ve didaktik eğitime yöneliktir. Tanımlanmış ayrımlar henüz tam olarak tartışılmayacak ve terminoloji ve iyi öğrenen fabrika uygulamalarının gelişimini daha da artacak denilmektedir. Bu makalede, Almanya'da bulunan bir fabrikada gerçek üretim operasyonlarından ve beraberindeki dolaylı süreçlerden çeşitli kullanım durumlarını göstermişlerdir. Bu fabrikanın sınıflandırması çoğunlukla morfolojinin yedi bölümü içinde başarılı olduğunu belirterek, sadece küçük değişikliklerin morfolojiyi daha da geliştireceğini ifade etmişlerdir.

Simons vd. (2017), Darmstadt Uygulamalı Bilimler Üniversitesi'nin tam otomatik Endüstri 4.0 öğrenme fabrikası ile ilgili yaptığı çalışmaları anlatmışlardır. İmalat sanayinin şu anda seri üretimden özelleştirilmiş üretime geçmekte olduğunu, bunun da farklı üretim yönleri ile ilgili zorluklarla sonuçlandığı anlatılmaktadır. Alman stratejisi olan Endüstri 4.0, bu zorlukların üstesinden gelmek için çeşitli teknolojileri bir araya getirip, öğrencilerin yeni yeterlilikler kazanmaları gerektiğini ima eder. Bu nedenle, Darmstadt Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Endüstri 4.0'ın birçok alanını kapsayan bütünsel, tam otomatik bir öğrenme fabrikası kurmuştur. Farklı lisans bölümlerine sahip öğrencilerin, bu akıllı fabrikada öğretilen laboratuvar derslerinde olduğu gibi projelerde de çok başarılı bir şekilde Endüstri 4.0'ı öğrendiklerini ifade etmişler ve üretim zorlukları ve Endüstri 4.0 tarafından bu zorlukların üstesinden gelmek için önerilen teknolojileri açıklamışlardır.

Issa vd. (2018), Endüstri 4.0 yol haritası: Kapasite olgunluğu ve uygunluğu kavramlarına dayalı dijital dönüşüm çerçevesi başlıklı bu çalışmada, yetenek olgunluğundan ve uygunluğundan elde edilen bilgiler üzerine inşa edilen Endüstri 4.0 uygulamalarını değerlendirmek ve yönlendirmek için bir çerçeve tanıtmışlardır. Önerilen çerçeve ile, Endüstri 4.0 kavramlarını uygulayan (ya da uygulamayı planlayan) imalat şirketleri için sağlam bir teorik çerçeveye dayanan pratik bir süreç sunmuşlardır. Bu süreci, olgunluk ve iş-Bilişim Teknolojileri (BT) uyum ve entegrasyon kavramlarına dayandırmışlardır. Bireysel kuruluşların mevcut durumlarını değerlendirmek için önerilen süreci nasıl kullanabileceklerini ve geleceğe yönelik yol haritalarını oluşturmak için bir başlangıç noktası olarak kullandıklarını göstermişlerdir.

Literatür taraması kapsamında yapılan incelemelerde, literatürdeki boşluklar aşağıda detaylandırılmıştır:

- Çalışmaların birçoğunda Endüstri 4.0'ın avantajları ve uygulama alanlarına değinilmiş, üretim yapan işletmelerin Endüstri 4.0'a geçiş aşamasında, dijital olgunluk seviyelerinin belirlenmesine tam olarak yer verilmemiştir.
- Bazı çalışmalarda ise, belli sektörlerin Endüstri 4.0'a hazır olup olmadıkları araştırılmış, dijital olgunluk modelleri üzerinde durulmuş fakat endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemlerinin önemine yönelik bir çalışma yapılmamıştır.
- Üretim yapan işletmelerin, Endüstri 4.0'a geçişte dijital olgunluk seviyelerini bilmeleri ve buna göre uygulayacakları yol haritalarını belirlemeleri, işletme için stratejik bir karar olmasına rağmen bu konu çok az sayıda araştırmacı tarafından dikkate alınmıştır.

Yapılan bu çalışmada, üretim yapan işletmelerin Endüstri 4.0'a geçişte dijital olgunluk seviyelerinin belirlenmesine yönelik literatürde ilgili boşlukları doldurmak amacıyla kapsamlı bir model sunulmaktadır. Model; üretim yapan işletmelerin mevcut dijital olgunluk seviyesinin belirlenmesini, işletmelerin Endüstri 4.0'ın arkasındaki fikirleri uygulama istekliğini ve kapasitesini incelemektedir.

3. DİJİTALİZASYON KAVRAMI VE ENDÜSTRİ 4.0

Dijitalizasyon ve Endüstri 4.0'dan bahsedebilmek için öncelikle endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemlerinin tam ve doğru olarak projelendirildiğinden ve çalıştığından emin olmak gerekmektedir.

3.1. Endüstriyel Otomasyon ve Kontrol Sistemleri

Endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemleri (EOKS), endüstriyel süreçleri çalıştırmak ve/veya otomatikleştirmek için kullanılan cihazları, sistemleri ve kontrolleri içeren, farklı kontrol sistemlerini tanımlamak için kullanılan bir terimdir (Boyes vd. 2018). Endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemleri ile ilgili ana kavramlar aşağıda belirtilmiştir.

3.1.1. PLC

Endüstriyel uygulamalarda kontrol sistemi olarak en çok PLC cihazları kullanılmaktadır. PLC cihazları endüstriyel ortamlar için tasarlanan uzun ömürlü ve güvenilir cihazlardır. Ancak, donanım fiyatları yüksektir. Ayrıca, PLC cihazlarını programlamak için kullanılan yazılım lisansları için ayrıca ücret talep edilmektedir (Hoxha vd. 2016).

Farklı sektörlerde kullanılan her proses için, endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemleri performans ihtiyaçları farklıdır. 'Proses Otomasyonu' uygulamaları için, güçlü ve güvenilir PLC kontrol cihazı büyük önem taşımaktadır. Aşağıda performansı yüksek Siemens S7-1500 PLC kontrol cihazlarından, CPU 1510SP-1PN modelini teknik özellikleri Çizelge 3.1'de gösterilmiştir (Siemens Industry Mall web sitesi¹, 2018).

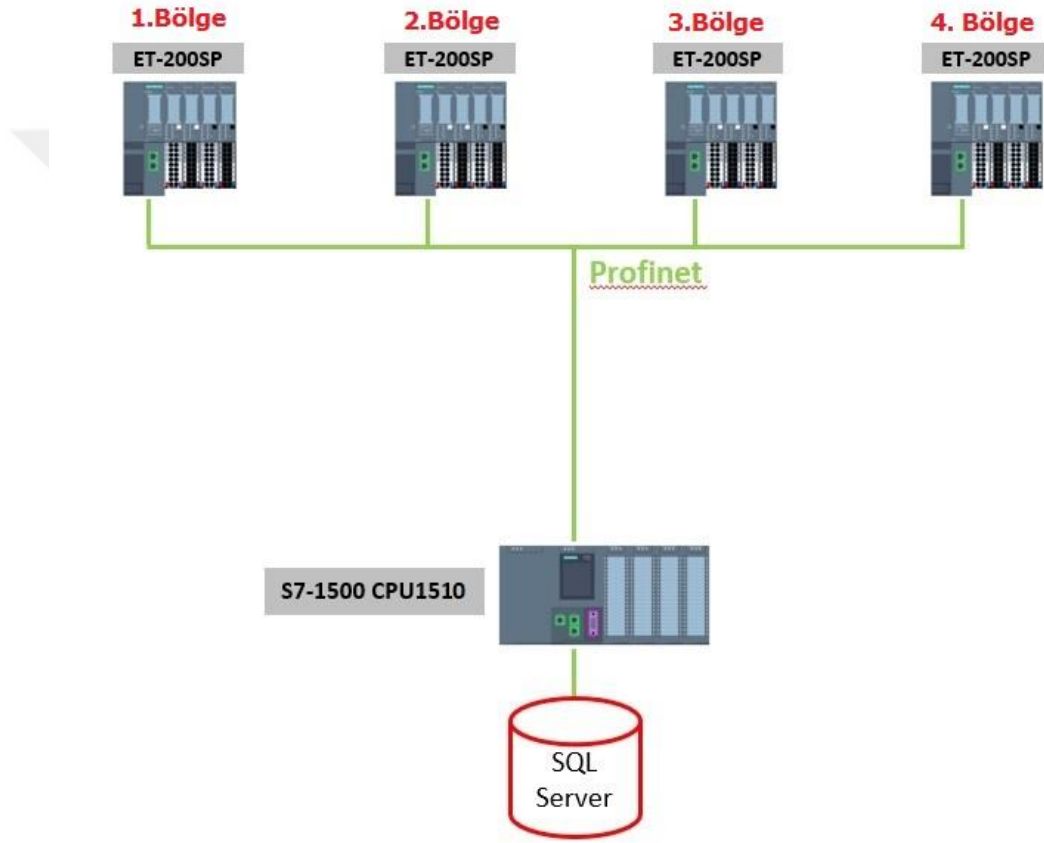
Çizelge 3.1. CPU 1510SP-1PN modelinin teknik özellikleri (Siemens Industry Mall web sitesi¹, 2018)

Özellikleri	CPU 1510SP-1 PN
Program için çalışma hafızası, entegre	100 KB
Entegre veri belleği, entegre	750 KB
Hafıza (eklenebilir)	SIMATIC Hafıza Kartı ile
Komut yürütme süreleri	
Bit işlemleri	0.072 µs
Kelime işlemleri	0.086 µs
Sabit nokta işlemleri	0.115 µs
Kayan nokta işlemleri	0.461 µs
Bit hafızaları, zamanlayıcılar, sayıcılar	
S7 sayıcı/zamanlayıcı	2048 herbiri
IEC sayıcı	Herhangi bir sayı (sadece çalışma hafızası ile sınırlıdır)
IEC zamanlayıcı	Herhangi bir sayı (sadece çalışma hafızası ile sınırlıdır)
Bit hafızaları	16 KB
I/O adres aralığı	
Girişler	32 KB
Çıkışlar	32 KB
Hareket	
Pozisyonlama eksen sayısı	5
Maksimum pozisyonlama eksen sayısı	10
Haberleşme	
PtP	Yes (CM ile)
PROFINET IO	1 x PN IO IRT (3-port switch)
PROFIBUS DP	Evet (CM DP ile)
OPC UA Server (Data Erişimi)	Evet
Web sunucusu	Evet

3.1.2. Dağıtılmış giriş ve çıkış modülleri (I/O)

Endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemlerinde son yıllarda dağıtılmış I/O modülleri kullanılmaya başlanmıştır. Aynı şekilde 'Proses Otomasyonu' uygulamalarında da dağıtılmış I/O modüllerinin kullanımı hızlı bir yükseliş göstermiştir. Özellikle 'Proses Otomasyonu' uygulamalarında tesis içindeki cihazlar ve sensörler daha geniş bir alan içine dağılmaktadır. Bu bölgelerden

sinyallerin PLC üzerindeki I/O modüllerine elektriksel bağlantılarının yapılması hem ciddi bir işçiliğe hem de yüksek maliyetlere neden olmaktadır. PLC kontrol sistemini merkez kontrol odasında tutup, I/O modüllerini sahaya yani cihazların ve sensörlerin yakın yerlerine dağıtıldığında, yapılacak elektriksel kablo bağlantılarının en aza indiği, bunda zaman ve kablo maliyetini minimuma indirdiği gözlenmiştir. Şekil 3.1’de dağıtılmış I/O modüllerinin dört farklı bölgede uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Dağıtılmış I/O modüllerinin uygulama örneği

Dağıtılmış I/O modülleri, modüler, esnek ve tümleşik yapısı ile tesis yapısına tam adapte olur. Ayrıca kablaj, montaj, mühendislik, devreye alma, bakım gibi birçok konuda da ciddi tasarruf sağlar. Dağıtılmış I/O modüllerinin haberleşme protokollerinde Çizelge 3.2’de gösterilmiştir (Siemens Industry Mall web sitesi³, 2019).

Çizelge 3.2. Dağıtılmış I/O modülleri haberleşme protokolleri (Siemens Industry Mall web sitesi³, 2018).

Pos.	Haberleşme Protokolü
1	PROFINET IO
2	PROFIBUS DP V0 / V1
3	IO-Link V1.1
4	AS-Interface
5	Modbus TCP
6	Noktadan Noktaya (RS 232, RS 485, RS 422)
7	Freeport
8	3964 (R)
9	USS
10	Modbus RTU (master / slave)

3.1.3. HMI

HMI cihazları endüstriyel uygulamalarda PLC'den sonra en çok kullanılan cihazlardan biridir. Prosesin izlenmesi ve PLC programına bilgi girişi yapmak için kullanılır. HMI cihazların farklı boyutları ve özellikleri vardır.

HMI mühendisliği proses uygulamalarında denetim kontrolü için arayüzler bir bilgi entegrasyonu görevi olarak nitelendirilebilir. Bu, özellikle yüksek performanslı HMI'nın temel ögesi olan yapılandırma ekranları için geçerlidir (Urbas vd. 2012). Aşağıda performansı yüksek Siemens HMI KTP700 basic OP'nin teknik özellikleri Çizelge 3.3'de gösterilmiştir (Siemens Industry Mall web sitesi², 2018).

Çizelge 3.3. KTP700 basic OP'nin teknik özellikleri (Siemens Industry Mall web sitesi², 2018).

Teknik özellikler

Sipariş numarası	6AV2123-2GB03-0AX0 SIMATIC HMI KTP700 BASIC
Genel bilgi	
Ürün tipi atama	KTP700 Basic renkli PN
Ekran	
Ekranın dizaynı	TFT geniş ekran, LED arka aydınlatma

Ekran diyagonal	7 inç
Ekran genişliği	154.1 mm
Ekran yüksekliği	85.9 mm
Renk sayısı	65 536
Çözünürlük (piksel)	
• Yatay görüntü çözünürlüğü	800 Pixel
• Dikey görüntü çözünürlüğü	480 Pixel
Işıklandırma	
• MTBF arka aydınlatması (25 ° C'de)	20 000 saat
• Arkadan aydınlatmalı kısılabilir	Evet
Klavye yazı tipleri	
• Fonksiyon tuşları	
— Fonksiyon tuşlarının sayısı	8
— LED'li fonksiyon tuşlarının sayısı	-
• LED'li Tuşlar	Hayır
• Sistem tuşları	Hayır
• Sayısal klavye	Evet; Ekran klavyesi
• alfasayısal klavye	Evet; Ekran klavyesi
Dokunmatik operasyon	
• Dokunmatik ekran tasarımı	Evet
Kurulum tipi / montaj	
Montaj konumu	dikey
Dikey formatta montaj mümkündür	Evet
Yatay formatta montaj mümkündür	Evet
Dış havalandırma olmaksızın izin verilen maksimum eğim açısı	35°
Besleme gerilimi	
Besleme gerilimi türü	DC
Anma değeri (DC)	24 V
İzin verilen aralık, alt sınır (DC)	19.2 V
İzin verilen aralık, üst sınır (DC)	28.8 V
Giriş akımı	
Akım tüketimi (nominal değer)	230 mA
Başlangıç ani kalkış I ² t	0.2 A ² ·s
Güç	
Aktif güç girişi	5.5 W
İşlemci	
İşlemci tipi	ARM
Bellek	
Flash	Evet

RAM	Evet
Kullanıcı verileri için mevcut hafıza	10 Mbyte

3.1.4. Endüstriyel ağ

Endüstriyel ağları planlamak ve uygulamak ve bunları şirket ağına bağlamak, çok fazla yetenek ve erişilebilir uzman bilgisi gerektirmektedir. Aynı şey bir iletişim ağının güvence altına alınması, teşhis edilmesi veya optimize edilmesi gerektiğinde de geçerlidir. Endüstri 4.0 ve dijitalizasyon uygulamalarında en önemli bileşenlerden biride Endüstriyel network sisteminin doğru cihazlarla hatasız kurulumunun yapılmasıdır. Endüstri 4.0 ve dijitalizasyon uygulamalarının son dönemde yoğun kullanılmaya başlamasıyla beraber endüstriyel ağ sistemlerinin kullanımında da artış olmuştur. Böylece, endüstriyel sistemlerde, izleme, kontrol ve teşhis sağlamak için kullanılan endüstriyel ağ sistemlerinin donanım ve yazılım maliyetleri düşmüştür. Bununla birlikte, bu yeni teknolojiler endüstriyel ortamlarda uygulandığında bazı uygulama zorlukları vardır. Bu sistemlerin çoğunluğunun farklı dağıtılmış sistemlerden oluştuğu göz önüne alındığında, yönetim ve koordinasyon önemli zorluk teşkil etmektedir (Gholami vd. 2017).

PROFINET (PN), endüstriyel kontrol sistemlerinde TCP / IP ve IT standartlarını kullanan endüstriyel ethernet destekli üst düzey açık ağ haberleşme protokolüdür. PN, sistemde dağınık halde bulunan endüstriyel kontrol cihazlarının (PLC 'ler, HMI'lar, servo sürücüler, RFID okuyucu'lar vb.) birbirleri ile ayrı ayrı haberleşerek, yatay ve dikey entegrasyonun sağlanması, emniyet, alarm ve verilerin daha hızlı iletilmesini sağlamak için kullanılır. Zamanlama özelliklerine göre PROFINET, Çizelge 3.3'de gösterildiği gibi üç tip trafiği tanımlar. Gerçek olmayan zaman (Non Real Time) (NRT) trafiği, PROFINET CBA ağlarının tipik bir örneğidir, gerçek zaman (real time) (RT) Sınıfı 1, hem PROFINET CBA hem de IO tarafından işlenebilir. RT sınıf 2 performansları sadece PROFINET IO ile mümkündür. Bu tür bir sınıf, aynı zamanda, eşzamanlı olarak da bilinir, onları tanıttıkları ve düzelttikleri gecikmeleri tahmin edebilen gelişmiş anahtarların kullanılmasını gerektiren oldukça hassas ve senkronize bir döngüye dayanır.

