



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ÜRETİMDE DİJİTAL DÖNÜŞÜM ETKİNLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ
İÇİN BİR PERFORMANS ÖLÇÜM SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

Gökçen SARAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Gökçen Saray tarafından hazırlanan “Üretimde Dijital Dönüşüm Etkinliğinin Değerlendirilmesi için Bir Performans Ölçüm Sistemi Geliştirilmesi” adlı tez çalışması 24/06/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Turan PAKSOY

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Bilal ERVURAL

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Esra BOZ

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Şerife Yurdağül KUMCU
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Gökçen SARAY

Tarih: 11/07/2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÜRETİMDE DİJİTAL DÖNÜŞÜM ETKİNLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ İÇİN BİR PERFORMANS ÖLÇÜM SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

Gökçen SARAY

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Bilal ERVURAL

2024, 91 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Bilal ERVURAL
Prof. Dr. Turan PAKSOY
Dr. Öğr. Üyesi Esra BOZ

Dijital Dönüşüm (DD), yeni iş modelleri ve stratejileri geliştirmek için dijital teknolojileri kullanma yolculuğudur. İşletmelerin, rekabet üstünlüğünü ve kurumsal verimliliği elde edebilmeleri için dijitalleşme süreçlerine uyum sağlamaları büyük önem arz etmektedir. Bu değişimler ve dönüşümler karşısında işletmelerin dijital dönüşüm yol haritalarını çizebilmeleri için öncelikle dijital dönüşüm etkinliklerini ölçmeleri gerekmektedir. Bu çalışma üretimde faaliyet gösteren işletmelerin, dijital dönüşüm etkinliklerini belirleyebilmeleri için bir performans ölçüm sistemi geliştirmeyi amaçlanmıştır. Bu kapsamda dijital dönüşüm ve Endüstri 4.0'ın uygulanabilmesi için gerekli olan kriterler (faktörler); nesneler, insanlar ve sistemler arasındaki bağlantıları içerecek şekilde belirlenmiştir. Bu kriterler yalnızca otomasyon, robotik, nesnelerin interneti, yapay zekâ, akıllı sistemler veya büyük veri analitiği gibi ileri teknolojilerden yararlanılarak değil, aynı zamanda kültür veya değişim isteği dahil olmak üzere insan faktörlerinden de yararlanılarak ortaya konmuştur. Tüm kriterler kapsamlı bir literatür taraması sonrasında belirlenmiş ve açıklanmıştır. Sonrasında, uzman görüşleri alınarak faktörlerin önem derecesini ifade eden ağırlıklar hesaplanmıştır. Kriterlerin ağırlıklandırılması için BWM ve SWARA yöntemlerinden yararlanılmıştır. Dijital dönüşüm performansının ölçümü için ise Gri İlişkisel Analiz (GİA) yöntemi kullanılmıştır. Geliştirilen model, bir yedek parça firmasından alınan verilerle test edilmiştir. Ayrıca çalışmada, farklı yöntemler kullanılarak performans skorları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: BWM, Dijital Dönüşüm, Dijital Dönüşüm Etkinliği, Endüstri 4.0, GİA Performans Ölçüm Sistemi, SWARA

ABSTRACT

MS THESIS

DEVELOPING A PERFORMANCE MEASUREMENT SYSTEM FOR EVALUATION OF DIGITAL TRANSFORMATION EFFICIENCY IN MANUFACTURING

Gökçen SARAY

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN INDUSTRIAL ENGINEERING**

Advisor: Asst. Prof. Dr. Bilal ERVURAL

2024, 91 Pages

Jury

Asst. Prof. Dr. Bilal ERVURAL

Prof. Dr. Turan PAKSOY

Asst. Prof. Dr. Esra BOZ

Digital Transformation (DT) is the journey of leveraging digital technologies to develop new business models and strategies. It is crucial for businesses to adapt to digitalization processes to achieve competitive advantage and corporate efficiency. In the face of these changes and transformations, businesses must first measure their digital transformation activities to chart their roadmaps. This study aims to develop a performance measurement system for manufacturing companies to identify their digital transformation activities. In this context, the criteria (factors) necessary for implementing digital transformation and Industry 4.0 have been determined to include connections among objects, people, and systems. These criteria have been identified not only through the utilization of advanced technologies such as automation, robotics, the Internet of Things, artificial intelligence, smart systems, or big data analytics but also by incorporating human factors, including culture or willingness to change. All criteria were determined and explained following a comprehensive literature review. Subsequently, weights expressing the importance of the factors were calculated by obtaining expert opinions. The BWM and SWARA methods were used to weight the criteria. The Grey Relational Analysis (GRA) method was utilized to measure digital transformation performance. The developed model was tested with data obtained from a spare parts company. Additionally, in the study, performance scores were compared using different methods.

Keywords: BWM, Digital Transformation, Digital Transformation Efficiency, Industry 4.0, GRA, Performance Measurement System, SWARA

ÖNSÖZ

Günümüzde işletmelerin rekabet avantajı elde edebilmeleri, üretimde hız ve verimlilik sağlayabilmeleri için dijital dönüşüm süreçlerini etkin bir şekilde yürütmeleri gerekmektedir. İşletmeler dijital dönüşüm uygulamalarında hangi noktada olduklarını görebilmeleri için performans ölçüm sistemlerini uygulamaları gerekmektedir. Bu çalışmada üretim işletmelerinin dijital dönüşüm etkinliğinin değerlendirilmesi için çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak bir performans ölçüm sistemi geliştirilmiştir. Bu sistemi geliştirmek için çok kriterli karar verme yöntemlerinden BWM (en iyi-en kötü yöntemi) ve SWARA yöntemleri, GİA (Gri İlişkisel Analiz) yöntemine entegre edilerek kullanılmıştır.

Yüksek lisans eğitimim süresince bilgisini, deneyimini, desteklerini esirgemeyen ve her koşulda sabırla yardımcı olan değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Bilal ERVURAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte motivasyonumu korumamı sağlayan, deneyimlerini aktaran ve çalışmamda verileri elde etmemde yardımcı olan canım arkadaşım Ayşenur Göldoğan'a teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen başta canım annem olmak üzere aileme sonsuz minnetlerimi sunarım.

Gökçen SARAY
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. DİJİTAL DÖNÜŞÜM VE ENDÜSTRİ 4.0 KAVRAMI	3
2.1 Dijital Teknolojilerin İşletmeler Açısından Rolü ve Önemi.....	4
2.2 Dijital Dönüşüm Olgunluğu.....	5
2.3 Endüstri 4.0 Kavramı	6
2.3.1 Endüstri 4.0'ın Tarihsel Gelişimi.....	8
2.3.2 Endüstri 4.0'ın Önemli Bileşenleri	11
2.3.3 Endüstri 4.0'ın Faydaları ve Sağladığı Avantajlar.....	14
3. KAYNAK ARAŞTIRMASI	17
4. PERFORMANS DEĞERLENDİRME YÖNTEMLERİ	22
4.1 Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ile Performans Değerlendirme	23
5. ÖNERİLEN PERFORMANS ÖLÇÜM YÖNTEMİ	25
5.1 SWARA (Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis) Yöntemi	26
5.2 En İyi En Kötü Yöntemi (BWM)	27
5.3. Gri İlişkisel Analiz Yöntemi.....	30
6. DİJİTAL DÖNÜŞÜM ETKİNLİK DEĞERLENDİRME KRİTERLERİ	32
6.1 Teknolojik Yetenekler	32
6.1.1 Akıllı Üretim Teknolojileri	32
6.1.2 Veri ve Yazılım Altyapısı	40
6.2 İnsan Faktörü ve Organizasyonel Faktörler	45
6.2.1 İşgücü Gelişimi ve Stratejik Bağlılık.....	45
6.3 Operasyonel Verimlilik ve Entegrasyon.....	49
6.3.1 Üretim Süreci Otomasyonu	49
6.3.2 Kesintisiz Mühendislik ve Optimizasyon Uygulamaları	54
6.3.3 Entegrasyon ve Bağlantı	56
7. KRİTER ÖNEM SEVİYELERİNİN ELDE EDİLMESİ	59
7.1 SWARA Yöntemi ile Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi	59

7.2 BWM Yöntemi ile Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi	64
7.3 Nihai Ağırlıkların Elde Edilmesi ve Kriterlerin Sıralanması.....	71
8. ÖRNEK UYGULAMA.....	76
8.1 Örnek Bir Firmanın Dijital Dönüşüm Performansının Belirlenmesi.....	76
8.2 Farklı Yöntemlerle Elde Edilen Performans Skorlarının Karşılaştırılması	78
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	79
KAYNAKLAR	81



SİMGELER VE KISALTMALAR

Kısaltmalar

AG	: Artırılmış Gerçeklik
API	: Uygulama Programlama Arayüzleri (Application Programming Interface)
AR	: Artırılmış Gerçeklik (Augmented Reality)
BWM	: En İyi En Kötü Yöntem (Best-Worst Method)
ÇKKV	: Çok Kriterli Karar Verme
DD	: Dijital Dönüşüm
EDI	: Elektronik Veri Alışverişi (Electronic Data Interchange)
ERP	: Kurumsal Kaynak Planlama (Enterprise Resource Planning)
GİA	: Gri İlişkisel Analiz
HRI	: İnsan Robot Etkileşimi (Human-Robot Interaction)
IIoT	: Endüstriyel Nesnelerin İnterneti (Industrial Internet of Things)
IoT	: Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)
MES	: Üretim Yürütme Sistemleri (Manufacturing Execution System)
PLC	: Programlanabilir Mantıksal Denetleyici (Programmable Logic Controller)
RFID	: Radyo Frekansı Belirleme Sistemi (Radio Frequency Identification)
RTLS	: Gerçek Zamanlı Takip Sistemleri (Real Time Location System)
SAW	: Basit Puanlama Yöntemi (Simple Additive Weighting)
SFS	: Siber- Fiziksel Sistemler
SOA	: Servis Odaklı Mimari (Service-Oriented Architecture)
SWARA	: Adım Adım Ağırlık Değerlendirme Oran Analizi (Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis)
TO	: Tutarlılık Oranı
TOPSIS	: İdeal Çözüme Benzerlik Bakımından Sıralama Performansı Tekniği (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)

1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmelere paralel olarak ortaya çıkan dijital dönüşüm kavramı, günümüzün en önemli konularından biri haline gelmiştir. Teknoloji alanında yaşanan hızlı değişimle birlikte, üretim süreçleri giderek daha akıllı, bağımsız ve otomatik hale gelerek dijitalleştirilmiş bir sisteme dönüşmektedir. Dijital teknolojilerin ürün ve hizmetlerde kullanımı, klasik iş süreçlerini kökten değiştirerek esneklik, verimlilik ve otomasyon alanlarında büyük gelişmeler sağlamaktadır. Bu ilerlemeler, gereksiz üretim maliyetlerini ortadan kaldırma, üretim süreçlerini iyileştirme ve genel iş performansını artırma gibi önemli faydalar sunmaktadır.

Üretimde yaşanan dijitalleşme süreçleri, Endüstri 4.0 olarak bilinen Dördüncü Sanayi Devrimi kapsamında değerlendirilmektedir. Endüstri 4.0, kuruluşların tüm üretim süreçlerini dijitalleştirmeye yönelik kapsamlı bir dönüşümü temsil etmektedir. Bu dönüşüm, hızlı, kesintisiz, yenilikçi ve otomatik ağlar oluşturmak için makineleri, insanları, altyapıyı ve blokzincir gibi yeni teknolojileri içermektedir. Endüstri 4.0, bulut bilişim, nesnelerin interneti, siber fiziksel sistemler, büyük veri, katmanlı üretim, yapay zeka ve otonom robotlar gibi teknolojik kavramlara dayanmaktadır.

Üretim alanında faaliyet gösteren her bir işletme, dijital dönüşümü uygulama konusunda farklı bir aşamadır. Bu durum, işletmelerin dijital dönüşümü uygulayabilme kapasitelerini belirlemek için farklı stratejiler geliştirmelerini gerektirmektedir. Bu amaçla literatürde ve uygulamada çeşitli dijital dönüşüm performans ölçüm yöntemleri geliştirilmiştir. Bu çalışmada ise dijital dönüşüm etkinliğinin değerlendirilmesi için özgün bir model önerilmiştir. Bu sayede işletmelerin eksikliklerini fark etmelerine ve dijitalleşme sürecinde hangi adımda olduklarını belirleyebilmelerine yardımcı olunması hedeflenmektedir.

Bu tez kapsamında, dijital dönüşüm etkinlik değerlendirmesi yapabilmek için literatür detaylı olarak incelenmiştir. Değerlendirmede kullanılmak üzere altı ana kriter altında yirmi altı alt kriter belirlenmiştir. Bu kriterler, dijital dönüşüm alanında uzman olan akademisyenler ve sektördeki uzmanlar tarafından değerlendirilmiştir. Kriter ağırlıklandırması için çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan en-iyi en-kötü yöntemi (Best worst method – BWM) ve SWARA yöntemleri kullanılmıştır. BWM ve SWARA yöntemleri ile elde edilen ağırlıkların ortalaması alınarak nihai ağırlıklar elde edilmiştir. Ardından dijital dönüşüm etkinliğinin elde edilmesi için Gri İlişkisel Analiz (GİA) yöntemi uygulanmıştır. Ayrıca, farklı ÇKKV yöntemleri kullanılarak elde edilen

sonuçlar GİA yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Belirlenen kriterlerin ve bu yöntemlerin bir arada kullanılmasıyla geliştirilen bir performans ölçüm sistemine literatürde rastlanmamıştır. Bu tez çalışmasında geliştirilen özgün model ile literatüre katkı sağlanacaktır.

Tez, dokuz bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde çalışmanın giriş bölümü yer almaktadır. İkinci bölümde dijital dönüşüm ve Endüstri 4.0 kavramları, Endüstri 4.0'ın tarihçesi, bileşenleri ve avantajları gibi alt başlıklar ele alınmaktadır. Üçüncü bölümde ÇKKV yöntemleriyle dijital dönüşüm etkinlik değerdendirmesi konusunda yapılmış çalışmalar incelenmiştir. Dördüncü bölümde performans ölçüm yöntemleri anlatılmaktadır. Beşinci bölümde bu çalışma için önerilen performans ölçüm yöntemi aşamaları ve kullanılacak olan ÇKKV yöntemlerinin adımları anlatılmıştır. Altıncı bölümde değerdendirmede kullanılacak kriterler ve bu kriterlerin detaylı açıklamaları yer almaktadır. Yedinci bölümde kriterlerin önem seviyelerinin analiz edilmesi için BWM ve SWARA yöntemleri kullanılmıştır. Sekizinci bölümde bir yedek parça işletmesinden alınan verilerle örnek uygulama yapılmış ve GİA yöntemi kullanılarak bu işletmenin performansı hesaplanmıştır. Dokuzuncu bölümde ise çalışmanın sonuçları ve öneriler sunulmaktadır.

2. DİJİTAL DÖNÜŞÜM VE ENDÜSTRİ 4.0 KAVRAMI

Dijital teknolojiler aracılığıyla kayıtlar ve veriler dijital ortamda işlenebilir hale getirilmiş ve süreçler dijital ortama taşınmıştır. Bu gelişme sonucunda tüm kurumsal yapılar ve paydaş ilişkileri, dijital platformlara aktarılmıştır. Dijitalleşme yolculuğu tek boyutta ilerlememektedir ve organizasyonlar yeni buluşlar sayesinde otomasyonlarını daha verimli yürütebilmekte ve hizmetlerinde dijital teknoloji kullanımını ileriye taşıyabilmektedir (Dökme, 2020).

Dijital dönüşüm (DD), dijitalleşme ve sayısallaştırma kavramlarından oluşmaktadır. Sayısallaştırma analog bilgilerin bilgisayarlarda depolanarak işlenebilir ve iletilabilir olması için kodlanması işlemidir. Dijitalleşme ise gerek toplumsal alan içerisinde gerekse işletmelerde ve kurumlarda, bilgi, iletişim ve diğer teknolojik altyapıların yeniden şekillendirilmesidir. Bu bilgilerden yola çıkılarak dijital dönüşüm, verilerin dijital ortamda ve yeni teknolojilerin yoğun kullanımı ile iş yapış şekillerinin ve iş süreçlerinin bu yeni teknolojiler ışığında dönüştürülmesidir. DD aynı zamanda, dijital teknolojilerin işletme performansının iyileştirilmesidir ve bu iyi hale getirme sürecinde organizasyon yapısını, iş süreçlerini ve modellerini bu dönüşüme uygun hale getirmektedir (Kaya,2022).

Dijital dönüşüm; hızla gelişmekte olan bilgi ve iletişim teknolojilerinin sunduğu imkânlar ve değişen toplumsal ihtiyaçlar doğrultusunda, organizasyonların daha verimli hizmet sunmak ve memnuniyet seviyesini yükseltmek amacıyla insan, iş süreçleri ve teknoloji faktörlerinin bütüncül dönüşümüdür. Bir başka ifadeyle; bilgi teknolojilerinin etkin kullanılması ile iş süreçlerinin ve verilerin, paradan ve zamandan tasarruf edilmesini sağlayarak dijital (elektronik) ortama aktarılması olarak açıklanabilir. Dijital dönüşümün bazı özellikleri vardır ve bunlar şu şekilde sıralanabilir:

- Hazır paket çözümü yoktur.
- Teknoloji hızlı bir değişim gösterirken bazı alışkanlıkları değiştirmek kolay değildir.
- Dijital dönüşüm birçok farklı unsuru (iş süreçleri, teknoloji, vb.) beraber dönüştürmeyi ve yönetmeyi gerektirmektedir.
- Dijital dönüşüm süreklidir.
- Dijital Dönüşümün sürekli olabilmesi için dönüşüm sürecinin sistematik ve bütüncül olarak ele alınması ve şirketlerde her seviyedeki kadar bütün çalışanlar ve yönetim tarafından benimsenmesi gerekmektedir (Ayyıldız ve Demir, 2022).

Dijital dönüşümün 3 ana hedefi vardır. Bunlar aşağıdaki gibi açıklanmaktadır:

1. *Karlılığı geliştirme:* Çok sayıda ve farklı ürününün hızlı bir şekilde üretilerek kar oranının artmasıdır. Ürünlerin üretim sürecinin hızlı yürütülmesi giderlerde düşüşü sağlar ve taleplere daha kolay yanıt verilir, bu sayede gelir ve karlılıkta artış sağlanır.
2. *Rekabet avantajı sağlama:* Kısa süre içerisinde çeşitli ve yüksek standartlı ürün üretilmesi sayesinde piyasa içerisinde, rekabet edebilirlik açısından avantaj sağlanacaktır. Özellikle kişisel istekler özelinde ürünlerin üretilmesi ve müşterilere ürünlerin çabuk tesliminin sağlanması açısından bu teknolojiyi kullanan işletmelere avantaj sunacaktır. Bu dönüşüme uyum sağlayamayan işletmeler ise büyük riskler ve zorluklarla karşı karşıya kalacaktır.
3. *Yeni gelir yaratma:* İleri teknolojilerin kullanımıyla birlikte yeni alanların ve ürünlerin geliştirilmesi ile kazançlarda artış görülecektir. 3D teknolojisini kullanan yazıcılar ve dijital ikiz gibi yeni uygulamalarla birlikte farklı ürünlerin geliştirilmesi oldukça kolaylaşmıştır. Hızlı bir şekilde piyasaya sürülebilen farklı ürünler, yeni kazanç olanaklarının elde edilmesini sağlayacaktır.