Çizelge 3.4. Profinet zamanlama özellikleri (Ferrari vd. 2006)

Trafik Türü	Periyodiklik / Reaksiyon süreleri	Jitter (%)
Gerçek olmayan zaman Non Real Time (NRT)	$\geq 100\text{ms}$	≥ 100
Gerçek zaman sınıf 1 Real Time Class 1	$\geq 5\text{ ms}$	≥ 15
Gerçek zaman sınıf 2 Real Time Class 2	$\geq 250\ \mu\text{s}$	$\leq 0.4\ (1\ \mu\text{s})$

Jitter relatif değeri periyodikliğe göre hesaplanır.

PROFINET IO, ağda bulunabilecek dört tip cihazı ifade etmektedir:

- 1- IO kontrol cihazı,
 - 2- IO cihazı,
 - 3- IO süpervizörü,
 - 4- IO parametre sunucusu,
- 1- IO kontrol cihazı, örneğin kişisel bilgisayarlar veya otomasyon görevlerini gerçekleştiren programlanabilir denetleyiciler gibi "akıllı" aygıtlardır.
- 2- IO cihazları, IO denetleyicileri ve alan arasındaki arabirimi gerçekleştiren cihazlardır. Bu cihazlara örnek olarak: sensörler, aktüatörler, vanaların aküleri, elektronik sonlandırıcılar, vb.
- 3- IO süpervizörleri, IO kontrolörleri ve / veya IO cihazları ile hem konfigürasyon hem de teşhis verilerini değiştiren cihazlardır.
- 4- IO parametre sunucuları, IO cihazlarına sahip uygulamalarla ilgili konfigürasyon verilerini değiştirmek için kullanılan cihazlardır. Hem IO süpervizörleri hem de IO parametre sunucuları tarafından üretilen veri trafiği, genellikle çevrim dışı aşamalar sırasında gerçekleşir ve gerçek zamanlı performans anlamına gelmez. Tersine, IO denetleyicileri ve IO aygıtları arasındaki veri değişimi çoğunlukla yürütülen otomasyon görevleri ile ilgilidir ve dolayısıyla kritik zamanlama gereksinimlerine sahiptir (Ferrari vd. 2006).

3.2. Endüstri 4.0

Endüstri 4.0, daha verimli üretim süreçlerine ulaşılmasına yardımcı olan bir dizi teknolojiyi birleştiren bir girişimdir. Endüstri 4.0'daki sanayi üretimi için önemli bir özellik, sensörler, cihazlar ve kurumsal varlıklar gibi fiziksel öğelerin birbirleriyle ve İnternete bağlı olmasıdır. Bu ortamda, cihazlar ve sensörler artan miktarda veri üretir. Göz önünde bulundurulması gereken önemli bir nokta, endüstriyel süreçlerin yürütülmesinin yalnızca içsel durum ve kullanıcı etkileşimlerine değil aynı zamanda yürütme bağlamına da bağlı olması ve bağlamsal farkındalık oluşturmak ve izlemeyi iyileştirmek için katma değerli bilgiler sağlamasıdır (Giustozzi vd., 2018).

3.2.1. Endüstri 4.0'ın tarihçesi

Endüstri 4.0 terim olarak dördüncü sanayi devrimi anlamına gelmektedir. İlk sanayi devrimi su ve buhar gücü ile üretim mekanizmasının üzerine kurulmuş, onu ikinci sanayi devrimi olan elektrik enerjisi yardımı izlemiştir. Daha sonrasında ise üçüncü sanayi devrimi olan dijital devrim gerçekleşerek elektronik kullanımı artmıştır. Dördüncü sanayi devrimi olarak adlandırılan Endüstri 4.0 ise, teknolojik temeller, siber-fiziksel sistemler ve internet ağlarını barındırmaktadır (MCS Factory Web sayfası, 2018).

On sekizinci yüzyılın ortalarına gelindiğinde, endüstri açısından ilk hareket İngiltere'de başlamış, Almanya gibi ABD ve Avrupa ülkelerini takiben tarım toplumundan sanayi toplumuna geçiş olmuştur (Dombrowski ve Wagner, 2014). İlk Sanayi Devrimi'nden bu yana, daha sonraki devrimler, imalatta, su ve buharla çalışan makinelerden elektrik ve dijital otomatik üretime kadar radikal değişimlere neden olmuştur. Üretim süreçleri giderek daha karmaşık, otomatik ve sürdürülebilir hale gelmiştir, bu da insanların makineyi basit, verimli ve ısrarlı bir şekilde kullanabilmeleri anlamına gelmektedir (Wahlster, 2012).

3.2.1.1. Birinci sanayi devrimi

İlk Sanayi Devrimi, 18. yüzyılda buhar gücü ve üretim mekanizasyonu yoluyla başlamıştır. Basit eğirme tekerleği üzerinde daha önce üretilen iplikler, mekanize versiyon sayesinde, aynı zamanda hacmi sekiz katına ulaştırmıştır. Buhar gücü zaten biliniyordu. Bunu endüstriyel amaçlar için kullanmak, insan verimliliğini arttırmak için en büyük atılım olmuştur. Kas gücü ile çalışan dokuma tezgahlarının yerine, buhar motorları kullanılmaya başlanmıştır. Buharlı ya da (100 yıl sonra) buharlı lokomotif gibi gelişmeler, insanlar ve/veya malları daha az saat içinde daha büyük mesafeler taşıyabildiği için büyük değişikliklere neden olmuştur (Desoutter web sitesi, 2018).

3.2.1.2. İkinci sanayi devrimi

İkinci Sanayi Devrimi, 19. yüzyılda elektrik ve montaj hattı üretiminin keşfedilmesiyle başlamıştır. Henry Ford (1863–1947) Chicago'daki bir mezbahadan seri üretim fikrini almıştır. Konveyör bantlarında asılı hayvanlar, bantta ilerleyerek kasapların önüne gelmektedir. Her kasap, hayvanın sadece bir kısmını kesmektedir. Böylece daha seri ve hızlı bir üretim gerçekleşmektedir. Henry Ford bu ilkeleri otomobil üretimine taşıyarak, otomobillerin konveyör bant üzerinde daha hızlı ve daha düşük maliyetle üretilmesinde öncülük etmiştir (Desoutter web sitesi, 2018).

3.2.1.3. Üçüncü sanayi devrimi

Üçüncü Sanayi Devrimi, 20. yüzyılda 70'lerde bellek programlanabilir kontroller ve bilgisayarlar kullanılarak kısmi otomasyonla başlamıştır. Bu teknolojilerin kullanıma sunulmasından bu yana, artık tüm üretim sürecini insani yardım olmadan otomatikleştirebiliyoruz. Bunun bilinen örnekleri, insan müdahalesi olmaksızın programlanmış dizileri gerçekleştiren robotlardır (Desoutter web sitesi, 2018).

3.2.1.4. Dördüncü sanayi devrimi

Şu anda Dördüncü Sanayi Devrimi'ni yaşıyoruz. Bu, bilgi ve iletişim teknolojilerinin endüstriye uygulanmasıyla karakterize edilir ve “Endüstri 4.0” olarak da bilinir. Üçüncü Sanayi Devrimi'nin gelişmelerine dayandırılmaktadır. Halihazırda bilgisayar teknolojisine sahip olan üretim sistemleri, bir ağ bağlantısıyla genişletilmekte ve internet üzerinde bir dijital ikize sahip olmaktadır. Bunlar diğer tesisler ile iletişim ve kendileri hakkında bilgi çıkışı sağlar. Bu üretim otomasyonunda bir sonraki adımdır. Tüm sistemlerin ağı, “siber-fiziksel üretim sistemleri” ne yol açmaktadır ve bu nedenle üretim sistemleri, bileşenleri ve insanların bir ağ üzerinden iletişim kurdukları ve üretimlerinin neredeyse otonom olduğu akıllı fabrikalardır (Desoutter web sitesi, 2018).

3.2.2. Endüstri 4.0'ın vizyonu

Pek çok araştırmacı arasında, endüstriyel revizyonların uzun vadeli bir gelişim süreci gerektirdiğini ve gelecekteki üretim vizyonları olarak kabul edilen aşağıdaki dört hususu kapsadığına dair temel bir fikir birliği vardır (Qin vd. 2016).

3.2.2.1. Fabrika

Endüstri 4.0'ın ana bileşenlerinden biri olarak, gelecekteki fabrika sadece tüm üretim kaynaklarının (sensörler, aktüatörler, makineler, robotlar, konveyörler, vb.) bağlı olmadığı ve bilgileri otomatik olarak değiştirmedeği yeni bir bütünleştirici içerecektir. Fabrika, üretim süreçlerini kontrol etmek ve sistemini yönetmek için yeterince bilinçli ve akıllı olacaktır. Buna ek olarak, ürün tasarımı, üretim planlaması, üretim mühendisliği, üretim ve hizmetler gibi birçok üretim süreci modüler olarak simüle edilecek ve daha sonra uçtan uca birbirine bağlanacak, bu da bu süreçlerin sadece bir merkezi olmayan, aynı zamanda birbirine bağlı olarak da kontrol edilebilen sistemler olacaktır. Bu tür bir gelecek fabrikası Akıllı Fabrika olarak tanımlanmaktadır (Lucke vd. 2008).

3.2.2.2. İş

Endüstri 4.0, çeşitli şirketler, fabrikalar, tedarikçi, lojistik, kaynaklar, müşteriler, vb. arasında tam bir iletişim ağının bulunacağını ima eder. Her bölüm, ağdaki ilgili bölümlerin taleplerine ve durumlarına bağlı olarak yapılandırmalarını gerçek zamanlı olarak optimize eder. Sınırlı paylaşım kaynağı olan tüm kooperatifler için maksimum kâr sağlar. Ayrıca, maliyetler ve kirlilik, hammaddeler, CO₂ emisyonları vb. azaltılacaktır. Başka bir deyişle, gelecekteki iş ağı, kendi kendini organize eden bir duruma ulaşabilecek ve gerçek zamanlı yanıtları iletebilecek olan her bir iş birliği bölümü tarafından etkilenecektir (Kagermann vd. 2013).

3.2.2.3. Ürünler

Endüstri 4.0'dan yararlanan, akıllı ürünlerden üretilen yeni bir ürün tipi olacaktır. Bu ürünler, müşterilere fonksiyonel rehberliği iletmek ve kullanım geri bildirimlerini üretim sistemine iletmek için bilgi ve bilgi taşıyan sensörler, tanımlanabilir bileşenler ve işlemcilerle donatılmıştır. Bu unsurlarla, ürünlere, kullanıcılara ait ürünlerin ölçülmesi, bu bilgilerin taşınması, ürünlerin takibi ve sonuçlara bağlı olarak sonuçların analiz edilmesi gibi birçok fonksiyon eklenebilir. Ayrıca, tasarım, tahmin ve bakımın optimize edilmesinde ürün geliştirici, ürün geliştiricisi ile tam bir üretim bilgi kütüğüne yerleştirilebilir (Abramovici ve Stark, 2013).

3.2.2.4. Müşteriler

Endüstri 4.0 altında müşterilerin de birçok avantajı olacaktır. Müşterilere yeni bir satın alma yöntemi sunulacaktır. Müşterilerin, ürünlerin herhangi bir işlevini, yalnızca bir tanesi olsa bile herhangi bir sayı ile sipariş etmelerine olanak tanınacaktır. Buna ek olarak, müşteriler siparişleri ve fikirlerini istedikleri zaman üretim sırasında istedikleri zaman ücretsiz olarak değiştirebilirler. Öte yandan, akıllı ürünlerin sağladığı fayda, müşterinin sadece ürünün üretim bilgilerini bilmesini değil, aynı zamanda kendi davranışlarına bağlı olarak kullanım tavsiyesini de almasını sağlamasıdır (Schlechtendahl vd. 2015).

3.2.3. Endüstri 4.0'ın sağladığı avantajlar

Endüstri 4.0 ve ileri üretim kategorisinin bir çerçevesi olan teknolojiler gözden geçirildiğinde, bu teknolojilerin zekasının farklı olduğunu gösterdiğinden, bunlar düşük zekadan yüksek zekaya kadar olan zekadüzeylemlerine göre sınıflandırılabilirler. Bunlar, kontrol seviyesi, entegrasyon seviyesi ve istihbarat seviyesidir (Shen vd. 2006). Kontrol seviyesi olan otomasyon düzeyinde, bilgisayar sayısal kontrolü, programlanabilir mantık kontrolü ve olasılık istatistikleri analizi gibi teknolojiler, işgücünün değiştirilmesi ve üretim verimliliğinin optimize edilmesi için kullanılmaktadır. Entegrasyon seviyesinde, IoT ve CPS teknolojisi, dijital üretim ortamı ve ağları üreten kontrol seviyesi teknolojilerine dayalı üretimde uygulanmaktadır. Veriler, sensörler, makineler, üretim hatları veya üretim kontrol ve yönetim sistemlerinden toplanır ve ayrıca müşteri geri bildirim ve tedarik zinciri gibi fabrika dışından da alınabilir. Bu seviyede, insanların üretimi iyileştirmelerine yardımcı olan daha değerli bilgiler keşfedilmiştir. Zeka düzeyinde, üretim, gelişmiş veri madenciliği ve büyük veri analizi gibi akıllı teknolojilerle plan oluşturmak ve kararlar almak için entegrasyon seviyesinden elde edilen veri veya bilgiler kullanılmıştır. Buna ek olarak, akıllı üretim sistemi, Endüstri 4.0'ın kavramları olan, kendi kendine yetebilen, kendini eniyileme, kendi kendini yapılandırma, vb. bunlar Sanayi 4.0'ın uygulamalarındandır (Hoppe, 2014).

Teknoloji değerlendirmeleri tek başına teknoloji uygulamasının performansını anlamak için yeterli değildir. Kategorik oyunculuk hedeflerine sahip olmak gereklidir (Qin vd. 2016).

3.2.4. Endüstri 4.0'ın bileşenleri

Endüstri 4.0 ve dijitalizasyondan bahsedebilmek için öncelikle son zamanlarda en çok gündemde olan ana bileşenleri hakkında kısa bir bilgilendirme yapmak faydalı olacaktır. Endüstri 4.0 konseptinin içinde farklı birçok teknolojiler bulunmaktadır. Bu teknolojiler, başlı başına ayrı uzmanlık ve yeterlilik gerektirmektedir.

3.2.4.1. Otonom robotlar

Endüstriyel otomasyon dediğimizde akla gelen ilk bileşenlerden biri robotlar ya da robotik teknolojilerdir. Hemen hemen tüm sektörlerde yoğun bir şekilde kullanılmaya başlayan robotlar, Endüstri 4.0'ın önemli bir bileşeni olmuşlardır. Robotların hemen hemen her sektöre uygulanabilmesi ve maliyetlerinin düşük olması nedeniyle, endüstriyel robotlar son yıllarda üretim alanlarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Chen ve Dong, 2013).

3.2.4.2. Simülasyon

Günümüzde teknolojik ürünleri yenilerken, yapılacak tasarım çalışmalarında çok sayıda ve farklı alternatiflerde karşılaşılmaktadır. Bu alternatiflerin gerçek uygulama sırasında ürünün performansını nasıl etkilediğini tahmin etmek gerekmektedir. Bilgisayar destekli mühendislik simülasyonu, mühendislerin, ürünlerinin gerçek dünyadaki performansları üzerinde herhangi bir tasarım değişikliğinin sonucunu tahmin ederek, geleceği görmelerini sağlar. Etkin bir şekilde dağıtıldığında, tasarımınızı birden çok yineleme ile geliştirmek, tasarım sürecini en erken aşamalarından üretime ve ötesine yönlendirmek için veri sağlamak için kullanılmaktadır.

Tesis tasarımı, imalat sistemlerinin genel performansını etkileyen önemli bir faktördür. Tesis düzen tasarımı, bir tesiste makine / bölümlerin tahsisi ile ilgilenir ve üretim faaliyetlerinin etkinliği ve verimliliği üzerinde büyük bir etkiye sahip olabilir. Etkili bir düzen, üretim maliyetlerini düşürebilir ve sistemin performansını artırabilir. Ayrık olay simülasyonu, mevcut düzeni değerlendirmek, farklı yerleşim alternatiflerini değerlendirerek iyileştirme için potansiyel alanları göstermek için uygun bir araçtır. Bu nedenle, çeşitli araştırmacılar farklı tesis yerleşim problemlerine simülasyon uygulamışlardır (Negahban ve Smith, 2014). Simülasyonlar, fiziksel dünyayı makineler, ürünler ve insanlar içerebilen, böylece makine kurulum sürelerini azaltan ve kaliteyi artıran sanal bir modelde aynalamak için gerçek zamanlı veriyi kullanmak için

tesis operasyonlarında daha kapsamlı olarak kullanılacaktır (Rüßmann vd. 2015).

3.2.4.3. Dikey ve Yatay Entegrasyon

Dikey ve yatay entegrasyon, Endüstri 4.0 uygulamalarında, üretim süreçlerinin tüm aşamalarının sisteme dahil olmasıdır. Endüstri 4.0'ın temelinde olması gereken birbirine bağlantılı tüm sistemlerin, sürekli olarak birbiri ile haberleşmesi ve gerektiğinde birbirlerini izleyip kontrol edebilmeleridir.

Akıllı Fabrikalarda üretim için en önemli faktörlerden ikisi yatay ve dikey entegrasyondur. Yatay entegrasyon, bireysel makineler, ekipman parçaları veya üretim birimleri arasında ağ oluşturup, üretim ve planlama sürecindeki her bir adımın kendi arasında, ayrıca farklı işletmelerin üretim ve planlama süreçlerindeki adımlar arasında da kesintisiz bir akış sağlamak anlamına gelmektedir. Geleneksel üretim hiyerarşisi seviyelerinin ötesinde dikey entegrasyon ağları, teknolojik altyapıda kesintisiz bir iletişim ve akış anlamına gelmektedir. Üretim alanında bulunan, sensörlerden, vanalardan, motorlardan elde edilen veriler ile, kurumsal kaynak planlama yazılımları ve işzekası uygulamaları bu kapsamda ele alınmaktadır.