2.1 Dijital Teknolojilerin İşletmeler Açısından Rolü ve Önemi

Dijital teknolojiler, işletmelerde operasyonlarının kolaylaşmasına, görevlerin otomatikleşmesine ve hataların azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Bu durum, işletmelerde maliyetlerin düşürülmesini sağlayarak üretkenliği artırmaktadır. Dijital teknolojiler, işletmelerin operasyonlarını optimize etmelerine ve daha analitik kararlar vermelerini sağlayarak veri yönetimini kolaylaştırmak için de kullanılmaktadır. Dijital teknolojiler işletmeler için büyük önem arz etmektedir. Bu durumun bazı nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

Artan rekabet gücü: Bulunduğumuz dijital çağ içerisinde, dijital teknoloji kullanımında başarı sağlayamayan işletmeler rekabet konusunda geride kalma riski taşımaktadır. İşletmeler, dijital sistemleri kullanarak kendilerini güncelleyebilmeli ve rekabette üstünlük sağlamalıdır.

Müşteri memnuniyeti geliştirme: Dijital teknolojiler vasıtasıyla işletmeler, müşterilerin gereksinimlerini daha iyi analiz ederek ve taleplere daha hızlı cevap vererek, müşteri ve memnuniyetini iyileştirebilir.

Inovasyon Geliştirme: Dijital teknolojiler, işletmelerde yeni ürün, hizmetler ve yeni iş modelleri geliştirilmesine, yeni pazarlara girilmesine olanak tanıyarak yeniliği yönetmek için kullanılabilir.

İş süreçlerini optimize etme: Dijital teknolojiler, işletmelerde iş süreçlerinde ve operasyonlarda optimizasyon sağlar. Bu durum da daha verimli çalışmayı, maliyetlerin düşürülmesini ve karlılıkta artışı mümkün kılmaktadır (Rogers, 2016).

Veri temelli karar verme: Dijital teknolojilerin kullanımıyla, işletmelerde büyük miktarda veri toplanır, depolanır ve analiz edebilir. Bu teknolojiler de, daha iyi ve güvenli kararlar alarak, işletmelerin performansını artırır ve süreklilik gösteren büyümeye öncülük eder.

Küresel erişim ve pazarlama etkinliği: Dijital teknolojiler, işletmelere küresel çaptaki müşterilere ve pazarlara ulaşabilme ve katılabilme imkânı sunar. Dijital pazarlama sistemleri ve tekniklerinin kullanılmasıyla, ürün ve hizmetler daha iyi tanıtılır ve satışların artmasıyla ekonomik büyüme sağlanır (Ryan, 2016).

Sürdürülebilirlik ve çevresel etki: Dijital teknolojiler, işletmelerin enerji ve kaynak tüketimini düşürerek çevresel etkiyi en aza indirmelerine yardımcı olur. Ayrıca, dijital teknolojilerin kullanımı, işletmelerde daha az atık ve daha sürdürülebilir çevreye saygılı yöntemlerle çalışılmasına zemin hazırlar.

Çeviklik ve esneklik: Dijital teknolojiler, işletmelerin daha çevik ve esnek olmalarını sağlar. Bu durum şirketlerin değişen pazar koşullarına ve müşteri gereksinimlerine daha çabuk yanıt vermelerine yardımcı olur (Berman ve Marshall, 2019). Bu sayede işletmelerin çağın gerektirdiği yeniliklere ayak uydurmasına ve yeni fırsatları değerlendirebilmesini sağlar.

Sonuç olarak bakıldığında dijital teknolojiler, iş süreçlerinin olmazsa olmaz bir parçasıdır. İşletmeler, dijital araçlar ve platformlar sayesinde iş süreçlerini dönüştürebilir, müşteri memnuniyetini artırabilir ve rekabette üstünlük kazanılabilir. Ayrıca DD; planlama, uygulama ve yönetimi aynı anda kullanan karmaşık ve çok boyutlu bir süreçtir. İyi bir planlama ve yönetim ile işletmeler, büyümeyi, inovasyonu ve başarıyı yakalayabilir (Aksoy, 2024).

2.2 Dijital Dönüşüm Olgunluğu

Dijital olgunluk kavramı ile ilgili birçok farklı tanım mevcuttur. Bir tanıma göre; dijital olgunluk, organizasyonun operasyon ve işgücünü dijital süreçlerle birleştirmektir.

Ayrıca dijital olgunluk organizasyonların dijital dönüşüme adapte olmaya sistematik olarak hazır olup olmama durumunu ifade etmektedir (Kane, 2017). Dijital dönüşümle yakından ilgili olan dijital olgunluk kavramı, işletmelerin ulaşmaya çalıştığı, iş süreçlerinde gelişme ve müşteri memnuniyetinde artış sağlanan dijital dönüşümün son aşamasını ifade etmektedir.

Bu tanımlara dayanarak birleştirilmiş bir tanım olarak Dijital olgunluk; şirketlerin dijital ortamlardaki değişimlere karşı gösterdiği uyum yeteneği ve dijital kazanımların iş yaşamına uygulanma miktarının yanında çalışanların dijital olarak gelişmelerinin gerçekleştirilmesi şeklinde ifade edilmektedir (Ayyıldız, 2023).

Dijital Dönüşüm ve Endüstri 4.0 açısından işletmelerin seviyesi değerlendirilirken, dijital olgunluk, dijital dönüşüm seviyesi, dijital dönüşüm etkinliği, endüstri 4.0 uygulama seviyesi, dijital dönüşüm yeteneği gibi kavramlar temel olarak aynı anlamda kullanılmaktadır. Birçok kurum ve kuruluşun geliştirdiği dijital olgunluk ölçüm modelleri bulunmaktadır. Sanayi işletmelerinde kullanılan modellerden en bilinenleri, İZKA dijital olgunluk modeli ve İMPULS Endüstri 4.0 hazırlık modelidir. İZKA (İzmir kalkınma Ajansı) tarafından, firmaların dijitalleşme süreçlerine ışık tutmak amacıyla geliştirilen dijital olgunluk modeli ve düzey belirleme modelinde; yönetim, kültür, strateji, teknoloji ve süreçler faktörlerine yönelik oluşturulan sorulara işletmelerin vermiş olduğu yanıtlar sınıflandırılmaktadır. Sonuçta ise şirket Dijitalde Yeni, Dijital Usta, Gelenekçi ve Dijital Trend Takipçisi gibi sınıflarından birine koyulmaktadır. İMPULS Alman Mühendislik Vakfı tarafından ileri sürülen Endüstri 4.0 Olgunluk model, işletmelerin kendi kendilerine uygulayarak seviyelerini belirleyebilmeleri amacıyla geliştirilmiş, 6 temel alanda değerlendirme yapan, ankete dayalı bir ölçektir. Bu boyutlar: strateji ve organizasyon, akıllı üretim ve fabrika, akıllı operasyon akıllı ürünler, veri temelli hizmetler, çalışanlar olarak ele alınmıştır.

2.3 Endüstri 4.0 Kavramı

Endüstri 4.0 kavramının ileri sürülmesi Alman hükümeti tarafından yürütülen ileri teknoloji temalı bir proje ile olmuştur. Bu kavram ilk kez 2011 yılında Hannover Fuarı'nda ortaya koyulmuştur (Banger, 2016). Endüstri 4.0, değer zinciri boyunca birbirleriyle bağımsız bir şekilde iletişim kurabilen teknoloji ve cihazlar aracılığıyla üretim süreçlerinin organize edilmesi anlamına gelmektedir. Bu organizasyon, geleceğin akıllı fabrikası şeklinde ifade edilen, bilgisayar aracılığıyla yönetilen ve

yönlendirilen sistemlerin fiziksel süreçleri izlediği, otonom kararlar alabilen bir yapıyı anlatmaktadır (Soylu, 2018). Kavram aynı zamanda değişim mühendisliğini, ürünlerin ve hizmetlerin dijital araçlarla sağlanmasını, iyi senkronize edilmiş ürün-hizmet yapılarını içermektedir.

Endüstri 4.0, planlama, mühendislik, üretim gibi süreçlerde ürün kalitesindeki yükselme ile daha fazla esneklik ve sağlamlık sunacak; aynı zamanda da maliyet ve kaynak israfı gibi birçok ölçütte optimizasyon sağlayabilecek dinamik, gerçek zamanlı olarak, kendi kendini yönetip düzenleyebilen değer zincirlerinin oluşmasını belirtmektedir (Acatech, 2013). 4. Sanayi Devrimi olarak da ifade edilebilen Endüstri 4.0 kavramı; hız, verimlilik, düşük maliyet ve inovasyon odaklı üretim ve pazarlama anlayışını, ileri seviye teknoloji yardımıyla gelinen yeni bir noktayı ifade etmektedir. Endüstri 4.0 ile üretim süreçlerindeki tüm birimlerin ve tüm yapıların birbirleriyle iletişim kurabilmesi, gerçek zamanlı ve anlık olarak verilere ulaşabilmesi böylece de beklentileri karşılayacak en yüksek çıktılara ulaşılabilmesi amaçlanmaktadır. Endüstri 4.0 kavramını yaratan dinamikler göz önüne alındığında dijital yaşamda ortaya çıkan büyük gelişmeler ve bunların sonucu ortaya çıkan siber-fiziksel sistemler, nesnelerin interneti adı verilen ve birbirleriyle özerk olarak iletişime geçebilen çok sayıda cihaz, büyük veri analizi gibi faktörler dikkat çekmektedir.

Endüstri 4.0 geçmişteki diğer sanayi devrimlerine olduğu gibi üretimi esas olarak ortaya çıkmış olsa da sadece bu alanı etkilemeyeceği öngörülmektedir. Dijitalleşme ve bu kapsamdaki dijital sistemler, üretim aşamasından pazarlama süreçlerine kadar işletmenin tüm fonksiyonlarını etkilemektedir. Ayrıca bu sürecin sadece işletmelerde değil, çok daha geniş bir alanda etki etmesi beklenmektedir. Ekonomik büyüme, istihdam, eğitim, yatırım, girişimcilik gibi makro seviye konular bu duruma örnek gösterilebilir. Endüstri 4.0 kavramının etkileyeceği bir diğer alan ise yeni iş anlayışlarının ortaya çıkması ve buna uygun yeni oluşumların ortaya çıkması olacaktır. Mevcut iş yapma yöntemlerinin yanında, farklı uygulamaların ortaya koyulması, iş dünyasında yeni istihdam alanları ve meslekler oluşmasına öncülük edecektir (Soylu, 2018).

Endüstri 4.0, içinde bulunduğumuz akıllı çağda üretim yöntemlerini, tedarik zinciri ve dağıtım sistemlerini, verimliliği, rekabet stratejilerini yaşam biçimlerini değiştirecektir. Bu nedenle de değişimi ve dönüşümü doğru yönetebilmek oldukça önemlidir. Endüstri 4.0 ile kurulacak akıllı üretim sistemleri, akıllı şehir, lojistik gibi unsurlar ile veriler, nesneler ve kişilerin internet vasıtasıyla yaratacağı ekosistemde

bulunan sistemin önümüzdeki 25 yılda uluslararası ticaret hacmini yaklaşık olarak %40 oranında etkilemesi düşünülmektedir (Metesen, 2021).

Endüstri 4.0' dan öncesi ve günümüze kadar geliştirilen teknolojiler yaşamımızın çeşitli alanında bulunmaktadır.

Robotlar özellikle otomotiv sektöründe uzun süredir kullanılmaktadır. Endüstri 4,0, robotların her alanda kullanılmasıyla elde edilecek faydayı, mevcut teknolojiler ile yeni teknolojileri birleştirerek daha iyi seviyelere getirmeyi hedeflemektedir. Endüstri 4.0 süreçleri, işletmelerde beyin gücünün kullanımı, hatasız üretim, düşük maliyet, işgücü tasarrufu, verimlilik, sürdürülebilirlik, müşteri memnuniyeti gibi faydalar sağlaması beklenmektedir (Tonga ve Tonga, 2022).

Endüstri 4.0'ın literatürde yer alan 6 önemli ilkesi aşağıda açıklanmıştır (Çark, 2020).

- *Karşılıklı çalışabilirlik*: Nesnelerin interneti ve hizmetlerin interneti gibi ileri teknolojiler aracılığıyla akıllı fabrikalar ile insanların birbiriyle bağlantı kurarak irtibat halinde olmasıdır.
- *Sanallaştırma*: Sensörler yardımıyla elde edilen verilerin, sanal gerçeklik modelleri ve sanal tesisler ile birbirine bağlanması ile oluşturulan sistemler, akıllı fabrikaların sanal kopyası özelliğini taşır.
- *Otonom (özerk) yönetim*: Akıllı fabrikaların en önemli unsuru olan robotik sistemlerin özerk olarak kendi kendilerini yönetme ve karar alabilmesidir.
- *Gerçek-Zamanlı veri yeteneği*: Eş zamanlı olarak verilere hızlı bir şekilde ulaşabilmesi, bu verilerin anlık olarak elde edilmesi ve analiz edilmesidir.
- *Hizmet oryantasyonu*: Robotik sistemlerin, bireylerin ve akıllı fabrika unsurlarının hizmetlerin interneti aracılığıyla sağlanmasıdır.
- *Modülerlik*: Değişen ihtiyaçlar göz önüne alınarak, kişiselleştirilmiş modüller sayesinde akıllı fabrikalara, esnek ve uyarlanabilir sistemler sunulmasıdır.

2.3.1 Endüstri 4.0'ın Tarihsel Gelişimi

Tarihte yaşanan sanayi devrimleri üretim süreçlerinin değiştirmiş ve sanayinin ötesinde yaşam biçimini de etkilemiştir. Sanayide Dijital Dönüşüm olarak adlandırılan Endüstri 4.0 ilk olarak Almanya'da, 2011 yılında Hannover fuarında açıklanmıştır. Endüstri 4.0, sanayide evrimsel olarak dördüncü sanayi devrimi olarak ifade edilmektedir. Geçmişten günümüze kadar olan süreçte Sanayi Devrimi'nin geçirdiği dönüşüm Şekil 2.1'de gösterilmiştir (Tonga ve Tonga, 2022).

1.Sanayi Devrimi	2.Sanayi Devrimi	3.Sanayi Devrimi	4.Sanayi Devrimi
• 1760-1840 • Mekanizasyon, su gücü, buhar gücü	• 1840-1950 • Seri Üretim, montaj hattı, elektrik	• 1950-2011 • Bilgisayar ve otomasyon	• 2011-günümüz • Siber fiziksel Sistemler

Şekil 2.1. Endüstri 4.0'ın Tarihsel Gelişimi (Soyluk, 2022)

Birinci Sanayi Devrimi (Endüstri 1.0): J. Watt tarafından geliştirilen ve üretime kazandırılan buhar makinesinin kullanılmasıyla birlikte sanayinin ilk atılım dalgası olan Birinci Sanayi Devrimi başlamıştır. Birinci Sanayi Devrimi İngiltere’de ortaya çıkmıştır. Birinci Sanayi Devrimi döneminde buhar makinasının icadıyla üretim büyük oranda etkilenmiştir. Kas gücü kullanılarak üretim yapılan çok sayıda ürün bulunurken bu ürünler buhar gücünden yararlanılarak üretilmeye başlanmıştır. Birinci Sanayi Devrimi’ni başlatan önemli etkenler buhar gücü ile çalışan makinelerin keşfedilmesi ile tekstilde üretkenliğin sağlaması ve demirin üretilmesidir. İlk sanayi devrimi günlük yaşamı ve ekonomiyi tarım ve el sanatlarının yoğun olduğu ekonomiden endüstri ve makine imalatının yoğun olduğu ekonomiye dönüştürmüştür (Aksoy, 2024).

İkinci Sanayi Devrimi (Endüstri 2.0): İkinci Sanayi Devrimi, 19. yüzyılın ikinci yarısı ile 20. Yüzyılın ilk yarısı kapsayan teknoloji devrimidir. İkinci sanayi devrimi 1900 yılında içten yanmalı motorun icat edilmesiyle başlamıştır. Endüstri 2.0’da en önemli etken, demiryollarının gelişmesidir. Bu dönemde çelik ve kimyasal madde kullanımı artmıştır. Elektrik ve petrolün kullanılmasıyla beraber üretim hızlanmıştır. Bu dönemde, seri üretim için bantlar fabrikalarda kullanılmaya başlanmıştır. Bu duruma öncülük edenin Henry Ford olduğu kabul edilmektedir. Haberleşme ve iletişim araçlarında yaşanan gelişmeler, iletişimi daha etkin hale getirmiştir (Pamuk ve Soysal, 2018). Endüstri 2.0 döneminde yaşanan gelişmeler sosyal yaşamda da değişimler gerçekleştirmiştir.

Üçüncü Sanayi Devrimi (Endüstri 3.0): Üçüncü sanayi devrimi 1970’lerle başlayıp, üretim süreçlerini otomatik hale getirmek için elektronik ve bilgi teknolojilerinin uygulanması ile anılan dönemdir. 1990'larda iş süreçleri yeniden tasarlandı ve Bilgi Teknolojilerindeki (BT) yaşanan gelişmeler en üst seviyelere çıktı.

Masaüstü bilgisayarlar, veri tabanları ve bazı ofis görevlerini otomatik hale getiren yazılımlar geliştirildi. Bu sayede işletmelerde dijitalleşme adımları atılmıştır (Tonga ve Tonga, 2022).

Üçüncü Endüstri Devrimi ile üretim süreçleri mekanik teknolojilerden, bilgisayar ve internet altyapısının olduğu dijital teknolojilere doğru evrilmiştir. Bilgisayar, fiber optik, çip gibi mikro-elektronik teknolojileri gelişmeye başlamıştır. Gelişen otomasyon sistemleri ile iş süreçlerinde kaynaklar daha verimli kullanılmaya başlanmıştır. Hızlı seri üretim süreçleri daha önemli hale gelmiştir. Ağ teknolojilerinde görülen gelişmelerle dijitalleşme süreçleri etkin hale gelmiştir. Bu dönemde bilgi alışverişinin, verinin öneminin arttığı ağ teknolojilerinde gelişmeler ile rekabet yaşandığı görülmektedir. Elektronik ticaretin günümüzdeki seviyeye gelmesine neden olacak girişimlerin temelleri bu dönemde atılmaya başlanmıştır.

Üçüncü Endüstri Devrimi ile birinci ve ikinci endüstri devrimleri arasındaki en önemli fark ise kullanılan enerji kaynaklarıdır. Birinci Endüstri Devriminin enerji kaynağı olarak su ve buhar gücü, ikinci sanayi devriminde enerji kaynağı olarak petrol ve elektriktir. Üçüncü sanayi devriminin enerji kaynağı olarak ise ağırlıklı olarak yenilenebilir enerji kaynakları olan güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi gibi enerji kaynakları kullanılm girmeye başlanmıştır (Kumru, 2022).

Dördüncü Sanayi Devrimi (Endüstri 4.0): Endüstri 4.0, temel olarak Almanya’da genç nüfusun azalması ve iş gücünde görülen gerileme nedeniyle rekabet gücünü yeniden yükseltmek amacıyla başlanan bir çalışmadır. Akıllı fabrikalar ile enerji, hammadde ile işgücü tüketiminde azalma ve bunun sonucunda yüksek verim elde edileceği ifade edilmiştir. Bu kapsamda robot, makine, sensör (siber-fiziksel sistemler) gibi donanımlar ile yazılımlar temel oluşturmuştur. Yaşanan bu gelişmelerle beraber iş gücü daha az önemli hale gelmiş, yapay zekâ ve robotik teknolojiler, yazılımlar öne çıkmıştır (Kaygın ve ark., 2019).

Endüstri 4.0 ile, robotik ve otomasyon teknolojileri, yapay zekâ, akıllı üretim, 3D yazıcılar, bulut bilişim ve nesnelerin interneti gibi teknolojiler, sanayide yeni bir dönüşüme öncülük edecektir. Endüstri 4.0, üretimde maliyetlerin düşmesine, hızlanmaya, kişiye özel taleplere göre üretim yapılmasına imkân tanıyan dijital bir üretim sistemidir. Günümüzde Endüstri 4.0 ile dijital dönüşüm süreci halen devam etmektedir. Devletler dijital dönüşüm ile ilgili önemli adımlar atmakta, bu sebeple de endüstri 4.0 kavramı gelecekte de sosyal hayat, iş hayatı ve üretim alanlarında adından sıkça söz ettirecektir.