3.2.4.4. Nesnelerin interneti (IoT)

Üretimlerini artırmak ve üretim maliyetlerini düşürmek isteyen işletmeler, üretim methotlarını daha da profesyonelleştirmeye ihtiyaç duymaktadırlar. IoT'nin ne anlama geldiğini ve endüstri ve yeni iş modelleri üzerindeki etkisini incelemek zorundayız. Şu anda herkes IoT'yi kendi bakış açıları ve ihtiyaçlarına göre yorumlamaya çalıştığı yeni bir aşamadayız (Singh vd. 2014). IIoT için şöyle bir tanım yapabiliriz. Belirli IoT teknolojilerinin, endüstriyel bir ortamda siber fiziksel sistemler içinde bulunan bazı akıllı cihazlarla birlikte kullanılmasıdır. Buna benzer şu tanımları da yapmak mümkün. Dünyanın IIoT vizyonu, birbirine bağlı akıllı şeylerin, daha büyük bir sistemin veya akıllı üretimi oluşturan sistemlerin bir parçası olarak faaliyetin olduğu bir yerdir (Conway, 2015).

Üretim süreçlerine bilgi teknolojilerin dahil edilmesi de üretim gücünü hızlandırıp artırabilir, akıllı üretim süreçleriyle, akıllı ürünler ve uzaktan müdahale edilebilir sistemler, üretim süreçlerine yüksek seviyede esneklik sağlayabilmektedir. Aynı zamanda müşterilerin sisteme entegre edilmesine imkan vererek, müşteri istekleri doğrultusunda düşük maliyetlerle özelleştirilebilen ürünler üretilebilirler.

Artık nesnelerin interneti, yani cihazların başka cihazlarla iletişim kurarak hayatı kolaylaştırmasından söz edilmektedir. Nesneler arasındaki etkileşimin ürettiği veriler, endüstriyel süreçleri çok daha kontrollü şekilde yürütebilmeyi, daha detaylı analizler yapabilmeyi, çok daha dinamik ve etkin kararlar alabilmeyi sağlamaktadır. “Endüstriyel Nesnelerin İnterneti” olarak da adlandırılan bu yapı sayesinde akıllı fabrikalar daha da akıllı hale gelmektedir. Böylece pek çok farklı ve karmaşık yapıda ürün daha kısa sürede ve optimum kalitede üretilebilmektedir. Cihazlar birbirine bağlandığında, oluşturulan veriler, yüksek hızlı internet desteğiyle hızla aktarılarak, ortaya çıkan verilerden alınan sonuçlara bakıp daha hızlı ve en etkili kararların alınabilmesi sağlanabilmektedir. Alınan bu kararlar hem iş başındaki personele hem işi takip eden yöneticiye hem de bütün cihazlara aktarılarak, senkronize bir şekilde çalışabilmektedir. Kısaca dijitalleşme sadece sahadaki verilerin dijital ortamlara aktarılmasıyla değil yönetimsel olarak bu verilerin kullanılabilmesini sağlamaktır. Nesnelerin interneti ile birlikte çok geniş bir iletişim ağı yaratan ve böylece gerçek ve sanal dünyalar arasındaki sınırı kaldırmaya yönelik haberleşme sistemleri, Endüstri 4.0'ın temelindeki güçlerden birini oluşturmaktadır. Endüstri 4.0 tabanlı üretim süreçleri, sistemlerin çeşitli ara yüzler üzerinden farklı ağlara bağlanıp farklı servislerle iletişim kurmasını esas almaktadır. Endüstriyel ortamlarda çalışan tüm cihazların haberleşmesi ancak iyi tasarlanmış ve konfigüre edilmiş sağlıklı bir ağ içerisinde mümkündür. Gelişen kablolu ve kablosuz iletişim teknolojileriyle artık her türlü platformda haberleşme yapılabildiği gibi geliştirilen açık kaynak kodlu yazılımlar ve standartlar ile hem lokalde hem de geniş alan ağları içerisinde daha kolay, güvenli ve yönetilebilir bir iletişim sağlanabilmektedir. Endüstriyel tanımlama sistemleri de endüstriyel haberleşme sistemlerinin bir parçası olarak temelinde dijitalleştirme olan Endüstri 4.0 ve IoT

sistemlerinin ana bileşenlerinden biridir. RFID sistemleri olarak da bilinen tanımlama sistemleri, organizasyonları yeni nesil iletişim teknolojileriyle dijitalleştirerek daha verimli ve etkin sistemlere dönüştürmektedir.

3.2.4.5. Siber güvenlik

Bilişim teknolojilerinin hızlı gelişimi ve sonucunda yaşantımızın ayrılmaz bir parçası haline gelmesi, özel ve kamu kurumlarımızın dijital dönüşümleri, siber tehditlerin hedefli ve koordineli bir şekilde gelişimi sonucunda siber uzayın genişlemesine neden olmuş ve siber tehditler ulusal güvenliğimizi tehdit eder bir konuma gelmiştir. Günümüzde bilgi ve iletişim teknolojileri (ICT), endüstriyel üretim süreçlerinin çoğunu desteklemektedir. BT devrimi, birinci ve ikinci sanayi devriminde mekaniğin ve elektriğin yaptığı gibi yüksek etkilere benzer önemli bir dönüşümler getirdi. Bu gelişme, bulut tabanlı sistemlerin ortaya çıkmasını, nesnelerin interneti (IoT), büyük veri ve Endüstri 4.0 konseptinin ortaya çıkmasını desteklemiştir. Bununla birlikte, yeni teknolojik çözümler her zaman beklenmedik riskler ortaya çıkaran güvenlik açıklarını taşırlar (Pereira vd. 2017). Endüstri 4.0 ve dijitalizasyon uygulamaları ile siber güvenlik endüstriyel işletmeler içinde büyük tehdit oluşturmaya başlamıştır. Üretimdeki her noktanın birbiriyle güvenli bir şekilde iletişim kurabilmesi, farklı üretim tesislerinin birbiri ile haberleşebilmesi ve üretim bilgilerinin yerel ya da bulut'ta DB'e kaydedilmesi üretim yapan işletmelerin veri güvenliğini önemli hale getirmektedir.

3.2.4.6. Bulut bilişim

Bulut bilişim, kullanıcı uygulamalarına uygun altyapı desteği sağlamak için sonsuz ve ucuz kaynakların talep edilmesini vaat ediyor. Bu nedenle, maliyetleri azaltmak ve yeniden yapılandırmayı otomatikleştirmek için uygulamalarını buluta taşımaya çalışan birçok işletme tarafından giderek daha fazla kabul görmektedir. Bu işletmeler, bulutta uygulama dağıtımına ve yeniden yapılandırılmasına destek sağlayan ücretsiz veya özel bulut platformları tarafından desteklenmektedir (Kritikos ve Massonet, 2016).

Bulut güvenliği, günümüzde bulut kullanımını engelleyen en önemli faktörlerden biridir. Bu isteksizliğin üstesinden gelmek için, bulut uygulama geliştirme süreci başlangıçtan itibaren potansiyel güvenlik sorunlarını dikkate almalı ve bulut paradigmasının sunduğu esnekliğe uyum sağlamalı ve aynı zamanda geliştiricilerin ve bulut müşterilerinin oluşturduğu güvenlik kısıtlarını da dikkate almalıdır (Casola vd. 2016). Bulut Bilişim sayesinde kullanıcılar, işletme için gerekli uygulamaları tesis içindeki bilgisayarlarda ya da veri merkezlerinde tutmak yerine, servis sağlayıcıdaki bilgisayarlar aracılığıyla internet üzerinden istedikleri bir alanda kullanabilirler. Böylece daha ekonomik, esnek ve hızlı veri yönetimi elde edilebilmektedir.

3.2.4.7. Siber-Fiziksel yönetim sistemleri

Siber Fiziksel sistemler (SFS) sensörler ve aktüatörler yardımıyla fiziksel dünyayı sanal bilgi işlem dünyasıyla birbirine bağlamaktadır. Farklı kurucu bileşenlerden oluşan SFS'ler iş birliği ile global davranışları oluşturmaktadır. Bu bileşenler gerçek dünya ile etkileşimde bulunmak için genellikle gömülü teknolojiler dahil olmak üzere yazılım sistemleri, iletişim teknolojileri, sensörleri/aktüatörleri içermektedir. Akıllı Fabrikalarda üretim prosesleri, cihazların ve sistemlerin birbirleriyle anlık olarak haberleşip, üretim süreçleri içindeki tüm ihtiyaçları belirleyip düzenlemeleri anlamına gelmektedir. Örneğin, üretimin herhangi bir aşamasında malzeme ihtiyacı olması durumunda, gerekli malzeme siparişi otomatik olarak veriliyor, oluşan arızalar anında ve yerinde tespit edilip, çözüm önerileri sunulabilmektedir. Böylece üretimde verimlilik yükselirken, hatalar en aza indirilmektedir. SFS, siber ve fiziksel bileşenleri modern sensör, hesaplama ve ağ teknolojilerini kullanarak etkin bir şekilde entegre edebilen sistemlerdir (Zeadally ve Jabeur, 2016).

SFS, tam bilgi için çeşitli bazı sensorlerden veri kullanmaktadır. Bir sensorün çalışırken arızalanması ile hatalı bir sensörün hiç çalışmaması arasında bir fark vardır ve buna bağlı olarak kullanıcı yanlış bilgi alabilmektedir (Tang vd. 2013). Akıllı üretim, akıllı binalar ve altyapılar, akıllı şehir, akıllı araçlar, akıllı sistem vb. geliştirilmesinde SFS temel bir kavramdır (Alguliyev vd. 2018).

3.2.4.8. Artırılmış gerçeklik

Artırılmış Gerçeklik (AR), gerçek dünya ortamında bilgisayar tarafından üretilen bilgileri kapsayan yeni bir insan makine etkileşim şeklidir. (yarısaydam, başa takılı bir ekran aracılığıyla) AR ile sunulan bilgi, gerçek ortamdan türetilmiştir ve bu nedenle içeriğe duyarlıdır. AR, bu nedenle kullanıcının görünüşünü, çevreleyen gerçek kalınlığın mevcut durumuna duyarlı sanal bilgilerle geliştirebilir (Reinhart ve Patron, 2003). Endüstri 4.0 konseptinin uygulamaya başlamasıyla, dijitalleşen akıllı fabrikalarda AR uygulamaları da kullanılmaya başlanmıştır.

Saha servis operasyonlarından, bakım süreçlerinin yürütülmesine, eğitimden, kalite kontrol uygulamalarına kadar farklı senaryolarda uygulama örnekleri kullanılmaktadır. Endüstri 4.0 kapsamında AR'den en çok faydalanan sektörlerin başında otomotiv gelmektedir. Sadece üretim ve bakım değil, satış aşamasında AR kullanılmaktadır. Araçlarını satın almadan önce müşteriler dilerlerse, AR simülasyon uygulaması ile sürüş deneyimi yaşayabilmektedirler. Dilerlerse, beğendikleri araçların renk ya da aksesuar seçeneklerini AR uygulamasında görebilmektedirler.

3.2.4.9. Büyük veri ve veri analitiği

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte, birbiri ile haberleşen cihazlar, elektronik ortamda yapılan işlemler, veri trafiği, mobil uygulamalar, e-postalar, videolar, resimler, bilimsel veriler vb. üretilen verilerin büyüklüğü her geçen gün artmaktadır. Son birkaç yılda, özellikle 2013'ten beri tüm veri kaynakları kayıt sayısı bakımından artmıştır. Bilimsel yayınlar ve finansman arşivleri için eğilimler benzer bir yol izlemiştir (Huang vd. 2018). Böylesine büyük miktarda verinin güvenli sistemler üzerinde tutulup analiz edilerek anlamlı bilgilere dönüştürülmesi, özellikle üretim yapan işletmeler için çok önem taşımaktadır.

Özellikle endüstriyel üretim yapan işletmelerde, üretim süreçleri ile ilgili onlarca bilginin anlık olarak okunup, anlamlı bilgiye dönüştürülerek, üretimin analizi yapıldığında çok ciddi verim artışı sağlanabilmektedir.

3.2.5. Endüstri 4.0 dijital olgunluk modeli

Endüstri 4.0, imalat endüstrisinde popüler bir konu olmasına rağmen, özellikle küçük ve orta ölçekli işletmelerin çoğu, bu konunun kapsamlarının farkında değildir. Bundan dolayı, bu işletmeler, Endüstri 4.0'a nasıl geçiş yapacaklarını bilmemektedirler. Genellikle, başlangıçta ilk girişimleri, sosyoteknik yaklaşımın üç boyutu (teknoloji, organizasyon, çalışanlar) arasındaki karşılıklı bağımlılıkların bilinmemesi nedeniyle başarısız olmaktadır (Leineweber vd., 2018). Ya da bu bilinmezliklerden dolayı bu işletmeler Endüstri 4.0'a geçiş yapmayı düşünmemektedirler. Yapılan literatür araştırmalarında, Endüstri 4.0 ile ilgili olarak, hazır olma veya olgunluğun değerlendirilmesi için yayınlanan bazı hazırlık ve olgunluk modellerine rastlanmıştır, bunlar Çizelge 3.5.'de gösterilmiştir (Lichtblau vd., 2015).

Çizelge 3.5. Mevcut Endüstri 4.0 hazırlık ve olgunluk modelleri (Lichtblau vd., 2015)

Model adı	Kurum /Kaynak	Değerlendirme Yaklaşımı
IMPULS-Endüstri 4.0 Hazırlık (2015)	VDMA, RWTH Aachen, IW danışmanlık	5 seviyede hazırlığı göstermek için 18 maddeyi içeren 6 boyutta değerlendirme; Bir sonraki aşamaya ilerlemenin önündeki engeller ve bunların nasıl üstesinden gelineceği konusunda tavsiyeler tanımlanır.
Sanayi İçin Güçlendirilmiş ve Uygulama Stratejisi 4.0 (2016)	Lanza ve diğ.	Endüstri 4.0 olgunluğunun hızlı kontrol ve gerçekleştirme süreci modelinin bir parçası olarak değerlendirilmesi; boşluk analizleri ve olgunluk engellerinin üstesinden gelmek için araç kutusu amaçlanmıştır; sunulan ürünler ve geliştirme süreci hakkında ayrıntılı bilgi yok
Endüstri 4.0 / Dijital İşlemler Öz Değerlendirmesi (2016)	Pricewaterhousecoopers	6 boyutta çevrimiçi öz değerlendirme; 4 seviyede dijital olgunluğa odaklanmak; 6 boyutun 3'ünde değerlendirme ücreti olarak danışmanlık aracı olarak başvuru yapılması; sunulan ürünler ve geliştirme süreci hakkında ayrıntılı bilgi yok

The Connected Enterprise Maturity Model (2014)	Rockwell Automation	Endüstri 4.0'ı gerçekleştirmek için beş aşamalı bir yaklaşımın parçası olarak olgunluk modeli; 4 boyutlu teknoloji odaklı değerlendirme; sunulan ürünler ve geliştirme süreci hakkında ayrıntılı bilgi yok (beyaz sayfa)
I 4.0 Reifegradmodell (2015)	FH-Oberösterreich	3 boyutta olgunluk değerlendirmesi, olgunluk göstergesi için 13 madde dahildir. Teklif edilen ürünler ve geliştirme süreci hakkında ayrıntılı bilgi yok (geliştirme süreci bitmedi)

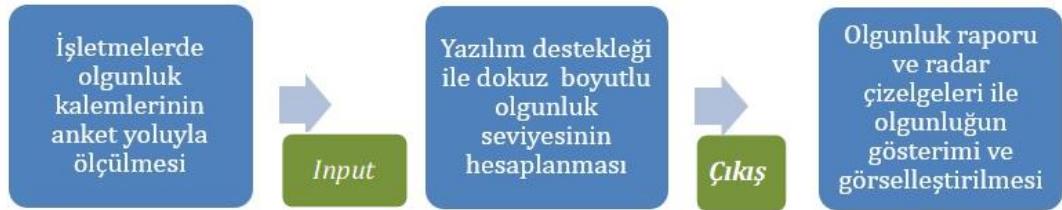
Bu modellerin dışında (Schumacher vd. 2016) Çizelge 3.6'da yeni bir model önerisinde bulunmuş ve dokuz parametre ile olgunluk modelini incelemiştir.

Çizelge 3.6. Schumacher olgunluk modelinin parametreleri (Schumacher vd. 2016)

Parametre	Açıklama
Strateji	Endüstri 4.0 yol haritası uygulama, gerçekleştirilmesi için mevcut kaynaklar, iş modellerinin uyarlanması, ...
Liderlik	Liderlerin istekliliği, yönetim yetkinlikleri ve yöntemleri, Endüstri 4.0 için merkezi koordinasyonun varlığı, ...
Müşteriler	Müşteri verilerinin kullanılması, satışların / hizmetlerin dijitalleştirilmesi, müşteri dijital medya yetkinliği, ...
Ürünler	Ürünlerin kişiselleştirilmesi, ürünlerin dijitalleştirilmesi, diğer sistemlere ürün entegrasyonu, ...
Operasyonlar	Süreçlerin yerleştirilmesi, modelleme ve simülasyon, disiplinlerarası ve bölümlerarası iş birliği, ...

Kültür	Bilgi paylaşımı, açık yenilik ve çapraz şirket iş birliği, şirkette bilgi ve iletişim teknolojileri (BİT) değeri, ...
İnsanlar	Çalışanların BİT yeterlilikleri, çalışanların yeni teknolojilere açık olması, çalışanların özerkliği, ...
Yönetim	Endüstri 4.0 için çalışma yönetmeliği, teknolojik standartların uygunluğu, fikri mülkiyetin korunması, ...
Teknoloji	Modern BİT'in varlığı, mobil cihazların kullanımı, makineden makineye iletişimin kullanılması, ...

Her bir ögenin gelişim yolu, seviye 1 Endüstri 4.0 ve seviye 5 kavramlarını destekleyen tam bir nitelik eksikliğini tanımlayan beşinci olgunluk seviyesinden geçmektedir ve 5. seviye, gerekli niteliklerin teknolojisini temsil etmektedir. İşletmenin olgunluk seviyesini ölçmek, belirlemek ve temsil etmek için üç aşamalı bir prosedür izlemektedir. Bu aşamalar Şekil 3.2'de gösterilmiştir (Schumacher vd. 2016).