2.3.2 Endüstri 4.0'ın Önemli Bileşenleri

2.3.2.1 Akıllı Fabrikalar

Akıllı fabrika (Smart Factory), akıllı ve gelişmiş sensörler ile algılama, bilgi işlem ve tahmine dayalı analitik ve esnek kontrol sistemlerinden oluşan, en yeni nesnelerin interneti ve endüstriyel internet teknolojilerinden yararlanarak çok ölçekli üretimde yeni bir yaklaşımı tanımlamaktadır (Lee, 2015). Akıllı fabrikaların birçok bileşeni bulunmaktadır. Bu bileşenlerden ilki; sistemin kendi içindeki iletişim sistemidir. Akıllı fabrikada yer alan otonom robotlar, sensörlü makineler, ekipmanlar gibi her bir nesne kendi içinde ve birbiriyle iletişim kurmaktadır. Endüstri 4.0'ın gelişmesiyle beraber Nesnelerin İnterneti (IoT) kavramı ortaya çıkmıştır (Dökme, 2020).

Akıllı fabrikalar, yeni durumlara hızlıca uyum sağlayabilen ve hızlı öğrenme yeteneğine sahip sistemlerdir. Bu sistemin de kendi içerisinde oluşmuş kendine ait özellikleri bulunmaktadır. Bunlar bağlantı ilişkisi, optimize edilme, saydamlık, dinamik olma gibi özelliklerdir (Şekkeli ve Bakan, 2018). Akıllı fabrikalar içinde bazı birimler ve operasyonlar dijitalleşmiştir. Bunlar genel olarak, imalat ve depo operasyonları, stok takibi, kalite ve bakım yönetimi, iş sağlığı ve güvenliği gibi birimlerdir.

Akıllı fabrikaların klasik fabrikaların temel farkının insan gücünden daha az yararlanılması olduğu konusunda ortak görüşler bulunması ile birlikte, birçok farklılıklar da mevcuttur. Bu farkları karşılaştırmalı olarak şu şekilde gösterebiliriz (Şekkeli ve Bakan, 2018).

Çizelge 2.1. Akıllı Fabrikalar ile Klasik Fabrikaların Karşılaştırılması

	Klasik fabrika	Akıllı fabrika
Yöntem	İnsana dayalı üretim	İnternet ağı tabanlı üretim
Süreç	Bağımsız ve ayrık üretim	Entegre sistemler ile üretim
Stok	Stoklu üretim yapılı	Stoksuz üretim yapılı
Karar	İnsana dayalı karar mekanizması	Yapay zekâ ile karar verme sistemleri
Bilgi	Sınırlı bilgi ve veri	Bulut teknolojisi ile sınırsız bilgi ve veri

2.3.2.2 Yatay ve Dikey Entegrasyon

Entegrasyon sistemleri, şirketin iç ve dış ekosistemi olarak tanımlanmaktadır. Yatay Entegrasyon, üretim ve planlama faaliyetlerinin her bir aşamasının kendi arasında, ayrıca farklı işletmelerin üretim ve planlama süreçlerindeki aşamaları arasında kesintisiz bir akışın sağlanmasıdır. Bu entegrasyon; ham maddenin tedarik edilmesinden tasarıma, üretime, pazarlamaya ve sevkiyata kadar olan her adımı kapsamakta, entegre ve uçtan-uca sistemler kurmaktadır. Yatay entegrasyon kısaca diğer paydaşları kapsayan ekosistem olarak tanımlanmaktadır (Ayyıldız Uçak, 2021).

Dikey entegrasyon, şirket içindeki tüm süreçlerin birbiri ile olan bağlantısını temsil etmektedir ve fabrikanın planlama ve geliştirme faaliyetlerinin üretim aşamalarına entegrasyonunu sağlar. Dikey entegrasyon yalnızca süreçler arasında değil, tüm süreçlerde var olan teknolojik altyapıdaki kesintisiz bir iletişim ve akış sağlanması anlamına gelir. Örneğin üretim aşamalarındaki sensörler, motorlar, paneller, üretim yönetimi sistemleri, kurumsal kaynak planlaması (ERP) yazılımları, iş zekâsı uygulamaları sistem ve ekipmanların entegrasyonu bu kapsamdadır.

Dikey ve yatay entegrasyonun uygulandığı Endüstri 4.0 aracılığı ile üretim süreçlerindeki değişikliklere ve aksaklıklara hızla karşılık verilebilmesi, müşteriye özel üretimin kolaylaşması, kaynak verimliliğinin artırılması, tedarik zincirinin optimize edilmesi mümkün olmaktadır. Ek olarak işletmelerin daha esnek bir yapıya kavuşması sağlanmakta ve gerekli değişiklikler basit ara yüz güncellemeleriyle çözümlenebilmektedir (Soylu, 2018). Yatay ve dikey entegrasyon fabrika içinde ve paydaşlarla çalışmayı geliştirmekte ve kolaylaştırmaktadır.

2.3.2.3 Yapay Zeka Uygulamaları

Yapay zeka, çeşitli nitelikteki sorunların çözülmesine yardımcı olan, doğal zeka gibi makineler tarafından sergilenen insan benzeri bir zekayı ifade eder. Yapay zeka, tıpkı insan zekası gibi çeşitli görevleri yerine getirebilen bir teknoloji olup üretim alanları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yapay zeka teknolojisi üretim ve tedarik zincirinde sıklıkla kullanılmaktadır. Yapay zekanın üretim işletmelerinde kullanılması, şirketlerin prosedürlerini tamamen dönüştürmelerine olanak tanımaktadır. Yapay zeka ve robot teknolojisinin endüstriyel üretimde kullanımı, temel olarak seri üretimde devrim yaşandığı için gözlemlenebilmektedir. Robotlar tekrar eden görevleri yerine getirecek, ürün geliştirme modelini tasarlayacak, yetkinliği artıracak, insan hatasını

ortadan kaldıracak ve üstün kalite güvencesi sağlayacaktır (Ammar ve ark., 2021). Yapay zeka, şirketlere kendi bileşenlerinin sonuçlarını analiz etmeleri için gelişmiş bir analiz yeteneği sunar. Örneğin yapay zeka veri tabanı analizi, bir tesisin toplam performansını artırabilir ve ürün kalitesini iyileştirebilir. Robotların veya diğer ekipmanların anormallikleri algılayacak ve parametreleri takip edecek kadar akıllı olmasını sağlar. Büyük veri akışını algılar, özetler ve analiz eder, ardından bunu diğer bilgisayarlara, bulut tabanlı bir ağa aktarır. Büyük ölçekli bir verinin yönetilmesine yardımcı olur ve nesnelerin interneti (IoT) ölçeğinde bir ekosistemin dengelenmesini sağlar.

Endüstri 4.0'da yapay zeka, yazılım ve makinelerin insan operasyonlarını algılamasını, kavramasını, harekete geçmesini ve öğrenmesini sağlayan çok sayıda teknolojiyi entegre etmektedir. Bu teknolojinin Endüstri 4.0 ile birlikte ilerlemesi nedeniyle imalat sektörü sürekli büyümektedir. Yapay zeka, verimliliği, ürün kalitesini artırmak ve operasyonel maliyetleri azaltmak için kullanılan gelişen teknolojilerden biridir.

Bağılantılı üretim süreçlerinden oluşan akıllı fabrikalar, hepsi birbiriyle iletişim kuran birden fazla makineden oluşmaktadır. Üreticiler, daha iyi kalite kontrolü, standardizasyon ve bakım için yapay zeka ve makine öğreniminden yararlanarak veri kümelerini yöneten ve kullanan bir dijital dönüşümden geçmektedir (Zhang ve Lu, 2021). Yapay zekada yaşanan ilerlemeler, becerileri geliştirecek yenilikçi uygulamaları görebilen, duyabilen, öğrenebilen ve açabilen bilgi işlem sistemlerinin ortaya çıkmasını sağlamaktadır.

Endüstri 4.0'ın uygulamalarında kullanılan yapay zekanın birçok avantajı vardır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir (Javaid ve ark.,2022).

- Rutin görevlerin gerçekleştirilmesine yardımcı olur.
- Üretim planlama ve talep tahminini kolaylaştırır.
- Daha iyi izlenebilirlik ve güvenlik sağlar.
- Tasarım ve üretimin optimizasyonu sağlar.
- Hata ve arızaların tespit eder.
- Ürün verimliliğini artırır.
- Kalite güvence sistemlerini uygulayabilir.
- Tedarik zinciri süreçlerinin izlenebilirliğini sağlar.

2.3.3 Endüstri 4.0'ın Faydaları ve Sağladığı Avantajlar

En yeni dijital endüstriyel teknoloji olan Endüstri 4.0, çığır açıcı bir gelişmedir. Bağlantılı sistemler bu teknolojinin merkezinde yer almaktadır. Sensörler, makineler, bigi teknolojileri sistemleri ve iş süreçleri tüm değer zinciri boyunca birbirine bağlıdır ve bu bağlantılı sistemler verileri analiz edebilmekte ve internet tabanlı protokoller aracılığıyla birbirleriyle iletişim kurabilmektedir. Veri analizi, sistemlerin arızayı tahmin etmesine, kendini yapılandırmasına ve ani değişikliklere uyum sağlamasına yardımcı olmaktadır (Paksoy ve ark., 2020).

Endüstri 4.0, makineler arasında veri toplama ve analiz olanağı sağlar ve daha düşük üretim maliyetiyle daha yüksek kaliteli ürünler üreten hızlı, esnek ve verimli bir sistem sağlar. Sonuç olarak Endüstri 4.0, endüstriyel büyüme oranı arttıkça üretim verimliliğini de artırıyor. Verimliliğin artması, bir şirketin diğerlerine göre rekabet avantajı kazanmasına yol açmaktadır. Endüstri 4.0 ile fabrikalarda uygulanan bilgisayar destekli ve kontrollü üretim süreçleri ile güvenilir, sağlam ürünler hızlı bir şekilde üretilmekte ve müşteriye sunulmaktadır. Bu teknolojik gelişmeler doğrultusunda Endüstri 4.0'ın bazı avantajları aşağıda anlatılmıştır (Kesbiç, 2020):

Endüstri 4.0; tasarım, konfigürasyon, sipariş, planlama, üretim ve tedarik zinciri gibi aşamalara, müşteriye özel bireysel isteklerin ve taleplerin dahil edilmesini sağlar. Bu sayede de bireysel müşteri ihtiyaçlarına daha hızlı cevap verir. Endüstri 4.0, müşteri odaklı üretimi benimserken aynı zamanda gerçek zamanlı izleme ve kontrol, entegre bakım, uyarlanabilirlik, tedarik zinciri süreçlerinde yüksek iş birliği, akıllı ürünler ve yeni iş modelleri vadetmektedir. Dijital üretim sistemlerinde kullanılan esnek makineler sayesinde, müşterinin istediği özelliklere uygun ve hızlı üretim hatta esneklik sebebiyle küçük miktardaki partilerde üretim yapabilmek mümkün hale gelmektedir (Lydon, 2016). Esnek üretim sistemleri ayrıca müşterilerin, siparişlerini ve fikirlerini üretim esnasında herhangi bir zamanda, son aşamada bile ek ücret ödmeden değiştirmelerine imkân sağlamaktadır.

Endüstri 4.0, üretim sistemlerinde otomasyonun kullanımının artmasına yol açacaktır. Otomasyon, durum izleme, planlama ve ileri bilgi teknolojileri Endüstri 4.0'ın ortaya çıkardığı yeni iş modelinde temel unsurlar olarak öne çıkmaktadır. Otomasyon ve robotik sistemler insanlara çok tehlikeli ortamlarda kolaylık sunabilirler. Ayrıca karar verme ve problem çözme süreçlerinde insanlara yol gösterecek bir sistem oluşturmaktadır.

Siber Fiziksel Sistemler aracılığıyla; kalite, zaman, risk, sağlamlık, fiyat gibi faktörlerin dinamik olarak yapılandırılmasını sağlar. Akıllı ürünlerin durumlarını takip edebilen ve güncelleyebilen cihazların kullanımı ile üretimin gerçek zamanlı takibi ve izlenmesi kolaylaşmaktadır.

Endüstri 4.0'ın temel yapıtaşı olan siber fiziksel sistemler, tüm üretim süreçlerinin optimize edilmesine yardımcı olur. Sistem, üretimde duruşlara sebep olmadan ve ara vermeden otomatik olarak, kaynak ve enerji tüketimini optimize edebilir. Endüstriyel üretim süreçlerinin olmazsa olmaz stratejik hedefleri arasında olan kaynak verimliliği unsuru Endüstri 4.0 ile daha kolay elde edilebilir. Endüstri 4.0 uygulamaları, düşük miktarda kaynak kullanılarak mümkün olan en yüksek çıktının elde edilmesine imkân tanır.

Endüstri 4.0'ın çevreye faydaları ele alındığında ise üretimde ürün geliştirme aşamasında atıkların azaltılması, aşırı üretimin önüne geçilmesi, enerji tüketiminin düşürülmesi, doğal kaynaklardan tasarruf edilmesi gibi faydalar gösterilebilir (Waibel ve ark., 2017). Endüstri 4.0, veri merkezli teknolojiler ile karbon izi salınımı izlenebilir ve ayrıca sera gazı salınımı azaltılabilir (Gabriel ve ark., 2016).

Endüstri 4.0 yeni ürünler ve yeni iş fırsatları yaratmaktadır. Akıllı algoritmalar ile yenilikçi hizmetler sunabilmek için akıllı cihazlar tarafından kaydedilen büyük veriler, yeni ürün ve hizmetler için de kullanılabilir.

Endüstri 4.0 verimlilik artışına olanak sağladığı için bir iş için harcanan enerjiyi ve süreyi minimize ederek, elde edilen geliri artırır. Ayrıca Endüstri 4.0 işçilere, robotlarla bir arada çalışma, fabrikada etkileşim kurma gibi daha esnek ve farklı bir kariyere sahip olma imkanı sunacaktır (Santos ve ark., 2018). Endüstri 4.0 ile yaşa ve çalışana uygun iş istasyonları kullanılacak ve tekrarlanan işler azaltılacaktır. Endüstri 4.0, ekonomi, çalışma ortamı ve yetenek geliştirme konularında önemli değişikliklere neden olacaktır. Çoğunlukla makineler rutin ve tekrarlayan üretim aşamalarında insan faktörünün yerini alacaktır. Böylelikle çalışanlar tekrarlayan ve rutin bant işleri yerine yetenek ve beceri gerektiren işlere yönelebilecektir (Koleva, 2018).

Endüstri 4.0 ile ortaya çıkan yeni üretim sistemlerinde, üretim sürecinde bir aksaklık varsa bu en az insan müdahalesi ile giderilecek ve insanlara mümkün olduğunca az iş yükü yükleyecektir. Endüstri 4.0 farklı sektörlerdeki ve boyutlardaki firmalar için çok sayıda avantaj sunar. Bunlar lojistik maliyetlerinde azalma, teslim süresinde kısalma, teslimat sürelerinde azalma, stok maliyetlerinde azalma, güvenilirlik,

süreçlerde işgücü maliyetlerinin azaltılması, iş süreçlerinin basitleştirilmesi, daha fazla şeffaflık gibi unsurlardır (Kesbiç, 2020).

Endüstri 4,0'da yer alan altyapı ve teknoloji unsurları, bilgilerin ve verilerin daha verimli ve hızlı kullanılmasını mümkün kılar, bu da üretim aşamalarında bilgi aktarımının iyileştirilmesine katkı sağlar (Wyrwicka, 2017). İnternet tabanlı üretim gibi yeni kavramlar geliştirilmesi üreticiler, müşteriler ve tedarikçiler arasında etkin iletişim kurulmasını sağlar. Endüstri 4.0, sahip olduğu teknolojiler ile ülkelere sanayide ve üretimde rekabet üstünlüğü sağlamaktadır. Endüstri 4.0, imalat sanayileri ve ülkelerin ekonomileri için büyüme fırsatı yaratmaktadır.

Yapay zekâ, robotlar ve diğer akıllı otomasyon sistemleri hızlı bir şekilde gelişmekte ve verimliliği artırarak yeni daha iyi ürünler ve hizmetler üreterek ekonomiye büyük katkılar sağlamaktadır. Bu teknolojilerin 2030 yılına kadar küresel GSYH'ye yaklaşık yüzde 14 civarı katkı sağlayacağı tahmin edilmektedir.

3. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Literatürde dijital dönüşüm ile ilgili çok çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Ancak çok kriterli karar verme yöntemlerinden SWARA, BWM ve GİA yöntemi kullanılarak firmaların dijital dönüşüm yetkinliklerini belirlemeye yönelik bir çalışma bulunmamaktadır. Dijital Dönüşüm ve Endüstri 4.0 alanında, dijital dönüşüm yetkinliklerinin ölçülmesi amacı ile yürütülmüş bilimsel çalışmalara bu bölümde yer verilmiştir.

Angreani ve ark. (2023) makalelerinde Endüstri 4.0 olgunluk modelleri için temel faktörleri analiz etmeyi hedeflemişlerdir. Tüm faktörler, geniş bir literatür taramasıyla belirlenmiştir. Sonrasında ise uzman görüşleri alınarak faktörlerin önem derecesini gösteren ağırlıkları hesaplamışlardır. Çalışmalarında 7 kriter ve 16 adet alternatif belirlemişlerdir. Ağırlık belirleme ve alternatiflerin değerlendirilmesi için bulanık-TOPSIS ve DEMATEL yöntemlerini kullanmışlardır. Sunulan çalışma sonunda Endüstri 4.0 olgunluk seviyesini belirlemede en önemli kriter olarak veri analitiği, entegrasyon ve çalışanlar seçilmiştir.

Chang ve ark. (2021) KOBİ'lerde Endüstri 4.0 teknoloji uygulamasının değerlendirilmesi için, etki ağırlıklarını önceliklendirmek amacıyla çok kriterli karar verme yaklaşımı uygulamışlardır. Etki ağırlıklarını belirlemek için DEMATEL kullanmışlardır ve alternatifleri değerlendirmek için VIKOR tekniğini uygulamışlardır.

Çevik Aka (2023), çalışmasında tekstil sektöründe faaliyet gösteren firmalarda Endüstri 4.0'ın işletmelerin çeviklik özelliklerine olan etkisini belirlemeyi hedeflemiştir. Çalışmasında dört ana kriter kullanmıştır. Bu ana kriterlerle ilişkili olarak 12 alt kriter belirlemiştir. Çalışmasında kriterlerin etki düzeylerini ortaya koymak amacıyla ÇKKV yöntemlerinden FUCOM'u uygulamıştır. Tüm kriterlerin değerlendirilmesi sonucunda; Endüstri 4.0 sürecinin tekstil sektöründeki firmalar üzerinde en çok etkili olan üç çeviklik yeteneğini ortaya koymuştur.

Dermenci ve Sağbaş (2023) yaptığı çalışmada; beyaz eşya sektöründeki faaliyet bir firmada endüstri 4.0 olgunluk seviyesini belirlemek için, özgün bir dijital olgunluk modeli ortaya koymuştur. Bu nedenle yola çıkarak, AHP (Analitik Hiyerarşi Prosesi) ve TOPSIS yöntemlerini kullanmıştır. Geliştirdiği olgunluk modelinde kriter ağırlıklarını hesaplamak için Analitik Hiyerarşi Prosesi yöntemi kullanmış, çalışmanın yapıldığı işletmedeki uzmanların görüşlerini almıştır. Olgunluk modelinin değerlendirilmesinde

ise TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Sonuç olarak ise endüstri 4.0 temelinde ve belirlenen kriterler yardımıyla işletmenin teknolojik olgunluk düzeyi ortaya konmuştur.