Şekil 3.2. Endüstri 4.0 modelinin değerlendirilmesi için üç adım prosedürü (Schumacher vd. 2016)

Görüldüğü gibi, farklı çalışmalarda farklı dijital olgunluk seviye belirleme modelleri önerilerinde bulunulmuştur. Bu araştırmamızda, 20 yıldan daha fazla endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemleri ve dijitalizasyon çalışmaları konusunda tecrübeli, uluslararası firmalarda çalışan 3 uzman kişinin görüşleri alınarak yeni bir model oluşturulmuştur. Bu model Çizelde 3.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.7. Önerilen olgunluk modelinin parametreleri ve açıklamaları

Parametre	Açıklama
Strateji	Endüstri 4.0, dijital teknolojilerin kullanımı yoluyla mevcut ürünleri veya süreçleri geliştirmekten çok daha fazlasını sağlar ve tamamen yeni iş modelleri geliştirme fırsatı sunar. Bu nedenle, Endüstri 4.0'ın uygulanması büyük bir stratejik öneme sahiptir.
İnovasyon	Bilginin her geçen gün katlanarak büyümesi, üretim yapan işletmelerde de önemli değişikliklere neden olmaktadır. Paylaşımçı, yeniliğe açık, teknolojiyi takip eden ve anında uygulayan işletmeler her zaman bir adım önde olmayı başarmaktadırlar.
Organizasyon	İşletmelerin organizasyon yapısına bağlı olarak verilecek yönetim kararları ve bu kararların uygulanma süreçleri, Endüstri 4.0'a geçiş yapmak isteyen üretim işletmeleri için çok kritik bir öneme sahiptir.
Teknoloji	Endüstri 4.0'ın işletmelere sağladığı en büyük faydalardan biri yeni teknolojilerin uygulanması ve/veya mevcut teknolojilerin geliştirilmesidir. Bir üretim işletmesinin en alt seviyedeki endüstriyel otomasyon sistemlerinden, en üst seviyedeki ERP sistemlerine kadar tüm süreçleri kapsayan yeni teknolojilere sahip olması çok önemli avantaj sağlamaktadır.
Operasyonlar	İşletmenin tüm süreçlerinin yönetimi, süreçler arasındaki izlenebilirlik, bölümler arası iş birliği, Endüstri 4.0'a geçmek isteyen işletmelerin başarısı ve uygulanabilirliği açısından öne çıkan önemli kavramlardır.
Personel	Çalışan personelin yeterlilikleri, motivasyonu, işletmeye olan aidiyet duyguları, yeni bilgi ve teknolojilere açık olması, Endüstri 4.0'ı uygulamak isteyen işletmeler için önemli bir kavramdır.

Önerdiğimiz Endüstri 4.0 olgunluk modeli, 6 ana kriterden oluşmaktadır. Her kriter kendi içinde üç alt kriterden oluşmaktadır.

4. METODOLOJİ

4.1. Karar Verme

Çalışmanın bu bölümünde, karar verme kavramına yer verilmiş, tez kapsamında geliştirilen ve dijital olgunluk seviyesinin belirlenmesi uygulamasında kullanılan, çok nitelikli karar verme yöntemleri tanımlanmıştır.

Seçim yöntemi olarak kullanılan AHP hakkında genel bilgiler verilmiştir. AHP'yi oluşturan önemli tanımlar, aksiyonlar, ölçme, tutarlılık oranları ve fayda-maliyet analizleri matematiksel açıdan tanımlanmıştır. Bu çalışmada karar kavramı, karar verme süreci ve yöntemleri temel yaklaşımlar ele alınarak aktarılmaktadır.

4.1.1. Karar verme kavramı

Karar verme, bir değişikliği, bir seçimi, bir kanaatin oluşmasını, bazen de belirsiz bir durumu ifade eder. Türk dil kurumunun tanımına göre karar, 'bir iş veya sorun hakkında düşünülerek verilen kesin yargı'dır, Türk Dil Kurumu (TDK) 2018).

Birçok organizasyonel yapı ve uygulama, karar vericilerin karar değişkenlerinin bir kısmını kontrol ederek kendi hedeflerini optimize etmeye çalıştıkları bir hiyerarşik karar verme senaryosunu içermektedir. Bu problemler, kısıtlama setinin bir kısmının diğer optimizasyon problemlerinin çözümü tarafından belirlendiği iç içe optimizasyon problemleri olarak formüle edilebilir. Dolayısıyla karar vericiler, genellikle çatışan, kendi amaçları ile hiyerarşik bir yapı içinde düzenlenebilirler. Yani, hiyerarşinin bir seviyesinde bir karar verici, kısmen diğer düzeylerde karar vericiler tarafından kontrol edilen değişkenler tarafından belirlenen kendi hedef işlevine sahip olabilmektedir (Tilahun, 2018). Bu tür karar verme problemleri çoğu zaman, bazı sınırlı sayıda hiyerarşik seviyeye sahip Stackelberg oyunları olarak modellenir. Bu tip problemlere genellikle çok seviyeli programlama problemleri (Bracken ve McGill, 1973) denir ve son kırk yıldır araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Sorunların hiyerarşik doğasından dolayı, sistemde daha yüksek seviyelerde alınan karar, takip edenlerin hedef ve sınırlamalarında üst düzeyden gelen değerlere göre seçimini etkilemektedir.

Karar verme, mevcut tüm alternatifler arasından amaç veya amaçlara en uygun ve mümkün olan bir veya birkaçını seçme sürecidir. Başka bir deyişle karar

verme problemin anlamını, o probleme çözüm yolu bulmayı ve bu çözüm yollarının neticelerini tek tek değerlendirip en etkili olanını bulmaktır.

Bir karar verme şu özelliklere sahip olmalıdır (Saaty, 1994);

- Yapılandırma basit olmalı
- Hem gruplara hem bireysellere uyumu yapılabilir olmalı
- Anlaşma ve oy birliğine yönlendirici olmalı
- Genel bakışımız ve öngörülerimiz için doğal olmalı
- Karar verme süreçlerinin ayrıntıları kolayca görülebilir olmalı
- Konu bazında aşırı ayrıntıda uzlaşmayı ve iletişimi gerektirmemelidir.

Karar destek konularının çoğu, karmaşık bir şekilde birbiriyle ilişkili çok sayıda faktörün göz önünde bulundurulması gereken stratejik karar verme faaliyetlerinde önemlidir (Busemeyer, 2001). Farklı kaynaklardan toplanan bilgilerin farklı yorumları genellikle karar alma sürecinde zorluklara neden olmaktadır. Çok sayıda karar verme modeli mevcuttur, ancak niceliksel matematiksel modeller ile sistemlerin karmaşıklığını ele almak, özellikle sayısal veri eksikliği olduğunda, çok zor olabilir. Birçok karar verme tekniği bilgi sunumu, bilişsel ve bulanık modeller kullanır (Papageorgiou ve Salmeron, 2013).

Karar verme (KV), temsil koşulları altındaki karar bilgisine dayanarak, bir kümeden alternatifleri seçme ya da sıralama süreci olarak kabul edilebilir. Grup karar verme (GKV), bu tür karmaşık gerçek dünya sorunlarını çözmek için çözümler sunmaya çalışmaktadır. Bununla birlikte, gerçek hayatta, yönetim bilimi, işletme araştırması ve endüstri mühendisliği uygulamalarında birçok karar verme problemi, genellikle çok kriterli karar verme (ÇKKV) sorunlarını aynı anda çözmeyi gerektirmektedir. Sonuç olarak, çok kriterli grup karar verme süreci (ÇKGKV), çelişkili ve etkileşimli ölçütlerin varlığında, bir grup uygulanabilir alternatifin seçimini veya sıralamasını içermektedir (Yu vd. 2018).

4.1.2. Karar verme süreci ve adımları

Bütün kararları kapsamak üzere her karar probleminde karşılaşılan kavramlar şunlardır;

Karar Verici: Hedef veya hedefler uygun seçeneklerden birini seçerek, bu seçim sonuçlarının sorumluluğunu kabul eden, karar verme yetisine sahip birey veya grubu yansıtır.

Amaç veya ulaşılabilecek sonuç: Karar vericinin karar verme sürecindeki faaliyetleri neticesinde ulaşmak istediği sonuçtur.

Karar kriteri: Karar veren veya yöneticinin seçimini oluşturmada kullandığı değer sistemidir. Karar verme sürecini yönlendirir. Seçenekler arasından seçim veya sıralama yapılmasını sağlar.

Ölçüt: Hedefe ne kadar ulaşıldığını gösteren ölçü veya seçeneklerin temel özellikleri, kaliteleri veya verimlilik parametresidir.

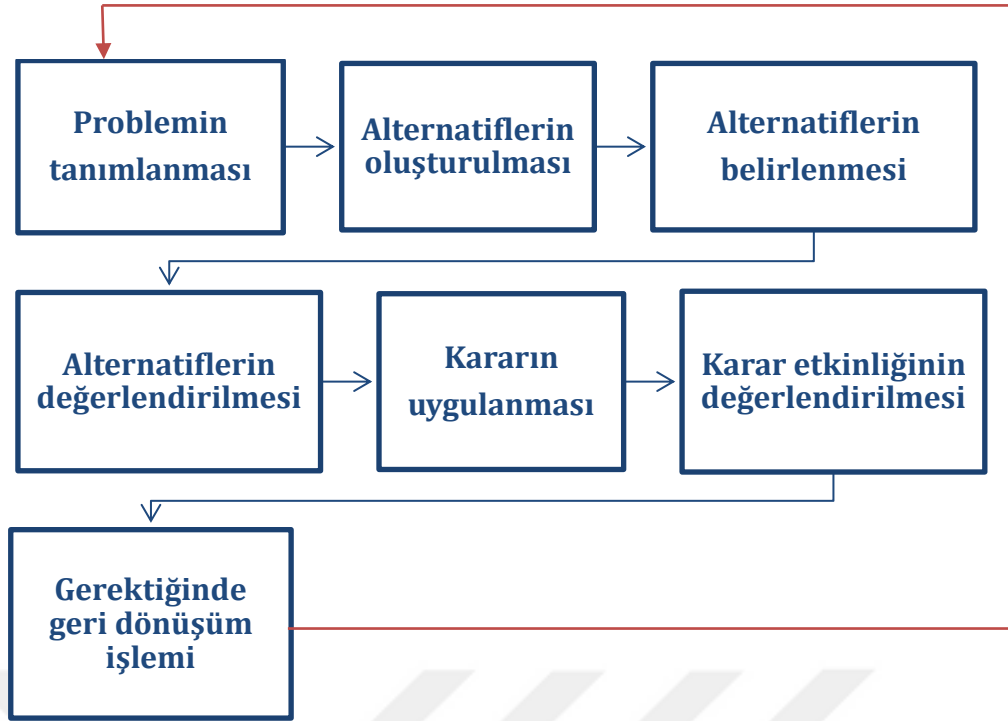
Seçenekler: Sayıları en az iki veya daha fazla olan, karar verinin seçebileceği karar verme sürecinde analiz edilen farklı alternatif faaliyetlerdir. Seçenekler, karar verenin kontrolü altındaki kaynaklara bağlıdır ve kontrol edilebilir değişkenlerdir.

Karar Verme Süreci: Karar verinin problemleri çözmek için uyguladıkları karar vermeye yönelik eylemlerdir. Yani hedef ya da hedefleri meydana getirmeye yönelik seçeneklerden birini eleme işlemidir.

Karar vermede model: Sistem veya sistemlerin soyutlanmış şeklidir. Gerçek bir sistem için modelin amacı, sistemin performansını geliştirmek çabası ile sistemin davranışlarını analiz etmektir. Hayali bir sistem olması durumunda modelin amacı, sistemin bileşenleri arasında fonksiyonel ilişkileri içeren sistemin ideal yapısını tanımlamaktır. Dikkat edilecek olursa sistemin, belirli bir hedef veya hedefleri gerçeklemeye çalışan bileşenler bütünü olduğu görülmektedir (Halaç, 2001).

Karar verme probleminin nasıl ele alınacağına belirlenebilmesi amacıyla karar verme süreci aşamalarının incelenmesi gerekmektedir. Karar bir sonucu ifade ederken karar verme ise, belirli bir başlangıç noktası olan, aşamaların birbirini izlediği ve sonunda bir tercihin yapılması ile sonuçlanan bir faaliyetler topluluğu, bir süreçtir. Dolayısıyla bir sorunun çözümüne ilişkin olası yollardan en uygun olanının seçilmesi, karar verme süreci olarak tanımlanır.

Literatüre bakıldığında karar verme sürecinin adımlarının farklı yazarlar tarafından farklı biçimlerde tanımlandığı görülmekle birlikte karar verme sürecinde karar verme adımları karar türünden bağımsız olarak temelde aynı olmaktadır. Şekil 4.1'de karar verme sürecinde yer alan temel adımlar gösterilmiştir (Schoenfeld, 2011).



Şekil 4.1. Karar verme süreci temel adımları (Schoenfeld, 2011).

4.1.3. Çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri

Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri genellikle karar vericinin karar kriterleri ile ilgili alternatifleri değerlendirmesini ve ölçütlere önemli ağırlık vermesini gerektirir. Ardından, belirlenen ağırlıklara göre en iyi alternatif seçilebilir. Ancak, bir karar verildikten sonra, genellikle karar vericinin yakın gelecekte çeşitli olasılıkların ortaya çıkabileceği göz önüne alındığında, kriterlere doğru ağırlıkların verilip verilmediğinden şüphe duyduğu görülür (Asadabadi, 2018).

Çeşitli Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) metotları daha önce geliştirilmiştir (Govindan vd., 2015) ve seçim kriterlerine göre çeşitli alternatiflerin sıralanması gereken yerlerde kullanılmıştır. Ancak, genellikle bir ÇKKV yöntemi kullanıldığında karar vericinin nihai karar konusunda şüpheli olduğu görülür (Diaz-Balteiro vd., 2017). Bu tür bir şüphe, geleceğin daima belirsizlikle birlikte olmasından ve belirsizliğin karar vericiyi ölçütlere verilen ağırlıklar konusunda şüpheli kılmasından kaynaklanmaktadır (Asadabadi, 2017).

Bir karar verirken, karar ortamını gözlemlemek ve olası durumları önceden tahmin etmek ve düşünmek nihai kararın sağlamlığını artırabilir. Karar vermede böyle bir yaklaşım, insan beyninin karar süreçlerini taklit ederken ilişkili karışıklığı ortadan kaldırır. İnsan beyni en iyi kararı vermek için birçok kriteri

dikkate aldığında, beyin olabilecek birçok olumlu ve olumsuz durumu dikkate alır (Steyvers vd., 2009). Bu, kriterlerin ağırlıklarında sık sık değişiklik yapılması anlamına gelir. Örneğin, bir birim kiralamaya karar verirken, “eğer varsa” akla gelir: misafirlerin olması, çocuk sahibi olma, araba satın alma ya da yeni bir iş bulma imkanı gibi belirsizlikler ortaya çıkabilir. Bu belirsizlikler, birimin fiyatı, mesafesi ve büyüklüğü gibi kriterlerin önemini değiştirebilir. Ağırlıkların önemi değişmeye başladığında, farklı birimlerin/alternatiflerin göreceli değeri değişebilir ve bu da kararı etkileyebilir. İnsan beyni tüm ilgili durumları aynı anda göz önünde bulunduramadığı için (Tzeng ve Huang, 2011), karar vericinin doğru kararın verilip verilmediği konusunda kafası karışabilir.

ÇKKV yöntemleri genel olarak çoklu kriterlere göre bir alternatifin seçilmesini kolaylaştırmak için geliştirilmiştir. Şu anda kullanımda birçok ÇKKV yöntemi vardır. Daha sık kullanılanlar aşağıdaki şekilde listelenmiştir (Asadabadi, 2018).

- Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) (Ahmadi vd., 2017).
- Analitik Ağ Süreci (ANP) (Liao vd., 2018).
- Tercih Sıralaması Organizasyonu Değerlendirmeleri Zenginleştirme Metodu (PROMETHEE) (Brenes ve Gayo-Avello, 2009).
- VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (Çok kriterli optimizasyon ve uzlaşma çözümü veya VIKOR) (Liao vd., 2015).
- Eliminasyon ve Choix Traduisant la REALITE (Gerçekliği veya ELECTRE ifade Etmenin Eliminasyonu ve Seçimi) (Wan vd., 2017).
- En İyi En Kötü Yöntem (BWM) (Rezaei, 2015)
- İdeal Çözüme Benzerlik Olarak Tercih Sırası Tekniği (TOPSIS) (Wang ve Chen, 2017).
- Karar Verme Deneme ve Değerlendirme Laboratuvarı (DEMATEL) (Yazdani vd., 2017).

ÇKKV yöntemleri son birkaç on yılda birçok başka araç ve teknikle bütünleştirilmiştir. Entegrasyonlar, temelde çeşitli karar problemlerini daha etkin bir şekilde ele almak için ÇKKV yöntemlerini güçlendirmek amacıyla yapılmaktadır. Bu çalışmada hepsinin incelemesi mümkün olmamakla birlikte, belirsizlik ve anket seçimiyle ilgili son zamanlarda sıklıkla kullanılan AHP metodunun genel bir incelemesi burada sunulmaktadır.

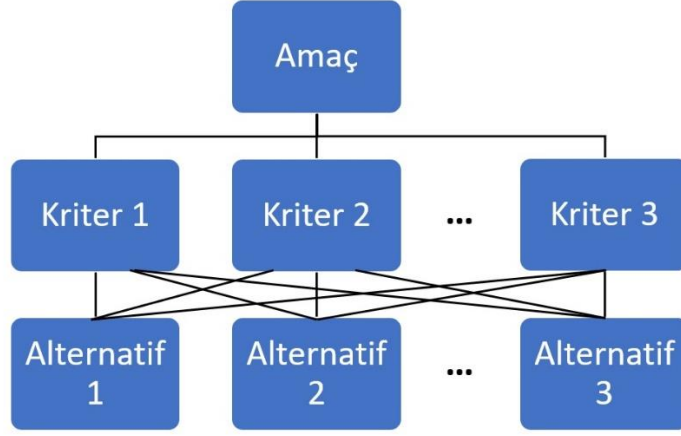
4.2. Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP)

Karar vermeyi destekleyen teknikler arasında analitik hiyerarşi prosesi (AHP) en sık kullanılan ve en iyi bilinen yöntemdir (Ho ve Ma, 2018). AHP, sayısal bir skalaya dayanan ve karar verme sürecini sistematik hale getiren ve yapılandıran ikili karşılaştırmalardan faydalanan bir ÇKKV tekniğidir (Abbas ve Mostafa, 2016). Nitekim birçok çalışma AHP'yi, anket çalışmalarında karar vermeyi desteklemek için hem izole edilmiş hem de bulanık teori, ideal çözüme benzerlik sırasına göre sipariş tercihi tekniği (TOPSIS), karar verme deneme ve değerlendirme laboratuvarı gibi diğer tekniklerle bağlantılı olarak kullanmıştır.

AHP, 1970'lerde Prof. Thomas Saaty tarafından geliştirilmiştir (Santos vd., 2018). (Saaty, 1980)'e göre, AHP'nin karar vermede kullanımı, elemanları öncelikli olarak kullanılan mutlak sayıların standartlaştırılmış tabloları için kullanılan çiftler arasındaki karşılaştırmaya dayanan göreceli bir ölçüm teorisine dayanır. Çok kriterli bir süreç olduğu için farklı kriterlere göre türetilen alternatiflerin önceliklerini karşılamalıdır (Saaty, 2006). Bu nedenle AHP, uzmanlar tarafından değerlendirilen önceden belirlenmiş kriterlerin ikili karşılaştırmaları yoluyla karar vermeyi desteklemektedir (Saaty, 2008).

Gerekli ve önemli kriterler “genel bir amaçtan kriterleri, alt kriterleri ve ardışık seviyelerde alternatiflere inen bir hiyerarşi yapısında” seçilir ve düzenlenir (Saaty, 1990).

Ek olarak, karar verme, kriterleri göz önünde bulundurarak bir faktörün diğerine göre ne kadar önemli olduğunu göstermek için kullanılan ikili karşılaştırmalar için sayısal bir ölçeğe de dayanmaktadır. AHP sayısal ölçeği 1 ile 9 arasında değişmekte olup, 1, iki faaliyet arasındaki önem eşitliğini göstermektedir ve 9, bir faaliyetin diğerinden çok daha önemli olduğunu göstermektedir (Saaty, 2008). Şekil 4.2'de AHP'nin genel hiyerarşik yapısını göstermektedir (Saaty, 1990).



Şekil 4.2. AHP hiyerarşik yapısı (Saaty, 1990)

Öncelik üretmede organize bir şekilde karar verebilmek için kararı aşağıdaki adımlara ayırmamız gerekir.

1-Sorunu tanımlamak ve aranan bilgi türünü belirlemek.

2-Karar hiyerarşisini, kararın amacı ile yukarıdan, daha sonra hedefleri geniş bir perspektiften, orta seviyelere (müteakip unsurların dayandığı kriterler) en düşük seviyeye (genellikle bir alternatifler kümesidir) kadar yapılandırın.

3-Bir çift ikili karşılaştırma matrisi oluşturun. Üst seviyedeki her bir element, hemen altındaki seviyedeki elementleri ona göre karşılaştırmak için kullanılır.

4-Karşılaştırmalardan elde edilen öncelikleri, aşağıdaki seviyedeki öncelikleri tartmak için kullanın. Bunu her eleman için yapın. Ardından, aşağıdaki seviyedeki her bir öge için tartılmış değerleri ekleyin ve genel veya küresel önceliğini alın.

Bu tartım ve ilave işlemlerine devam ederek en alt seviyedeki alternatiflerin nihai öncelikleri elde edilinceye kadar ilave edin. Karşılaştırma yapmak için, bir elemanın, karşılaştırıldıkları kriter veya özellik bakımından kaç kez daha önemli veya baskın olduğunu başka bir eleman üzerinde olduğunu gösteren bir sayı ölçeğine ihtiyacımız vardır. Çizelge 4.1'de ölçek gösterilmektedir (Saaty, 2008).

1-9 ölçeğinin kullanımını doğrulamak için çok sayıda örnek vardır. Çizelge 4.2. (Saaty, 2008), her bir karara varmak için fikir birliğini kullanarak, yaklaşık 30 kişilik bir izleyicinin, ABD'deki içecek tüketiminin baskınlığını (ABD'de hangi içeceğin daha fazla tüketildiğini ve başka bir içecekten ne kadar daha fazla tüketildiğini) tahmin etmek için nasıl karar verdiğini göstermektedir). Resmi istatistiksel veri kaynaklarında verilen tüketimi normalleştirerek elde edilen bağıl tüketimin türetilmiş vektörü ve gerçek vektör, tablonun altındadır.

Çizelge 4.1. AHP'de mutlak sayıların temel ölçeği (Saaty, 2008)

Önem Şiddeti	Tanım	Açıklama
1	Eşit önemli	İki faaliyet hedefe eşit katkıda bulunur
2	Zayıf veya Hafif	
3	Orta önemli	Deneyim ve yargı bir etkinliği diğerine göre hafifçe tercih eder
4	Orta artı	
5	Güçlü önemli	Deneyim ve yargı, bir faaliyetin diğerine göre daha güçlü olmasını sağlar
6	Güçlü artı	
7	Çok güçlü veya kanıtlanmış önemli	Bir faaliyet diğerine göre çok güçlü bir şekilde tercih edilir; hakimiyeti pratikte gösterilmiştir
8	Çok, çok güçlü	
9	Aşırı önemli	Bir etkinliği diğerine tercih eden kanıtlar, mümkün olan en yüksek onaylama sırasına sahiptir.

Çizelge 4.2. İçeceklerin nispi tüketimi (Saaty, 2008)

ABD'de hangi içki daha çok tüketiliyor? Yargılamalar kullanarak tetkik örneği							
ABD'de içecek tüketimi	Kahve	Şarap	Çay	Bira	Soda	Süt	Su
Kahve	1	9	5	2	1	1	1/2
Şarap	1/9	1	1/3	1/9	1/9	1/9	1/9
Çay	1/5	2	1	1/3	1/4	1/3	1/9
Bira	1/2	9	3	1	1/2	1	1/3
Soda	1	9	4	2	1	2	1/2
Süt	1	9	3	1	1/2	1	1/3
Su	2	9	9	3	2	3	1

Not: Matriste verilen yargılara dayanarak türetilmiş ölçek:

0.177 0.019 0.042 0.116 0.190 0.129 0.327

0.022 tutarlılık oranı ile

fiili tüketim (istatistiksel kaynaklardan):

0.180 0.010 0.040 0.120 0.180 0.140 0.330

Öncelikler (matrisi büyük güçlere yükselterek ve her bir sırayı toplayarak ve her bir satırın toplamının toplamına bölerek veya yaklaşık olarak matrisin her bir sırasını ekleyerek ve bunların toplamına bölerek) tablonun altı, her bir içeceğin tüketimini (hacim) tüm içeceğin tüketiminin toplamına bölerek göreceli biçimde ifade edilen gerçek değerlerle birlikte. Fiili tüketim hakkındaki bilgiler ABD İstatistik Özetlerinden elde edilmiştir.

Cevapların çok yakın olduğunu ve içki tüketiminde çok kesin sonuçlara yol açabileceğini bilen birinin tahmin kararları arasında ciddi olduğunu görüyoruz (Saaty, 2008).

AHP yöntemi 11 adımlı bir yöntemdir. Bu adımlar aşağıda gösterilmiştir.

- a) Problemin tanımı
- b) Kriterlerin tanımlanması
- c) Alternatiflerin belirlenmesi
- d) Hiyerarşik yapının oluşturulması
- e) Görece önem değerlerinin belirlenmesi
- f) Karar vericilerin tercihlerinin belirlenmesi
- g) Kriterlerin ikili karşılaştırmalarının yapılması
- h) Öncelik vektörlerinin hesaplanması
- i) Tutarlılık analizi yapılması
- j) Kriterler açısından alternatiflerin ikili karşılaştırmaların ve yüzde ağırlıklarının hesaplanması
- k) Görece önem değerlerinin hesaplanması

a) Problemin tanımı

AHP yönteminde yapılacak ilk adım problemin tanımlanmasıdır. Problem tanımının doğru gerçekleştirilmesi, belirlenecek kriterlerin ve alternatiflerin doğru belirlenmesinde ve buna göre çözümün doğruluğunda çok önemli bir faktördür.

b) Kriterlerin tanımlanması

AHP yönteminin ikinci adımı kriterlerin belirlenmesidir. Bu kriterler, karar vericinin tercihleri üzerinde etkili olan ve problemin çözüme kavuşturulmasında yardımcı olacak kriterler olmalıdır.

c) Alternatiflerin belirlenmesi

Karar vericilerin sahip oldukları seçenekler aynı zamanda söz konusu problem için de birer alternatif konumundadır. Bu sebeple problemin çözümünde öne çıkan alternatifler doğru belirlenmelidir.

d) Hiyerarşik yapının oluşturulması

Önceki üç adım sonucunda elde edilen verilen hiyerarşik bir yapı oluşturacak şekilde tasarlanır. Oluşturulan hiyerarşik yapı amaç, kriter ve alternatifler halinde üç aşamadan oluşmaktadır.

e) Görece önem ölçeklerinin belirlenmesi

Ele alınan problemin hiyerarşik yapısını oluşturduktan sonra hiyerarşiyi oluşturan elemanlar arasında ikili karşılaştırma yapılarak birbirlerine göre üstünlükleri ortaya koyulmalıdır. Bu üstünlükleri ortaya koyabilmek için ölçeklendirme işleminin yapılması gerekmektedir. Saaty'nin (1994) koymuş olduğu "1-9 ölçeği" AHP yöntemi kullanan karar vericiler için ortak ölçek dili olarak kabul edilmektedir (Çizelge 4.1.).

e) Karar vericilerin tercihlerinin belirlenmesi

Belirlenen kriterler arasında Çizelge 4.1.'de mevcut olan ölçeklendirme kullanılarak, anket veya mülakat yolu ile karar vericilerin tercihleri belirlenir. Karar vericiler problemin amacını iyi anlayan ve konu hakkında yeterli düzeyde bilgi sahibi olan kişiler tarafından seçilmelidir. Karar verici sayısı bir kişi olabileceği gibi birden fazla da olabilir. Birden fazla karar vericinin olduğu durumlarda, karar vericiler tarafından elde edilen verilerin geometrik ortalaması alınarak, elde edilen sonuç iki kriter arasındaki önceliği göstermektedir (Saaty, 2000). Sonuçların geometrik ortalaması alınarak matrisler (Kriterlerin amaca göre karşılaştıran ve alternatiflerin kriterlere göre karşılaştıran) oluşturulur.

f) Kriterlerin ikili karşılaştırmalarının yapılması

Karar vericilerden elde edilen verilere göre kriterler için ikili karşılaştırma matrisi oluşturulur. Oluşturulan matris de i'inci kriter ile j'inci kriterin önem derecesi a_{ij} olarak gösterilir. Ayrıca A matrisinde bulunan tüm değerler pozitif ($a_{ij} > 0$, $i, j = 1, 2, \dots, n$) ve köşegendeki değerleri 1 olan matristir. Ayrıca ikili karşılaştırma matrisinde, aynı iki kriterin birbiri üzerindeki önem derecesini " $a_{ij} = 1/a_{ji}$ " eşitliğinden yararlanarak matrise yerleştirilir. Örnek Çizelge 4.3.'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.3. İkili karşılaştırma matrisi

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1	C1/C2	C1/C3	C1/C4	C1/C5	C1/C6
C2	C2/C1	1	C2/C3	C2/C4	C2/C5	C2/C6
C3	C3/C1	C3/C2	1	C3/C4	C3/C5	C3/C6
C4	C4/C1	C4/C2	C4/C3	1	C4/C5	C4/C6
C5	C5/C1	C5/C2	C5/C3	C5/C4	1	C5/C6
C6	C6/C1	C6/C2	C6/C3	C6/C4	C6/C5	1
Toplam	T1	T2	T3	T4	T5	T6

g) Öncelik vektörlerinin hesaplanması

Öncelik vektörü hesaplanırken öncelikli olarak yapılan ilk adım elde edilen A matrisini normalleştirilmiş matrise çevirmektir. Bu işlemi yaparken A matrisindeki her sütun kendi içerisinde toplanır. Her bir sütun değeri de sütunların toplamına bölünür ve normalleştirilmiş matris elde edilir.

A matrisindeki sütunların matematiksel toplam formülü;

$$b_1 \sum_{i=1}^n a_{ij} \quad (1)$$

A matrisindeki sütun elemanlarının o sütun toplamına matematiksel bölünme formülü;

$$c_{ij} = a_{ij}/b_i \quad (2)$$

A matrisinin normalleştirilmiş hali elde edilen C_{ij} 'lerin matris şekline getirilmesi ile gerçekleşmektedir. Ele aldığımız problemin normalleştirilmiş matrisi şu şekildedir. C matrisindeki her satırın ortalaması alınır ve ortaya öncelik vektörü çıkmış olur. Ele alınan problemin öncelik vektörü Çizelge 4.4.'te gösterilmiştir.

Elde edilen öncelik vektörü ile normalleştirilmemiş matris çarpılır ve her satırın toplamı iki kriter arasındaki ağırlıklı toplamı verir.

Çizelge 4.4. Normalleştirme yapılmış matris

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Öncelik
C1	C1/T1	C1/T2	C1/T3	C1/T4	C1/T5	C1/T6	P1
C2	C2/T1	C2/T2	C2/T3	C2/T4	C2/T5	C2/T6	P2
C3	C3/T1	C3/T2	C3/T3	C3/T4	C3/T5	C3/T6	P3
C4	C4/T1	C4/T2	C4/T3	C4/T4	C4/T5	C4/T6	P4
C5	C5/T1	C5/T2	C5/T3	C5/T4	C5/T5	C5/T6	P5
C6	C6/T1	C6/T2	C6/T3	C6/T4	C6/T5	C6/T6	P6

Çizelge 4.5. Ağırlıklandırılmış toplam matris

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Ağırlık
C1	C1/P1	C2/P1	C3/P1	C4/P1	C5/P1	C6/P1	W1
C2	C1/P2	C2/P2	C3/P2	C4/P2	C5/P2	C6/P2	W2
C3	C1/P3	C2/P3	C3/P3	C4/P3	C5/P3	C6/P3	W3
C4	C1/P4	C2/P4	C3/P4	C4/P4	C5/P4	C6/P4	W4
C5	C1/P5	C2/P5	C3/P5	C4/P5	C5/P5	C6/P5	W5
C6	C1/P6	C2/P6	C3/P6	C4/P6	C5/P6	C6/P6	W6

h) Tutarlılık Analizi Yapılması

Tutarlılık, ikili karşılaştırmalar sonucunda oluşan değerlerin birbirleriyle olan mantıksal veya matematiksel ilişkisidir diyebiliriz. Yapılan karşılaştırmaların tutarlılığını hesaplamak için A matrisi ile öncelik vektörünün çarpılması ile D vektörü bulunur. Ele almış olduğumuz problemin D vektörü Çizelge 4.5'te toplam sütununda belirtilmiştir.

D vektöründeki her satır öncelik vektöründeki (w) her satıra bölünerek ei değeri elde edilir. Elde edilen ei değerlerinin ortalaması ile (λmax) temel değeri bulunur (Saaty, 1980).

$$ei = di / wi \quad (3)$$

$$\lambda max = ei / n \quad (4)$$

Daha sonra tutarlılık göstergesi (CI) Çizelge 4.4'te gösterilen Rastsal tutarlılık indeksi yardımı ile tespit edilir. Tutarlılık oranının (CR) düşük olması, karar vericinin ikili karşılaştırmalarda vermiş olduğu kararlarının tutarlı olduğunu, yüksek olması ise vermiş olduğu kararların tutarsız olduğunu göstermektedir.

$$CI = (\lambda \max - n) / (n-1) \quad (5)$$

$$CR = CI / RI \quad (6)$$

Elde edilen tutarlılık göstergesinin rassal tutarlılık indeks değerine bölünmesi ile tutarlılık oranı elde edilmiş olur. Tutarlılık oranı 0,1'den küçük ise yapılan ikili karşılaştırmaların doğru olduğu kabul edilir. Çizelge 4.6. rastsal tutarlılık indeks değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. Rastsal tutarlılık indeks değerleri

N	R.I.	N	R.I.
1	0,00	9	1,45
2	0,00	10	1,49
3	0,58	11	1,51
4	0,90	12	1,54
5	1,12	13	1,56
6	1,24	14	1,57
7	1,32	15	1,59
8	1,41		

i) Kriterler açısından alternatiflerin; ikili karşılaştırmalarının yapılması, yüzde ağırlıklarının hesaplanması

Her bir alternatifin kriterler açısından ikili karşılaştırmasını yapmak için adım 7'de yapılan ikili karşılaştırma yapılır.

j) Genel amaç için alternatiflerin görece önem değerlerinin hesaplanması

Genel amaç ile alternatifler arasındaki ilişkiyi ortaya koyabilmek için adım 10'da elde edilen öncelik vektörleri ile alternatif-kriter matrisi oluşturulur. Oluşturulan

matris kriterler arasındaki ikili ilişkiler sonucunda elde edilen öncelik vektörleri ile çarpılır. Elde edilen matrisin satırları toplanarak her bir alternatifin görece önem değeri hesaplanmış olur.

Çizelge 4.7. Görece önem değeri

Kriterler	Görece Önem Değeri
Kriter 1	G1
Kriter 2	G2
Kriter 3	G3
Kriter 4	G4
Kriter 5	G5
Kriter 6	G6

Görece önem değerlerine göre kriterler büyükten küçüğe doğru sıralanır ve bu sıralamaya göre tercihte bulunulur.