Eren ve ark (2019) yaptıkları çalışmada Endüstri 4.0'ı uygulamak isteyen bir işletmenin Endüstri 4.0 stratejilerinden hangisini seçmesi gerektiğini belirlemek için çok ölçütlü karar verme yöntemleri kullanmışlar ve sonucu şirkete sunmuşlardır. Endüstri 4.0 strateji seçimi problemi için kullanılacak alternatif ve ölçütler belirlemişlerdir. Çok ölçütlü karar verme yöntemleri kullanılarak karar verme probleminin çözümü amaçlanmıştır. Endüstri 4.0'a yönelik strateji belirlenmesinde çok ölçütlü karar verme yöntemlerinden AAS ve TOPSIS yöntemleri uygulanarak en uygun strateji seçimini yapmışlardır.

Erik ve Kuvvetli (2021), makalelerinde farklı üretim firmalarında yapılan görüşmeler sonucunda elde edilen verilerle işletmelerin Endüstri 4.0'a entegrasyon yeteneğini analiz etmek istemiştir. Elde ettikleri verileri, veri zarflama analizi yöntemi ile değerlendirilmiş ve işletmelerin Endüstri 4.0 uyum yeteneğini saptamışlardır. İşletmeleri değerlendirilirken bilgi teknolojileri, araştırma-geliştirme faaliyetleri, planlama gibi çok sayıda başlık altında analiz edilerek kapsamlı bir değerlendirme gerçekleştirmişlerdir. Bu başlıklar altında, bilgi güvenliği, verimlilik izleyebilme, süreç iyileştirme, yalın üretim düzeyi gibi 39 adet faktör belirlemişlerdir. Yapılan değerlendirme sonuçlarına göre 24 imalat işletmesinin 13'ü dijital dönüşüm için etkin olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Erkan (2022), tezinde savunma sanayi alanında üretim yapan 6 firma için dijital dönüşüm olgunluk seviyesi hesaplamayı amaçlamıştır. Çalışmasında 20 adet kriter belirleyerek kapsayıcı bir karar modeli oluşturulmuş ve bulanık DEMATEL yöntemi kullanılarak kriterler arasındaki ilişkiler belirlemiştir. Sonrasında bu ilişkilerden yararlanarak bulanık bilişsel haritalar yöntemiyle statik analiz yapmıştır.

Kriterlerin önem sıralamalarını tespit etmiş, zeki teknoloji, zeki organizasyon ve zeki imalat kriterlerinin ilk üç sırada yer aldığı görmüştür. Çalışmasının 6 firma için 88 sorudan oluşan anket kullanarak dijital dönüşüm seviyeleri diferansiyel evrim algoritmasından yararlanarak desteklenmiş bulanık bilişsel haritalar yöntemi ile analiz etmiştir. Seçtiği 6 firma için dijital dönüşüm açısından iyi, orta ve kötü seviyelerinden hangi seviyede olduğunu belirlemiştir.

İlgün ve ark., (2021) gelişmekte olan ülkelerde faaliyet gösteren imalat işletmelerinde endüstri 4.0 teknolojilerinin kullanımında ortaya çıkabilecek çeşitli engelleri ortaya koymuştur. Bu çalışmalarında Türkiye'de imalat endüstrisinde, endüstri

4.0'a geçiş süreçlerini negatif etkileyen etkenleri ele almışlardır. Öncelikle, anketler uygulanarak ve literatür taraması yapılarak önemli faktörler ortaya koyulmuştur. Sonrasında ise ANP ve DEMATEL yöntemleri kullanılarak ile bu faktörlerin önem seviyeleri hesaplanmıştır. Çalışmanın son aşamasında ise bu olumsuz faktörlerin etkilerini azaltmak için çözüm alternatifleri kalite evi yardımıyla belirlenmiş ve önceliklendirilmiştir.

Kökümer (2018), çalışmasında beyaz eştıya sektöründe faaliyet gösteren firmaların dijital dönüştüm yetkinliklerinin belirlenmesi için bir sistem tasarlamıştır. 4 ana kriter, 23 alt kriterden oluşturulan bir anket ile beyaz eştıya sektöründeki 7 firmada, belirlenen kriterlerin puanlaması yapılmıştır. Çok kriterli karar verme yöntemlerinden MACHBETH ve TOPSIS kullanarak bu 7 firmanın dijital dönüştüm performanslarını değerlendirmiştir.

Maretto ve ark. (2022), iştletmelerin dijitalleşme sürecinde, dijital teknoloji seçimine yönelik bir metodoloji geliştirmişlerdir. Bu çerçevede bulanık mantık ve AHP yöntemlerinin birleştirerek birçok kriterli karar verme yaklaşımlı geliştirmişlerdir. Bu modelde yalnız en iyi teknolojiyi değil aynı zamanda en uygun teknolojiyi belirlemeyi hedeflemişlerdir.

zelik ve ark., (2018) alışmalarında örnek bir uygulama olarak Sakarya ilinde makine imalatı yapan bir iştletmenin dijital olgunluğunun llmesini amaçlamışlardır. alışmalarında dijitalleşme endeksi ölçümlerinde dokuz ölçüt kullanılarak ölçütlerin dijitalleşme endeksini belirlemek için Analitik Hiyerarşı Prosesi yöntemini kullanmışlardır. AHP ile ölçüt ağırlıklarını hesaplamışlardır ve iştletmenin dijitalleşme endeksini ölçmüşlerdir ve endeks değerine göre 5 seviyeli olgunluk modeli kullanarak iştletmenin seviyesini 3. Derece olarak belirlemişlerdir.

zdemir (2022) yaptığı çalışmada, KOBİ'lerde Endüstri 4.0 için yeni bir bulanık performans ölçüm modeli sunmaktır. Performans lm ve puanlama süreci için bir hibrit küresel bulanık analitik hiyerarşı süreci (SF-AHP) —ağırlıklı puan metodolojisi (WSM) nerilmektedir. Bu çalışmanın uygulama kısmında, önerilen metodoloji beşt şirkete uygulanmıştır.

Sharma ve ark (2022), KOBİ'lerin dijitalleşme yolunda karşılarına çıkan engeller arasından en yaygın olan 21 engel belirlemişlerdir. Bulanık Analitik Hiyerarşı Süreci (FAHP) ve (PROMETHEE) tekniğini kullanarak engelleri değerlendirmişlerdir. Sonrasında ise engelleri aşmak için etkili karar stratejileri belirlemişlerdir.

Sriram ve Vinodh (2020), makalelerinde (COPRAS) metodunu kullanarak KOBİ'lerde Endüstri 4.0 uygulamasına hazırlık faktörlerini analiz etmektedirler. KOBİ'lere Endüstri 4.0'ın adapte edilmesini kolaylaştırmak için hazırlık faktörlerinin analiz edilmesi gerekmektedir. Hazırlık faktörlerinin analizinde, çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan COPRAS yöntemi kullanılarak hazırlık faktörlerini analiz etmişlerdir.

Uçak (2021) , tez çalışmasında üretim yapan bir firmanın dijital olgunluk seviyesini hesaplamayı amaçlamıştır. Dijital olgunluk seviyesi, şirketin Endüstri 4.0'ı ne oranda benimseyip uyguladığı konusunda mevcut durumunu göstermektedir. Bu üretim firmasının dijital dönüşüm olgunluk seviyesini, şirket içinde uygulanan anket ve uzmanların görüşlerinin ağırlıklandırılması ile belirlemiştir. Uyguladığı ankette 5 seviyeli olgunluk modeli kullanılmıştır. Çalışmasında şirket stratejilerine en uygun bulduğu çok kriterli karar verme metodlarından biri olan Bulanık AHP'yi uygulamıştır. Önerdiği model ile firmanın dijital olgunluk seviyesinin belirlenmesi ve Bulanık AHP metodu ile firmaya yol haritası oluşturulmasında yardımcı olmuştur ve bu alanda literatüre katkı sağlamıştır.

Yıldızbaşı ve Ünlü (2020), makalelerinde kimya, otomotiv ve demir-çelik sektörü olmak üzere 3 farklı alanda faaliyet gösteren firmanın endüstri 4.0 yetkinliğini karşılaştırmayı amaçlamıştır. Endüstri 4.0 teknolojilerini ölçmek için 8 adet kriter belirlemişlerdir. Bu kriterler; büyük veri, nesnelerin interneti, bulut bilişim gibi kriterlerdir. Sonrasında ise deneyimli uzmanlar tarafından kriterler değerlendirilmiştir ve Bulanık-AHP yöntemini kullanarak kriter ağırlıklarını belirlemişlerdir. Daha sonra ise bulanık-TOPSIS yöntemini kullanarak firmaları Endüstri4.0 performansına göre sıralamışlardır.

Zeng ve ark. (2021) İmalat işletmelerinde dijital dönüşümün başarılarının bilimsel olarak değerlendirilmesi için çok kriterli bir model kullanmışlardır. Sezgisel bir bulanık hibrit ortalama önermişlerdir. Son olarak, önerilen yöntemin etkinliğini doğrulamak için 4 imalat işletmesinin vaka çalışması sunmuşlardır.