5. UYGULAMA

Bu çalışmadaki temel amaç özellikle küçük ve orta ölçekli işletmelerin, dış danışmanlığı kullanmadan Endüstri 4.0'a geçişlerini sağlayabilmek ve işletmedeki mevcut Endüstri 4.0 dijital olgunluk seviyesini ölçmek için belirlediğimiz parametrelerin sektörde uzman kişiler tarafından önceliklendirilmesi ve ilişkilendirilmesidir.

5.1. Çalışmaya Katılan Uzmanlar

Bu çalışmayı yapabilmek için üç farklı sektörden üç farklı uzmanın görüşleri alınmıştır.

1. Uzman: Beyaz eşya sektöründe 20 yılı aşkın süredir, yönetici pozisyonunda çalışmaktadır.
2. Uzman: Otomotiv sektöründe 17 yıldır, Ar-Ge yöneticisi olarak çalışmaktadır.
3. Uzman: Demir çelik sektöründe, 19 yıldır, üretim müdürü olarak görev yapmaktadır.

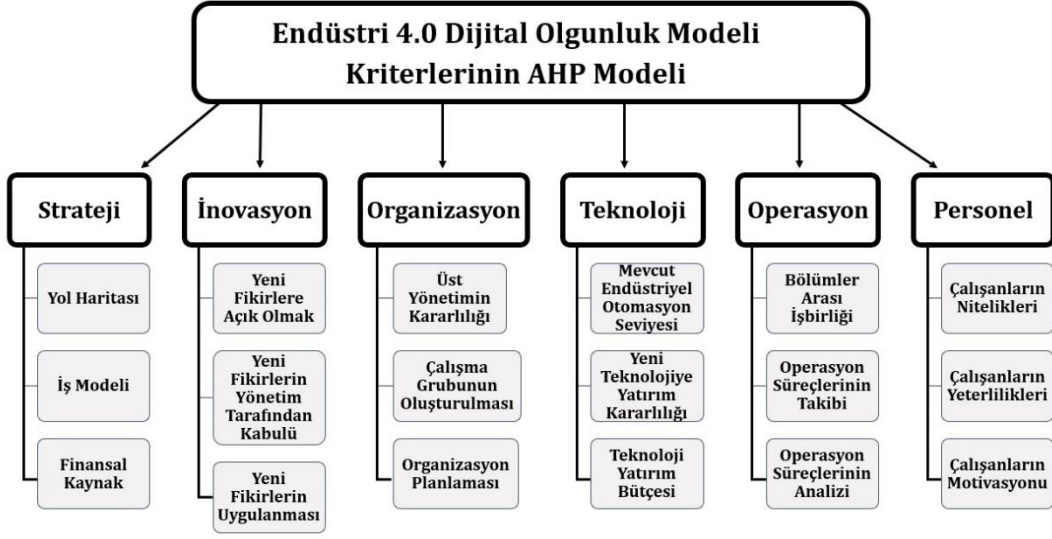
Bu üç uzmanın ortak özellikleri, çalıştıkları işletmelerde endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemleri konusunda uzman olmalarıdır. Aynı zamanda bu üç uzman, Türkiye'de dijitalleşme ve Endüstri 4.0 konularından söz sahibi olan, kendi işletmelerinde ki dijitalleşme çalışmalarına katılmış kişilerdir.

5.2. Endüstri 4.0 Dijital Olgunluk Modeli Kriter ve Alt Kriterleri

Uzmanlara danışılarak ve literatürde yer alan olgunluk modelleri göz önüne alınarak yeni bir dijital olgunluk modeli ortaya çıkarılmıştır. Aşağıda dijital olgunluk modeli hiyerarşisi yer almaktadır (Çizelge 5.1.).

Yeni oluşturulan Endüstri 4.0 olgunluk modeli toplam 6 parametre ve üç alt kriterden oluşmaktadır.

Çizelge 5.1. Endüstri 4.0 dijital olgunluk modeli ana ve alt kriterleri



Alt kriterlere ait açıklamalar aşağıdaki gibidir:

1.Strateji alt kriterleri

- a- **Endüstri 4.0 yol haritası:** Endüstriyel işletmelerin, dijitalizasyon ve Endüstri 4.0 çalışmalarına başlamadan önce, doğru ve kararlı bir yol haritasını oluşturmaları gerekmektedir.
- b- **İş modelinin oluşturulması:** İşletmede uygulanacak iş modellerinin belirlenmesi dijitalizasyon ve Endüstri 4.0 çalışmalarına katkısı çok büyüktür.
- c- **Finansal kaynak:** Dijitalizasyon ve Endüstri 4.0 çalışmaları işletmeler için çok ciddi avantajlar sağlarken, diğer taraftan ciddi yatırım kalemlerinde gündeme getirmektedir.

2.İnovasyon alt kriterleri

- a) **Yeni fikirlere açık olmak:** Dijitalizasyon ve Endüstri 4.0 kavramlarının uygulanabilmesi için yeniliğe açık, sürekli teknolojiyi takip eden bir ekibin olması gerekmektedir.

- b) Yeni fikirlerin yönetim tarafından kabulü:** Yenilik fikirlerinin uygulanabilmesi için yönetim tarafından benimsenmesi ve desteklenmesi büyük önem taşımaktadır.
- c) Yeni fikirlerin uygulanması:** Yeni fikirlerin ve teknolojilerin uygulanabilmesi için, teknolojik alt yapısı güçlü teknik uygulama ekibinin bulunması gerekmektedir.

3.Organizasyon alt kriterleri

- a) Üst yönetimin kararlılığı:** Dijitalizasyon ve Endüstri 4.0 bir işletmenin organizasyonunda köklü değişikliklere ve organizasyonlara neden olmaktadır. Bunun uygulanabilmesi için yönetimin kararlı ve sürdürülebilir düşüncede olması şarttır.
- b) Çalışma grubunun oluşturulması:** Her işletmede farklı organizasyon yapıları vardır. Dijitalizasyon ve Endüstri 4.0 çalışmalarına başlamadan önce, farklı departmanlardan sorumlu kişiler seçilerek çalışma grubunun oluşturulması, sonraki süreçler için çok faydalı olmaktadır.
- c) Organizasyon Planlaması:** Dijitalizasyon ve Endüstri 4.0 uygulamalarına geçişte, işletmenin yeni organizasyon planlaması yapması gerekmektedir.

4.Teknoloji alt kriterleri

- a) Mevcut endüstriyel otomasyon seviyesi:** Endüstri 4.0 uygulamaların temelinde, saha seviyesinde endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemleri ile çalışan cihazlar yatmaktadır. Bu seviyede, işletmelerin kullandıkları teknoloji, dijitalizasyon ve Endüstri 4.0 çalışmalarında çok önemli avantaj sağlamaktadır.
- b) Yeni teknoloji yatırım kararlılığı:** Dijitalizasyon ve Endüstri 4.0 beraberinde yeni teknolojiler getirmektedir. Bu yeni teknolojilere sahip olabilmek için yönetimin kararlılığı önemlidir.
- c) Teknoloji yatırım bütçesi:** Yeni teknolojilerin uygulanabilmesi ve sürekliliğin sağlayabilmek için, işletmeler yeni teknolojiler için finansal kaynak ayırmak zorundadır.

5.Operasyon alt kriterleri

- a) **Bölümler arası iş birliği:** Endüstriyel işletmelerde farklı bölümler ve departmanlar bulunmaktadır. Dijitalizasyon ve Endüstri 4.0 çalışmalarının sürdürülebilirliği açısından bölümler arası iş birliği ve destek çok önemli bir konudur.
- b) **Operasyon süreçlerinin takibi:** Endüstriyel işletmelerdeki operasyon süreçlerinin takibi için gerekli yazılım ve donanımlara sahip olmak gerekir. Bu yazılımlar, dijitalizasyon ve Endüstri 4.0 uygulamaları için gereken yazılımlardır.
- c) **Operasyon süreçlerinin analizi:** Operasyon süreçleri sürekli analiz edilerek elde edilen verilerle süreçlerin iyileştirilmesi yapılır. Bu dijitalizasyon ve Endüstri 4.0'ın getirdiği en büyük avantajlardan biridir.

6.Personel alt kriterleri

- a) **Çalışan Personelin nitelikleri:** Endüstriyel işletmelerde çalışan personelin nitelikleri üretimdeki verimi ve iş kalitesini direkt etkilemektedir. Özellikle, dijitalizasyon ve Endüstri 4.0 çalışmalarına başlarken bir işletmenin nitelikli personele sahip olması, işletme için çok avantajlıdır.
- b) **Çalışanların yeterlilikleri:** Çalışan personelin, konusunda yetkin ve profesyonel olması her işletmenin arzu ettiği bir gerçektir. Endüstriyel işletmelerde, dijitalizasyon ve Endüstri 4.0 çalışmaları ile birlikte çalışan personelin konusunda uzman olması önemli bir avantajdır. İşletmeler çalışan personelin uzman olması ve kendini geliştirmesi için sürekli eğitim programları yapmalıdır.
- c) **Çalışanların motivasyonları:** Çalışan personelin işini sevmesi ve motive olması iş performansını ciddi artırmaktadır. Dijitalizasyon ve Endüstri 4.0 çalışmalarında yer alan personelin motive ve istekli olması işletmenin başarısında çok önemlidir.

5.3. AHP ile Problemin Çözümü ve Sonuçları

İmalat sektöründeki işletmelerin Endüstri 4.0'a geçiş için dijital olgunluk seviyesinin ölçülmesinde kullandığımız ana ve alt kriterlerinin önem derecelerini belirlemek için AHP yönteminden yararlanılmıştır.

Adım1. Karar kriterlerine ilişkin ikili karşılaştırmalar yapılarak ikili karşılaştırma matrisi ($A = [a_{ij}]_{n \times n}$, $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, n$) oluşturulur.

Karar kriterlerinin değerlendirilmesi için farklı üç uzmandan bir grup oluşturulmuştur. Gruptaki uzman kişilerin vermiş olduğu değerlendirmeleri tek bir karara bağlamak için her bir uzman kişi tarafından verilen kararların geometrik ortalaması alınarak tek bir karar değeri elde edilmiştir. Elde edilen karar değerleri EK A'da verilmiştir. Sonuç olarak elde edilen ikili karşılaştırma matrisi ise Çizelge 5.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. Ana kriterlerin ikili karşılaştırma matrisi

	Strateji	İnovasyon	Organizasyon	Teknoloji	Operasyon	Personel
Strateji	1,00	5,00	3,00	5,00	5,00	1,00
İnovasyon	1/5	1,00	1/2	1,00	1,00	1,00
Organizasyon	1/5	2,00	1,00	1,00	2,00	1,00
Teknoloji	1/5	1,00	1,00	1,00	2,00	1/2
Operasyon	1/5	1,00	1/3	1/2	1,00	1/2
Personel	1,00	1,00	1,00	2,00	2,00	1,00

Çizelge 5.2'de gösterilen matris değerleri durulaştırılarak Çizelge 5.3.'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. Ana kriterlere ait durulaştırılmış değerler

	Strateji	İnovasyon	Organizasyon	Teknoloji	Operasyon	Personel
Strateji	1,00	5,00	3,00	5,00	5,00	1,00
İnovasyon	0,20	1,00	0,50	1,00	1,00	1,00
Organizasyon	0,20	2,00	1,00	1,00	2,00	1,00
Teknoloji	0,20	1,00	1,00	1,00	2,00	0,50
Operasyon	0,20	1,00	0,33	0,50	1,00	0,50
Personel	1,00	1,00	1,00	2,00	2,00	1,00
Σ (Toplam)	2,80	11,00	6,83	10,50	13,00	5,00

Adım 2. İkili karşılaştırma matrisi $b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}$ formülü ile normalize edilir. Normalize edilmiş matris değerleri Çizelge 5.4.'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.4. Ana kriterlere ait normalize edilmiş matris

	Strateji	İnovasyon	Organizasyon	Teknoloji	Operasyon	Personel
Strateji	0,36	0,45	0,44	0,48	0,38	0,20
İnovasyon	0,07	0,09	0,07	0,10	0,08	0,20
Organizasyon	0,07	0,18	0,15	0,10	0,15	0,20
Teknoloji	0,07	0,09	0,15	0,10	0,15	0,10
Operasyon	0,07	0,09	0,05	0,05	0,08	0,10
Personel	0,36	0,09	0,15	0,19	0,15	0,20
Σ	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Adım 3. Normalize edilmiş matrisin satırlarının aritmetik ortalaması alınarak karar kriterlerinin önem düzeyleri elde edilir.

$$C1 = \frac{0,36+0,45+0,44+0,48+0,38+0,20}{6} = 0,39$$

$$C2 = \frac{0,36+0,45+0,44+0,48+0,38+0,20}{6} = 0,10$$

$$C3 = \frac{0,36+0,45+0,44+0,48+0,38+0,20}{6} = 0,14$$

$$C4 = \frac{0,36+0,45+0,44+0,48+0,38+0,20}{6} = 0,11$$

$$C5 = \frac{0,36+0,45+0,44+0,48+0,38+0,20}{6} = 0,07$$

$$C6 = \frac{0,36+0,45+0,44+0,48+0,38+0,20}{6} = 0,19$$

Çizelge 5.5. Normalize edilmiş ve önem düzeyleri hesaplanmış matris

	Strateji	İnovasyon	Organizasyon	Teknoloji	Operasyon	Personel	Önem Düzeyi
Strateji	0,36	0,45	0,44	0,48	0,38	0,20	0,39
İnovasyon	0,07	0,09	0,07	0,10	0,08	0,20	0,10
Organizasyon	0,07	0,18	0,15	0,10	0,15	0,20	0,14
Teknoloji	0,07	0,09	0,15	0,10	0,15	0,10	0,11
Operasyon	0,07	0,09	0,05	0,05	0,08	0,10	0,07
Personel	0,36	0,09	0,15	0,19	0,15	0,20	0,19
Σ	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Adım 4. Önem düzeyi ağırlıklarının gerçeği ne kadar yansıttığını belirlemek için kıyaslamalardaki tutarlılık ölçülür. Bir karşılaştırma matrisinin tutarlı olabilmesi için en büyük özdeğeri olan λ_{max} 'ın matris boyutuna (n) eşit olması gerekir. λ_{max} ve buna bağlı olarak hesaplanan tutarlılık indeksi değerlerini kontrol edelim;

$$D = [a_{ij}]_{n \times n} \times [w_i]_{n \times 1} = [d_i]_{n \times 1}$$

Çizelge 5.6. Hesaplanan tutarlılık indeksi değerleri

	Strateji	İnovasyon	Organizasyon	Teknoloji	Operasyon	Personel
Strateji	0,39	0,51	0,42	0,55	0,36	0,19
İnovasyon	0,08	0,10	0,07	0,11	0,07	0,19
Organizasyon	0,08	0,20	0,14	0,11	0,15	0,19
Teknoloji	0,08	0,39	0,14	0,11	0,15	0,09
Operasyon	0,08	0,10	0,05	0,05	0,07	0,09
Personel	0,39	0,10	0,14	0,22	0,15	0,19
Σ	1,08	1,40	0,97	1,15	0,94	0,95

$$E_i = (e_i)_{1 \times n} = \frac{d_i}{w_i}, i = 1, 2, \dots, n$$

$$E_i = [6,27 \ 6,13 \ 6,12 \ 8,70 \ 6,17 \ 6,23]$$

$$\lambda_{maks} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i = \frac{6,27+6,13+6,12+8,70+6,17+6,23}{6} = 6,60$$

$$CI = \frac{\lambda_{maks} - n}{n - 1} = \frac{6,60 - 6}{6 - 1} = 0,12$$

Rastsal tutarlılık indeksi (RI) değeri daha önce kullandığımız Çizelge 3.6'da verilmiştir. Bu uygulamada $n = 6$ olduğundan $RI = 1,24$ olarak çizelgeden seçilir.

Tutarlılık oranı aşağıdaki formülde gösterildiği gibi tutarlılık göstergesinin rastsal tutarlılık indeksine oranı ile bulunur.

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,12}{1,24} = 0,09$$

$0.09 \leq 0.10$ olduğundan verilen cevapların tutarlı olduğu söylenebilir.

AHP Yöntemi kullanılarak Endüstri 4.0 dijital olgunluk modeli ana kriterlerinin önem düzeyleri hesaplanmıştır. Elde edilen sıralama Çizelge 5.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.7. Endüstri 4.0 olgunluk modeli ana kriterlerinin önem düzeyleri

	Önem Düzeyi	%
Strateji	0,39	39
İnovasyon	0,10	10
Organizasyon	0,14	14
Teknoloji	0,11	11
Operasyon	0,07	7
Personel	0,19	19
Σ	1,00	100

Uzmanlar tarafından yapılan değerlendirmeye göre, işletmelerin dijitalleşme ve Endüstri 4.0 uygulamalarında en önemli ana kriterin 'strateji' olduğu görülmektedir. Ana kriter belirlemeleri dikkatle düşünülerek, uzmanların fikirleri doğrultusunda belirlenmiştir. 'Strateji' kriteri gibi diğer her bir kriter büyük önem taşımakta, sonuca giden aşamaların gerçekleştirilmesinde büyük rol almaktadırlar.

İkinci önemli kriterin Personel olduğu görülmektedir. İşletmelerde çalışan personelin niteliği ve uzmanlığı dijital ve Endüstri 4.0 uygulamaları için çok önemlidir. İşletmelerde çalışan personelin nitelikleri ve uzmanlıkları ne kadar

yüksekse o işletmelerde Endüstri 4.0 uygulamalarının başarı oranı o kadar yüksek olduğu gözlenmektedir. Daha sonraki sıralama, Organizasyon, Teknoloji, İnovasyon ve Operasyon olarak gerçekleşmiştir.

Ana kriterlerin ağırlık değerleri ve tutarlılık hesapları yapıldıktan sonra aynı yöntem adımları alt kriterler için de uygulanmıştır. Alt kriterlerin değerlendirilmesi için yine üç uzmanın görüşlerine başvurulmuştur. Uzman kişilerin vermiş olduğu değerlendirmeleri tek bir karara bağlamak için her bir uzman kişi tarafından verilen kararların geometrik ortalaması alınarak tek bir karar değeri elde edilmiştir. Elde edilen karar değerleri EK A'da verilmiştir.

Alt kriterlerle ilgili sonuçlar aşağıdaki çizelgelerde gösterilmiştir

Çizelge 5.8. Strateji kriterinin alt kriterleri

Strateji	Önem Düzeyi	%
Yol Haritası	0,16	16
İş Modeli	0,54	54
Finansal Kaynak	0,30	30
Σ	1,00	100

Çizelge 5.9. İnovasyon kriterinin alt kriterleri

İnovasyon	Önem Düzeyi	%
Yeni Fikirlerle Açık Olmak	0,11	11
Yeni Fikirlerin Yönetim Tarafından Kabulü	0,58	58
Yeni Fikirlerin Uygulanması	0,31	31
Σ	1,00	100

Çizelge 5.10. Organizasyon kriterinin alt kriterleri

Organizasyon	Önem Düzeyi	%
Üst Yönetimin Kararlılığı	0,62	62
Çalışma Grubunun Oluşturulması	0,24	24
Organizasyon Planlaması	0,14	14
Σ	1,00	100

Çizelge 5.11. Teknoloji kriterinin alt kriterleri

Teknoloji	Önem Düzeyi	%
Mevcut End. Otomasyon Seviyesi	0,65	65
Yeni Teknolojiye Yatırım Kararlılığı	0,12	12
Teknoloji Yatırım Bütçesi	0,23	23
Σ	1,00	100

Çizelge 5.12. Operasyon kriterinin alt kriterleri

Operasyon	Önem Düzeyi	%
Bölümler Arası İşbirliği	0,09	9
Operasyon Süreçlerinin Takibi	0,62	62
Operasyon Süreçlerinin Analizi	0,29	29
Σ	1,00	100

Çizelge 5.13. Personel Kriterinin Alt Kriterleri

Personel	Önem Düzeyi	%
Çalışanların Nitelikleri	0,17	17
Çalışanların Yeterlilikleri	0,60	60
Çalışanların Motivasyonu	0,23	23
Σ	1,00	100

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sunulan bu tez çalışması, imalat işletmelerinin Endüstri 4.0'a geçişinde dijital olgunluk seviyesini belirlemek için yeni bir model önerisinde bulunmak ve bu modeldeki kriterlerin önem düzeyini ÇKKV yöntemlerinden AHP kullanarak değerlendirmektedir.

Diğer yaklaşımların aksine, bu araştırmanın ana katkısı, daha kapsamlı bir modelle sonuçlanan çeşitli örgütsel yönlerin dahil edilmesidir. Özellikle 'Teknoloji' ana kriterini ele alırken, üretim işletmelerinin mevcut endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemleri alt yapısını incelemesi, dijital olgunluk seviyesinin belirlenmesinde çok önemli bir kriter olduğunu göstermektedir. Üretim işletmelerinin dijitalleşme ve Endüstri 4.0'a geçiş kararı almasında, mevcut endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemlerinin düzeyi, işletme içinde oluşturulan haberleşme ağının doğru kurgulanmış olması, kontrol sistemlerinden istenilen bilgilerin alınabilirliği, o işletmenin dijitalleşmesi ve Endüstri 4.0'a geçişinde çok önemli avantaj sağlamaktadır.

Bununla birlikte, önerilen modelin kullanışlı bir yazılım aracıyla internet üzerinden ulaşılabilir olması, uygulamada pratik olmasını sağlamıştır. Bu çalışmada görülen ilk deneyimler, üretici firmaların öz değerlendirme sonuçlarını, daha ileri stratejik önlemler için sağlam bir referans noktası olarak kullanabileceklerini göstermektedir.

Bilimsel bir bakış açısıyla ve aynı zamanda sektördeki uzman kişilerinin görüşlerinden faydalanarak, üretim işletmelerinin Endüstri 4.0'a geçişinde dijital olgunluk seviyesini belirlemek için yeni bir model geliştirilmiştir.

Bu kavramsal model, farklı endüstrilerdeki imalat şirketlerinin gelişmişlik durumu hakkında veri toplamamıza ve etkin Endüstri 4.0 stratejileri için ek başarı faktörlerini belirlememize de izin vermektedir.

Geliştirdiğimiz bu model, kendi imalat makineleri ile kendi bünyesinde fiziki mal üreten, belirli bir müşteri grubuna ve farklı yapılara sahip (süreçleri analiz etme imkanı) imalatçıları hedeflemektedir.

Geliştirdiğimiz bu modelde belirlenen Endüstri 4.0 olgunluk kriterlerinin önceliklendirilmesi, ÇKKV metodlarından biri olan AHP yöntemi kullanılarak tamamlanmıştır. Bu yöntem ile ana ve alt kriterlerinin önem düzeyi belirlenmiştir.

Ana kriterlerin sonuçlarına bakılacak olursa sıralama şu şekildedir;

- i. Strateji
- ii. Personel
- iii. Organizasyon
- iv. Teknoloji
- v. İnovasyon
- vi. Operasyon

Strateji kriterinin, ana kriterler arasında önem düzeyi en yüksek ana kriter olarak olduğu görülmektedir. Dijital dönüşüm ve Endüstri 4.0, dijital teknolojilerin kullanımı yoluyla mevcut ürünleri veya süreçleri geliştirmekten çok daha fazlasını sağlar ve tamamen yeni iş modelleri geliştirme fırsatı sunar. Bu nedenle, Endüstri 4.0'ın uygulanması büyük bir stratejik öneme sahiptir. Ana kriterlerin içinde önem düzeyi en yüksek kriterin Strateji olması da değerlendirilmenin ne kadar tutarlı olduğunu göstermektedir.

Ana kriterlerden olan 'Personel'in %19 ile en yüksek ikinci önem düzeyine sahip kriter olduğu görülmektedir. İşletmelerde çalışan personelin niteliği (eğitim düzeyi, vizyonu, yenilikçi yanı vb.) ve uzmanlığı, üretim işletmelerinde üretim süreçlerinin en az hata ile çalışmasına ve üretimin sürekliliğine çok önemli katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, mevcut üretim süreçlerinin dijital ve Endüstri 4.0 uygulamalarına geçişinde de çok önemli bir rol oynamaktadır. İşletmelerde çalışan personelin nitelikleri ve uzmanlıkları ne kadar yüksekse o işletmelerde Endüstri 4.0 uygulamalarının başarı oranının o kadar yüksek olduğu

gözlemlenmektedir. Daha sonraki sıralama, organizasyon, teknoloji, inovasyon ve operasyon olarak gerçekleşmiştir.

İşletmelerin organizasyon yapısına bağlı olarak verilecek yönetim kararları ve bu kararların uygulanma süreçleri, Endüstri 4.0'a geçiş yapmak isteyen üretim işletmeleri için çok kritik bir öneme sahiptir. Organizasyon adımları belirlenirken, mevcut dijital alt yapı detaylı incelenip, dijital dönüşüme yönelik çalışmalarla birlikte yeniliklerin takibi ve uygulanması amaçlanmalıdır.

Teknoloji, Endüstri 4.0'ın işletmelere sağladığı en büyük faydalardan biridir. Teknolojilerin uygulanması ve/veya mevcut teknolojilerin geliştirilmesi dijital dönüşümün işletmelere sağladığı en temel faydalardan biridir. Bir üretim işletmesinin en alt seviyedeki endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemlerinden, en üst seviyedeki ERP sistemlerine kadar tüm süreçleri kapsayan yeni teknolojilere sahip olması dijital dönüşümün hedefleri arasındadır.

İnovasyon kültürünü benimsemiş üretim işletmeleri, günümüz rekabet koşulları içinde, rakiplerine karşı her zaman bir adım önde olmayı başarabilmektedirler. Bilginin her geçen gün katlanarak büyümesi, üretim yapan işletmelerde de önemli değişikliklere neden olmaktadır. Paylaşımçı, yeniliğe açık, teknolojiyi takip eden ve anında uygulayan işletmeler her zaman bir adım önde olabilmektedirler.

Üretim işletmelerinde dijital dönüşüm uygulamaları, işletme içinde ki tüm bölümlerin iş birliği ile tam başarı sağlayabilir. İşletmenin tüm operasyonlarının yönetimi, süreçler arasındaki izlenebilirlik, bölümler arası iş birliği, Endüstri 4.0'a geçmek isteyen işletmelerin başarısı ve uygulanabilirliği açısından öne çıkan önemli kavramlardan biridir.

Alt kriterlerin önem düzeyine göre sıralanması aşağıdaki gibidir:

- i. Mevcut Endüstriyel Otomasyon Seviyesi (Teknoloji)
- ii. Operasyon Süreçlerinin Takibi (Operasyon) ve Üst Yönetimin Kararlılığı (Organizasyon)

- iii. Çalışanların Yeterlilikleri (Personel)
- iv. Yeni Fikirlerin Yönetim Tarafından Kabulü (İnovasyon)
- v. İş Modeli (Strateji)
- vi. Yeni Fikirlerin Uygulanması (İnovasyon)
- vii. Finansal Kaynak (Strateji)
- viii. Operasyon Süreçlerinin Analizi (Operasyon)
- ix. Çalışma Grubunun Oluşturulması (Organizasyon)
- x. Teknoloji Yatırım Bütçesi (Teknoloji) ve Çalışanların Motivasyonu (Personel)
- xi. Çalışanların Nitelikleri (Personel)
- xii. Yol Haritası (Strateji)
- xiii. Organizasyon Planlaması (Organizasyon)
- xiv. Yeni Fikirlere Açık Olmak (İnovasyon)
- xv. Yeni Teknolojiye Yatırım Kararlılığı (Teknoloji)
- xvi. Bölümler Arası İş birliği (Yönetim ve Organizasyon)

Ana kriterlerden 'Strateji' %39 ile en yüksek önem düzeyine sahip kriter olduğu görülmektedir. Oysaki 'Teknoloji' ana kriterinin altında bulunan 'Mevcut Endüstriyel Otomasyon ve Kontrol Seviyesi' alt kriteri %65 ile en yüksek önem düzeyine sahip alt kriter olmuştur. Bu ilk bakışta tutarsız gibi görülebilir, ama üretim işletmelerinde alınacak kararlar ve bunlara bağlı uygulanacak stratejiler, işletmenin üretimde kullandığı teknolojilerden her zaman daha yüksek önem düzeyine sahip olduğu, yapılan literatür araştırmalarında da gözlenmiştir.

Gelecekteki araştırma faaliyetleri temel olarak şirkete özgü hedef durumları belirleme, olgunluk kriterlerinin doğruluğunu arttırma ve girintili olgunluk seviyelerine ulaşmak için stratejik adımlar amaçlanmalıdır. Ayrıca, stratejik programların ve projelerin belirlenmesine olanak sağlamak için belirli kalemlerin ve ilgili boyutların olgunluğunu arttıracak yol haritaları geliştirilmelidir. Bu olgunluk modelinin bulgularına dayanarak, otomotiv imalat şirketlerinde Endüstri 4.0 olgunluk değerlendirmesi için daha fazla alana özgü bir model planlanmaktadır. Farklı endüstriyel sektörler için, sektörün ayrıntılarını inceleyebilecek farklı dijital olgunluk modelleride yapılabilir. Bu olgunluk modeli, Endüstri 4.0 ve dijital olgunluk seviyesine ulaşmak için tasarlanmamıştır.

Bununla birlikte, olgunluk modelimiz, Endüstri 4.0 ile ilgili mevcut yeteneklere ve daha sonra ilgili stratejiler ve eylem planlarına ilişkin kararlara yansımaya yardımcı olabilir.

Endüstri 4.0'a yönelik başarılı bir kurumsal gelişme durumunda, teknolojinin, organizasyonun ve personelin üç boyutu, aralarındaki olası bağımlılıklar kadar aynı derecede dikkate alınmalıdır. Birincisi, ortak tanımlar ve olgunluk modellerinden türetilen ve üç boyuttan birine atanabilecek çeşitli Endüstri 4.0 kriterlerini belirleyerek burada sunulan olgunluk modeli kavramında elde edilir. Endüstri 4.0'a geçiş sırasında dikkate alınması gereken kriterler arasındaki bağlantılar, model bağlamında ilişkiler ve bağımlılıklar tarafından açıklanmaktadır. Bu sayede işletmeler tanımlanmış bir hedef duruma ulaşırken göz önünde bulundurulması gereken gerekli eylem alanlarında belirlemektedirler.

Ayrıca, bu olgunluk modeli kavramının bir yazılım aracı içerisindeki araştırma projesi uyarılama prosedür modelinin bir parçası olarak uygulanması da amaçlanmaktadır. Bu, işletmelerin kendilerini dış danışmanlık olmadan Endüstri 4.0 geçişinde kolayca sınıflandırmasını ve yönlendirmesini mümkün kılacaktır.

Gelecekte Endüstri 4.0 ve dijital dönüşümü düşünen şirketlere daha kapsamlı destek sağlamak için, belirli iş sektörlerine veya alanlarına odaklanan modüler çözümler için hala bir gereksinim vardır.

KAYNAKLAR

- Abbas M., Mostafa S., 2016. Decision making with the analytical hierarchy process (AHP) for materials and design selection in the POPE lawn mower manufacturing for minimizing environmental impacts. In: Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, pp. 97-100
- Abramovici M., Stark R., (Eds.), Smart Product Engineering, 2013
- Ahmadi H.B., Petrucci S.H.H., Wang X., 2017. Integrating sustainability into supplier selection with analytical hierarchy process and improved grey relational analysis: a case of telecom industry, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 90 (9-12) (2017) 2413–2427
- Alguliyev R., Imamverdiyev Y., Sukhostat L., 2018. Cyber-physical systems and their security issues, *Computers in Industry* Volume 100, September 2018, Pages 212-223
- Asadabadi M.R., 2017. A customerbased supplier selection process that combines quality function deployment, the analytic network process and a Markov chain, *Eur. J. Oper. Res.* (2017)
- Asadabadi M.R., 2018. The stratified multi-criteria decision-making method, *Knowledge-Based Systems*, Volume 162, 15 December 2018, Pages 115-123
- Basl J., 2017. Pilot Study Of Readiness Of Czech Companies to Implement The Principles Of Industry 4.0, *Management and Production Engineering Review*, Volume 8, Number 2, June 2017, Pages 3–8
- Bogner E., Voelklein T., Schroedel O., Franke J., 2016. Study Based Analysis on the Current Digitalization Degree in the Manufacturing Industry in Germany, 49th CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP-CMS 2016), *Procedia CIRP* 57 (2016) 14–19
- Boyes H., Hallaq B., Cunningham J., Watson T., 2018. The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework, *Computers in Industry* Volume 101, October 2018, Pages 1-12
- Bracken J., McGill J.T., 1973. Mathematical programs with optimization problems in the constraints, *Operations Research* 1973, Volume 21, page 37–44
- Brenes D.J., Gayo-Avello D., 2009. Stratified analysis of AOL query log, *Inf. Sci.* 179 (12) (2009) 1844–1858
- Busemeyer J.R., 2001. Dynamic decision making, in: *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*, 2001, pp. 3903–3908

- Casola V., De Benedictis A., Rak M., Rios E., 2016. Security-by-design in clouds: a Security-SLA driven methodology to build secure cloud applications, CLOUD FORWARD: From Distributed to Complete Computing, CF2016, 18-20 October 2016, Madrid, Spain
- Chen J.K., Chen I.S., 2010. Using a novel conjunctive MCDM approach based on DEMATEL, fuzzy ANP, and TOPSIS as an innovation support system for Taiwanese higher education, *Expert Syst. Appl.* 37 (3) (2010) 1981–1990
- Chen Y., Dong F., 2013. Robot machining: recent development and future research issues, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* June 2013, Volume 66, Issue 9–12, pp 1489–1497
- Chenayah S., Chhaing H., Takeda E., 2010. Qualitative multicriteria decision aid by eigenvector method, in: *The 14th Asia Pacific Regional Meeting of International Foundation for Production Research*, 2010
- Conway J., 2015. *The Industrial Internet of Things: An Evolution to a Smart Manufacturing Enterprise*, Schneider Electric Whitepaper, 2015, p. 2.
- Davies R., Coole T., Smith A., 2017. Review of socio-technical considerations to ensure successful implementation of Industry 4.0, 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM2017, 27-30 June 2017, Modena, Italy, *Procedia Manufacturing* 11 (2017) 1288–1295
- Desoutter web sitesi, 2018. Erişim Tarihi: 23.12.2018
<https://www.desouttertools.com/industry-4-0/news/503/industrial-revolution-from-industry-1-0-to-industry-4-0>
- Diaz-Balteiro L., González-Pachón J., Romero C., 2017. Measuring systems sustainability with multi-criteria methods: A critical review, *Eur. J. Oper. Res.* 258 (2) (2017) 607–616
- Dombrowski U., Wagner T., 2014. Mental strain as field of action in the 4th industrial revolution, *Procedia CIRP*, vol. 17, pp. 100–105, 2014
- Dos Santos P.H., Neves S.M., Sant’Anna D.O., Oliveira C.H., Carvalho H.D., 2018. The analytic hierarchy process supporting decision making for sustainable development: An overview of applications, *Journal of Cleaner Production* 212 (2019) 119-138
- Edgar T.F., Pistikopoulos E.N., 2018. Smart manufacturing and energy systems, *Computers and Chemical Engineering* 114 (2018) 130–144
- Faheem M., Shah S.B.H., Butt R.A., Raza B., Anwar M., Ashraf M.W., Ngadi Md.A., Gungor V.C., 2018. Smart grid communication and information technologies in the perspective of Industry 4.0: Opportunities and challenges, *Computer Science Review* 30 (2018) 1–30

- Ferrari P., Flammini A., Vitturi S., 2006. Performance analysis of PROFINET, *Computer Standards & Interfaces* 28 (2006) 369 – 385
- Ganzarain J., Errasti N., 2016. Three Stage Maturity Model in SME's towards Industry 4.0, *Journal of Industrial Engineering and Management, JIEM*, 2016 – 9(5): 1119-1128
- Gao R., Wang L., Teti R., Dornfeld D., Kumara S., Mori M., Helu M., 2015. Cloud-enabled prognosis for manufacturing, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 64, no. 2, pp. 749–772, 2015
- Gholami M., Taboun M.S., Brennan R. W., 2017. A Wireless Intelligent Network for Industrial Control, 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM2017, 27-30 June 2017, Modena, Italy, *Procedia Manufacturing* 11 (2017) 878 – 888
- Giustozzi F., Saunier J., Zanni-Merk C., 2018. Context Modeling for Industry 4.0: an Ontology-Based Proposal, *Procedia Computer Science* 126 (2018) 675–684
- Gjeldum N., Mladineo M., Veza I., 2016. Transfer of Model of Innovative Smart Factory to Croatian Economy using Lean Learning Factory, 6th CLF – 6th CIRP Conference on Learning Factories, *Procedia CIRP* 54 (2016) 158 – 163
- Gligor D. M., Holcom M.C., 2012. Understanding the role of logistics capabilities in achieving supply chain agility: a systematic literature review, *Supply Chain Management*, vol. 17, no. 4, pp. 438–453, Jun. 2012
- Govindan K., Rajendran S., Sarkis J., Murugesan P., 2015. Multi criteria decision making approaches for green supplier evaluation and selection: a literature review, *J. Cleaner Prod.* 98 (2015) 66–83
- Halaç O., 2001. *Kantatif Karar Verme Teknikleri*. 5. Basım Alfa Yayınları: 222, Melisa Matbaacılık, İstanbul, 550 s.
- Ho, W., Ma, X., 2018. The state-of-the-art integrations and applications of the analytic hierarchy process, *European Journal of Operational Research* Volume 267, Issue 2, 1 June 2018, Pages 399-414
- Hoppe S., 2014. Forerunner to Industry 4.0 and the Internet of Things. *Control Engineering* 61 (2014) 48-50.
- Hoxha V., I Bula., Shala M., Hajrizi E., 2016. Cost-Oriented Open source Automation Potential Application in Industrial Control Applications, Pristina, Kosovo, IFAC 16 International Federation of Automatic Control

- Huang Y., Porter A. L., Cunningham S. W., Robinson D. K.R., Liu J., Zhu D., 2018. A technology delivery system for characterizing the supply side of technology emergence: Illustrated for Big Data & Analytics, *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 130, May 2018, Pages 165-176
- Issa A., Hatiboglu B., Bildstein A., Bauernhansl T., 2018. Industrie 4.0 roadmap: Framework for digital transformation based on the concepts of capability maturity and alignment, 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems, *Procedia CIRP* 72 (2018) 973–978
- Kagermann H., Helbig J., Hellinger A., Wahlster W., 2013. Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the Future of German Manufacturing Industry; Final Report of the Industrie 4.0 Working Group, Forschungsunion, 2013.
- Kaya T., Kahraman C., 2011. An integrated Fuzzy AHP–ELECTRE methodology for environmental impact assessment, *Expert Systems with Applications* Volume 38, Issue 7, July 2011, Pages 8553-8562
- Kritikos K., Massonet P., 2016. An Integrated Meta-Model for Cloud Application Security Modelling, *CLOUD FORWARD: From Distributed to Complete Computing*, CF2016, 18-20 October 2016, Madrid, Spain
- Leineweber S., Wienbruch T., Lins D. K. D., Kuhlenkötter B., 2018. Concept for an evolutionary maturity based Industrie 4.0 migration model, 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems, *Procedia CIRP* 72 (2018) 404–409
- Leipzig T., Gamp M., Manz D., Schöttle K., Ohlhausen P., Oosthuizen G., Palm D., Leipzig K., 2016. Initialising customer-orientated digital transformation in enterprises, 14th Global Conference on Sustainable Manufacturing, GCSM 3-5 October 2016, Stellenbosch, South Africa, *Procedia Manufacturing* 8 (2017) 517–524
- Liao H., Mi X., Xu Z., Xu J., Herrera F., 2018. Intuitionistic fuzzy analytic network process, *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* (2018)
- Liao H., Xu Z., Zeng X.-J., 2015. Hesitant fuzzy linguistic VIKOR method and its application in qualitative multiple criteria decision making, *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* 23 (5) (2015) 1343–1355
- Lichtblau K., Stich V., Bertenrath R., Blum M., Bleider M., Millack A., Schmitt K., Schmitz E., Schröter M., 2015. "IMPULS-Industrie 4.0-Readiness," Impuls-Stiftung des VDMA, Aachen-Köln; 2015
- Liebrecht C., Jacob A., Kuhnle A., Lanza G., 2017. Multi-Criteria Evaluation of Manufacturing Systems 4.0 under Uncertainty, The 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems, *Procedia CIRP* 63 (2017) 224–229

Lucke D., Constantinescu C., Westkämper E., Smart Factory - A Step towards the Next Generation of Manufacturing, in: M. Mitsuishi, K. Ueda, F. Kimura (Eds.), Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier, Springer London, 2008, pp. 115-118.

MCS Factory Digitalization web sitesi, 2018. Erişim Tarihi: 23.12.2018
http://www.mfd.com.tr/e40-nedir_s_tr_147.aspx

Monostori L., 2014. Cyber-physical Production Systems: Roots, Expectations and R&D Challenges, *Procedia CIRP*, vol. 17, pp. 9–13, 2014, Variety Management in Manufacturing, Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems

Negahban A., Smith J. S., 2014. Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis, *Journal of Manufacturing Systems* 33 (2014) 241–261

Papageorgiou E.I., Salmeron J.L., 2013. Methods and algorithms for fuzzy cognitive mapbased decision support, in: E.I. Papageorgiou (Ed.), *Fuzzy Cognitive Maps for Applied Sciences and Engineering*, 2013.

Park S., 2016. Information Technology and Quantitative Management (ITQM 2016) Development of Innovative Strategies for the Korean Manufacturing Industry by Use of the Connected Smart Factory (CSF), *Procedia Computer Science* 91 (2016) 744–750

Pereira T., Barreto L., Amaral A., 2017. Network and information security challenges within Industry 4.0 paradigm, *Manufacturing Engineering Society International Conference 2017, MESIC 2017*, 28-30 June 2017, Vigo (Pontevedra), Spain

Prinz C., Morlock F., Freith S., Kreggenfeld N., Kreimeier D., Kuhlenkötter B., 2016. Learning Factory modules for smart factories in Industrie 4.0, *Procedia CIRP* 54 (2016) 113–118

Qin J., Liu Y., Grosvenor R., 2016. A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond, Changeable, Agile, Reconfigurable & Virtual Production, *Procedia CIRP* 52 (2016) 173 – 178

Reinhart G. ve Patron C., 2003, Integrating Augmented Reality in the Assembly Domain – Fundamentals Benefits and Applications, *CIRP Annals*, Volume 52, Issue 1, 2003, Pages 5-8

Rezaei J., 2015. Best-worst multi-criteria decision-making method, *Omega* 53 (2015) 49–57

Rüßmann M., Lorenz M., Gerbert P., Waldner M., 2015. Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries, (April 09, 2015) 1-14.

- Saaty T.L., 1980. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation, Advanced Book Program. McGraw-Hill
- Saaty T.L., 1990. How to make a decision: the analytic hierarchy process. Eur. J. Oper. Res. 48, 9-26
- Saaty T.L., 1994. How to make a decision: the analytic hierarchy process Interfaces, 24(6):19-43
- Saaty T.L., 2006. Rank from comparisons and from ratings in the analytic hierarchy/network processes. Eur. J. Oper. Res. 168, 557-570
- Saaty T.L., 2008. Decision making with the analytic hierarchy process. Int. J. Serv.Sci. 1, 83-98
- Schlechtendahl J., Keinert M., Kretschmer F., Lechler A., Verl A., 2015. Making existing production systems Industry 4.0-ready. Prod. Eng. Res. Devel. 9 (2015) 143-148.
- Schoenfeld A. H., 2011. How we think: A theory of goal-oriented decision making and its educational applications. New York, NY: Routledge.
- Schuh G., Prote J.-P., Dany S., Cremer S., Molitor M., 2017. Classification of a Hybrid Production Infrastructure in a Learning Factory Morphology, 7th Conference on Learning Factories, CLF 2017, Procedia Manufacturing 9 (2017) 17-24
- Schuhmacher J., Hummel V., 2016. Decentralized control of logistic processes in cyber-physical production systems at the example of ESB Logistics Learning Factory, 6th CLF-6th CIRP Conference on Learning Factories, Procedia CIRP 54 (2016) 19-24
- Schumacher A., Erol S., Sihni W., 2016. A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises, Procedia CIRP Volume 52, 2016, Pages 161-166
- Shariatzadeh N., Lundholm T., Lindberg L., Sivard G., 2016. Integration of digital factory with smart factory based on Internet of Things, 26th CIRP Design Conference, Procedia CIRP 50 (2016) 512-517
- Shen W., Hao Q., Yoon H.J., Norrie D.H., 2006. Applications of agent-based systems in intelligent manufacturing: An updated review. Advanced engineering INFORMATICS 20 (2006) 415-431.
- Siemens Industry Mall web sitesi¹, 2018. Erişim Tarihi: 23.12.2018
<https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Products/10239940?tree=CatalogTree>

- Siemens Industry Mall web sitesi², 2018. Erişim Tarihi: 23.12.2018
<https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Products/10231606?tree=CatalogTree#Overview>
- Siemens Industry Mall web sitesi³, 2019. Erişim Tarihi: 27.01.2019
<https://w3.siemens.com/mcms/distributed-io/en/ip20-systems/et-200sp/et200sp-communication-modules/pages/default.aspx>
- Simons S., Abé P., Nesar S., 2017. Learning in the AutFab – the fully automated Industrie 4.0 learning factory of the University of Applied Sciences Darmstadt, 7th Conference on Learning Factories, CLF 2017, Procedia Manufacturing 9 (2017) 81 – 88
- Singh D., Tripathi G., Jara A.J., 2014. A Survey of Internet-of-Things: Future Vision, Architecture, Challenges and Services, In Proc. IEEE World Forum on Internet of Things 2014, At Seoul, 2014, pp. 287–292
- Steyvers M., Lee M.D., Wagenmakers E.-J., 2009. A Bayesian analysis of human decisionmaking on bandit problems, J. Math. Psych. 53 (3) (2009) 168–179
- Suginouchi S., Kokuryo D., Kaihara T., 2017. Value Co-Creative Manufacturing System for Mass Customization: Concept Of Smart Factory and Operation Method Using Autonomous Negotiation Mechanism, The 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems, Procedia CIRP 63 (2017) 727–732
- Tang L.-A., Yu X., Kim S., Gu Q., Han J., Leung A., La Porta T., 2013. Trustworthiness analysis of sensor data in Cyber-Physical Systems, Journal of Computer and System Sciences, Journal of Computer and System Sciences 79 (2013) 383–401
- Tilahun S.L., 2018. Feasibility reduction approach for hierarchical decision making with multiple objectives, Operations Research Perspectives, Available online 15 December 2018, 100093 open Access, In Press, Corrected Proof, <https://doi.org/10.1016/j.orp.2018.100093>
- Tupa J., Simota J., Steiner F., 2017. Aspects of risk management implementation for Industry 4.0, 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM2017, 27-30 June 2017, Modena, Italy, Procedia Manufacturing 11 (2017) 1223 – 1230
- Türk Dil Kurumu (TDK) Web Sitesi, 2018. Erişim Tarihi: 29.12.2018
http://tdk.gov.tr/index.php?option=com_gts&arama=gts&guid=TDK.GTS.5c277613384ba5.27140992
- Tzeng G.-H., Huang J.-J., 2011. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications, CRC press, 2011

- Urbas L., Obst M., Stöss M., 2012. Formal Models for High Performance HMI Engineering, IFAC Proceedings Volumes, Volume 45, Issue 2, 2012, Pages 854-859
- Vinodh S., Prasanna M., Prakash N.H., 2014. Integrated Fuzzy AHP-TOPSIS for selecting the best plastic recycling method: A case study, Applied Mathematical Modelling 38 (2014) 4662-4672
- Wahlster W., 2012. From Industry 1.0 to Industry 4.0: Towards the 4th Industrial Revolution, Forum Business meets Research, 2012
- Wan S.-P., Xu G.-l., Dong J.-y., 2017. Supplier selection using ANP and ELECTRE II in interval 2-tuple linguistic environment, Inf. Sci. 385 (2017) 19-38
- Wang C.-Y., Chen S.-M., 2017. Multiple attribute decision making based on interval-valued intuitionistic fuzzy sets, linear programming methodology, and the extended TOPSIS method, Inf. Sci. 397 (2017) 155-167
- Wank A., Adolph S., Anokhin O., Arndt A., Anderl R., Metternich J., 2016. Using a Learning Factory Approach to Transfer Industrie 4.0 Approaches to Small- and Medium-Sized Enterprises, 6th CLF-6th CIRP Conference on Learning Factories, Procedia CIRP 54 (2016) 89-94
- Weber C., Königsberger J., Kassner L., Mitschang B., 2017. M2DDM – A Maturity Model for Data-Driven Manufacturing, The 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems, Procedia CIRP 63 (2017) 173-178
- Yazdani M., Chatterjee P., Zavadskas E.K., Zolfani S.H., 2017. Integrated QFD-MCDM framework for green supplier selection, J. Cleaner Prod. 142 (2017) 3728-3740
- Yu B., Cai M., Li Q., 2018. A λ -rough set model and its applications with TOPSIS method to decision making, In Press, Knowledge-Based Systems, Available online 13 December 2018, <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2018.12.013>
- Yuan Z., Qin W., Zhao J., 2017. Smart Manufacturing for the Oil Refining and Petrochemical Industry, Engineering Volume 3, Issue 2, April 2017, Pages 179-182
- Zeadally S., Jabeur N., Cyber-Physical System Design with Sensor Networking Technologies, The Institution of Engineering and Technology, London UK, 2016

EKLER

EK A. Çizelgeler



EK A. Çizelgeler

Çizelge EK A.1. Ana kriterlerin geometrik ortalaması

	Strateji	İnovasyon	Organizasyon	Teknoloji	Operasyon	Personel
Strateji	1,00	5,00	3,00	5,00	5,00	1,00
İnovasyon		1,00		1,00	1,00	1,00
Organizasyon		2,00	1,00	1,00	2,00	1,00
Teknoloji				1,00	2,00	
Operasyon					1,00	
Personel				2,00	2,00	1,00

Çizelge EK A.2. Strateji alt kriterinin geometrik ortalaması

Strateji	Yol Haritası	İş Modeli	Finansal Kaynak
Yol Haritası	1,00		
İş Modeli	3	1,00	2
Finansal Kaynak	2		1,00

Çizelge EK A.3. İnovasyon alt kriterinin geometrik ortalaması

İnovasyon	Yeni Fikirlere Açık Olmak	Yeni Fikirlerin Yönetim Tarafından Kabulü	Yeni Fikirlerin Uygulanması
Yeni Fikirlere Açık Olmak	1,00		
Yeni Fikirlerin Yönetim Tarafından Kabulü	5	1,00	2
Yeni Fikirlerin Uygulanması	3		1,00

Çizelge EK A.4. Organizasyon alt kriterinin geometrik ortalaması

Organizasyon	Üst Yönetimin Kararlılığı	Çalışma Grubunun Oluşturulması	Organizasyon Planlaması
Üst Yönetimin Kararlılığı	1,00	5	3
Çalışma Grubunun Oluşturulması		1,00	3
Organizasyon Planlaması			1,00

Çizelge EK A.5. Teknoloji alt kriterinin geometrik ortalaması

Teknoloji	Mevcut End. Otomasyon Seviyesi	Yeni Teknolojiye Yatırım Kararlılığı	Teknoloji Yatırım Bütçesi
Mevcut End. Otomasyon Seviyesi	1,00	5	3
Yeni Teknolojiye Yatırım Kararlılığı		1,00	
Teknoloji Yatırım Bütçesi		2	1,00

Çizelge EK A.6. Operasyon alt kriterinin geometrik ortalaması

Operasyon	Bölümler Arası İş birliği	Operasyon Süreçlerinin Takibi	Operasyon Süreçlerinin Analizi
Bölümler Arası İş birliği	1,00		
Operasyon Süreçlerinin Takibi	7	1,00	1
Operasyon Süreçlerinin Analizi	3		1,00

Çizelge EK A.7. Personel alt kriterinin geometrik ortalaması

Personel	Çalışanların Nitelikleri	Çalışanların Yeterlilikleri	Çalışanların Motivasyonu
Çalışanların Nitelikleri	1,00		1
Çalışanların Yeterlilikleri	5	1,00	2
Çalışanların Motivasyonu			1,00

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Adem KAYAR
Doğum Yeri ve Yılı : Üsküdar, 27/02/1972
Medeni Hali : Evli
Yabancı Dili : İngilizce, Almanca
E-posta : adem.kayar@mfd.com.tr



Eğitim Durumu

Lise : Haydarpaşa Anadolu Teknik Lisesi
Lisans : Anadolu Üniversitesi, İşletme Fakültesi,
İşletme Bölümü
Yüksek Lisans : İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Mesleki Deneyim

Siemens San. ve Tic. A.Ş. 1994-2000
(Endüstriyel Hizmetler Bölge Satış Yöneticisi)
MCS Otomasyon San. Tic. Ltd. Şti. 2005- (devam ediyor)
(Genel Müdür-Kurucu Ortak)
MCS Factory Digitalization End. Bil.Tek. Ltd. Şti. 2016- (devam ediyor)
(Genel Müdür- Kurucu Ortak)

Yayınları

Kayar A., Ayvaz B. ve Öztürk F., Akıllı Fabrika, Akıllı Üretim: Endüstri 4.0'a Genel Bakış
1. Uluslararası Bilim, Mühendislik ve Teknoloji Kongresi (EurasianSciEnTech 2018),
Kasım 22-23, Kongre Bildiriler Kitabı, s. 1661-1668. Ankara, 2018.