Çizelge 3.1. Dijital Dönüşüm ve Endüstri 4.0 Performanslarının Belirlenmesi ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Yıl	Yazar(lar)	Uygulama Alanı	Yöntem
2023	Angreani ve ark.	Endüstri 4.0 olgunluk modelleri için temel faktörlerin analiz edilmesi (7 adet kriter)	BULANIK-TOPSIS DEMATEL
2023	Çevik Aka	Endüstri 4.0 kriterlerinin etki düzeylerinin belirlenmesi (12 adet kriter)	FUCOM
2022	Erkan	Savunma sanayi alanında faaliyet gösteren firmaların dijital dönüşüm seviyelerinin belirlenmesi. (20 adet kriter)	DEMATEL
2022	Erkan, E.F.	Dijital olgunluk performansının değerlendirilmesi (20 adet kriter)	DEMATEL
2022	Özdemir	Endüstri 4.0 için yeni bir bulanık performans ölçüm modelinin geliştirilmesi. (12 adet kriter)	BULANIK – AHP WSM
2022	Sriram ve Vinodh	Endüstri 4.0 uygulamasına hazırlık faktörlerinin ağırlıklarının analiz edilmesi (15adet kriter)	COPRAS
2021	Chang ve Lu	Endüstri 4.0 değerlendirme kriterlerinin etki ağırlıklarının önceliklendirilmesi (9 adet kriter)	DEMATEL VIKOR
2021	Dermenci ve Sağbaş	Endüstri 4.0 performansının değerlendirilmesi (27 adet kriter)	AHP TOPSIS
2021	Erik ve Kuvvetli	Endüstri4.0’a entegrasyon kriterleri kullanılarak firmaların dijital dönüşüm etkinliğinin belirlenmesi (39 adet kriter)	Veri zarflama analizi
2020	Wagire ve ark.	Endüstri 4.0 olgunluk seviyesinin belirlenmesinde kullanılan kriterlerin ağırlıklandırılması (38 adet kriter)	BULANIK-AHP
2018	Kökümer, Z.	Beyaz Eşya firmalarının Endüstri 4.0 performanslarının değerlendirilmesi (23 adet kriter)	MACHBETH TOPSIS

4. PERFORMANS DEĞERLENDİRME YÖNTEMLERİ

İş süreçlerinde kullanılan terim olarak performans; işin yapılma biçimi veya işin yapılma kalitesidir. En genel anlamıyla performans, işi yapan bir bireyin, bir grubun ya da bir kuruluşun, o işle ilgili planladığı hedefe yönelik olarak, belirli bir zaman diliminde hedeflenen noktaya ne kadar ulaşılabilirdiğini nicel ve nitel olarak ölçebilen bir kavramdır (Akal, 2005). Organizasyonlarda performans kavramı sürekli gelişen ve değişikliklere açık bir süreç olarak görülmektedir. Örgütsel performans, bir organizasyonun müşterilerin talep ve beklentilerine ne ölçüde yanıt verebildiğini, kaynaklarını ne ölçüde verimli kullanabildiğini, yeniliklere ne kadar açık olduğunu, çok yönlü olarak gösterebilen bir kavramdır. Günümüzde performans oldukça geniş ve çok yönlü bir kavram olarak ele alınmaktadır. Performans; etkililik, kalite, verimlilik, inovasyon, kârlılık gibi etkenler arasında geniş ilişkiler sonucunda oluştuğu ileri sürülmektedir.

Literatürde işletmelerde performans yönetimi kavramları ilk olarak Frederick W. Taylor tarafından ortaya atılmıştır. İşletmeler hedeflerine ne ölçüde ulaştıklarını belirleyebilmek, rakiplerine göre kendi durumlarını görebilmek ve faaliyet gösterdikleri sektörlerde seviyelerini belirlemek için performans ölçüm yöntemlerine ihtiyaç duyarlar. Küreselleşmeyle beraber rekabetin artması, bilgi teknolojilerindeki ilerlemeler ve müşteri beklentilerinde oluşan değişimler performans ölçümünün önemini ve gerekliliğini göstermektedir. Bu nedenle de performans ölçümünün tek boyutlu veya sadece finansal verilerle uygulanması eksikliklere ve sorunlara neden olabilmektedir (Başat, 2011). Performans ölçümü, işletmelerde yönetimin kontrol işlevinin en önemli faaliyetlerinden biridir.

Performans değerlendirme yöntemleri, genellikle finansal ve finansal olmayan yöntemler olarak uygulanmaktadır. Yöneticiler genellikle finansal ölçümleri kullanmaktadırlar. Geleneksel olarak görünen bu yöntemlerde verimlilik ve kârlılık ön plana çıkmaktadır. Günümüzde ise fırsatları değerlendirebilme, inovasyon, kalite, esneklik, güvenilirlik gibi faktörler ile yapılan değerlendirme yaklaşımları sayesinde işletmelere, rekabet üstünlüğü sağlanmaktadır. Finansal performans değerlendirme yöntemleri kısa vadeli, geçmiş verileri kullanan ve gelecekle ilgili öngörülerde yetersiz kalan ölçüm sistemleridir. Bu eksiklikler nedeniyle finansal olmayan değerlendirme yaklaşımları önem kazanmıştır (Sivaslıoğlu, 2022). Bu yöntemler kısaca açıklanacak olursa şu şekildedir:

Finansal Performans Değerleme Yaklaşımları: Genellikle işletmelerde finansal performans değerlemede finansal veriler (bilanço, kâr-zarar tabloları vb.) ele alınmaktadır. Karlılık, satış hacmi, borçluluk oranı, borç ödeyebilme yeteneği, gibi göstergeler finansal performans değerlendirme konusunda baz alınan faktörlerdir. En önemli finansal performansı ölçme yöntemi finansal tabloların analizi olarak görülmektedir. Finansal tablo analizleri; analistler tarafından çeşitli analiz teknikleri kullanılarak performans ve mali durumu ortaya koyan yöntemlerdir. Finansal analiz yapılırken en çok kullanılan yöntem ise oran analizidir. Oran analizi işletmenin likidite ve finansal durumu, karlılığı, devir hızı ve verimliliği hakkında sağlıklı ve geçerli bilgiler sunmaktadır (Farajollahi, 2016).

Finansal Olmayan Performans Değerleme Yaklaşımları: Yoğun rekabet ortamında çevresel etkenlerdeki değişiklikler nedeniyle, yönetimde rasyonel kararlarla ilgili yeni yaklaşımlar geliştirilmesi gerekmektedir. Karar verme süreçlerinde hedef olarak kalite, maliyet, hız, verimlilik, esneklik ve güvenilirlik faktörlerinde yeni yaklaşımlar oldukça önemlidir. Rekabet koşullarının zorlaşmasıyla beraber firmalar kar sağlamak, süreklilik göstermek ve pazarda yer edinebilmek için etkili bir performans ölçüm sistemi uygulamaları kullanarak etkinliklerini artırmaktadırlar. Organizasyonel performans gelişimi ile bağlantılı süreç odaklı yaklaşımlar; kıyaslama, altı sigma, toplam kalite yönetimi gibi yöntemlerdir.

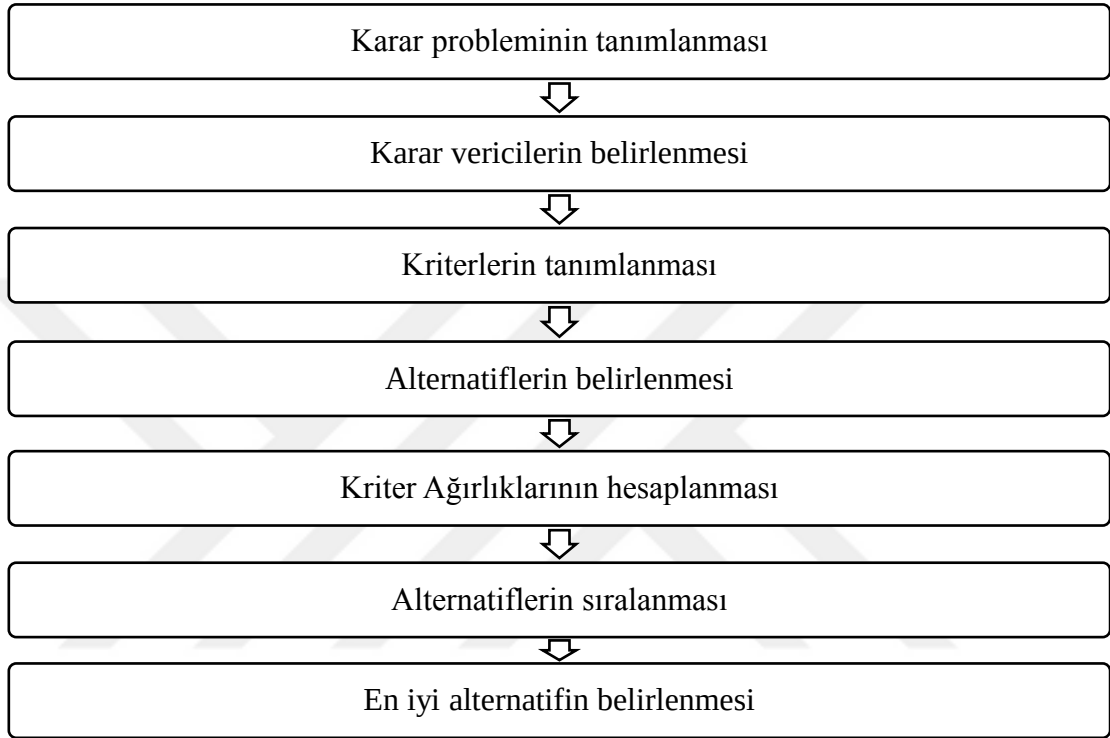
4.1 Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ile Performans Değerlendirme

Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) teknikleri performans ölçümünde sıklıkla kullanılan yöntemlerdir. Performans değerlendirmede genellikle birbiriyle çelişen öznel ve nesnel olarak çok sayıda değerlendirme kriteri kullanıldığı için son yıllarda ÇKKV yöntemlerinin kullanımı yaygınlaşmıştır. ÇKKV teknikleri karar vericilerin görüşlerini dikkate aldığı için subjektif, matematiksel algoritmalara dayalı oldukları için de objektif analiz yöntemleri olarak ele alınmaktadır. Günümüzde işletmelerin performans değerlendirmeleri kriterleri çok boyutlu olması nedeniyle ÇKKV teknikleri bu gibi uygulamalarda daha basit ve kullanışlı tekniklerdir (Çakır ve Perçin, 2013).

Karar verme, karar vericinin birçok farklı alternatifle karşılaştığı durumlarda bu seçeneklerden amaca en uygun olanlardan birini veya birkaçını seçme sürecidir. Günümüzde bireysel veya daha büyük ölçekli kararlar almak zorunda olan insanlar veya kurumlar karar alırken çok sayıda kriteri göz önünde bulundurmalıdır. Çok kriterli karar

verme yönetim, matematik, mühendislik gibi farklı disiplini içinde bulunduran bir yapıdır. ÇKKV karar vericiye farklı boyutlarda karar problemini değerlendirme ve karar alma imkânı sağlar.

Literatürde çok sayıda ÇKKV yöntemi bulunmaktadır. Bunlar incelendiğinde genel olarak çok kriterli karar verme adımları şu şekildedir

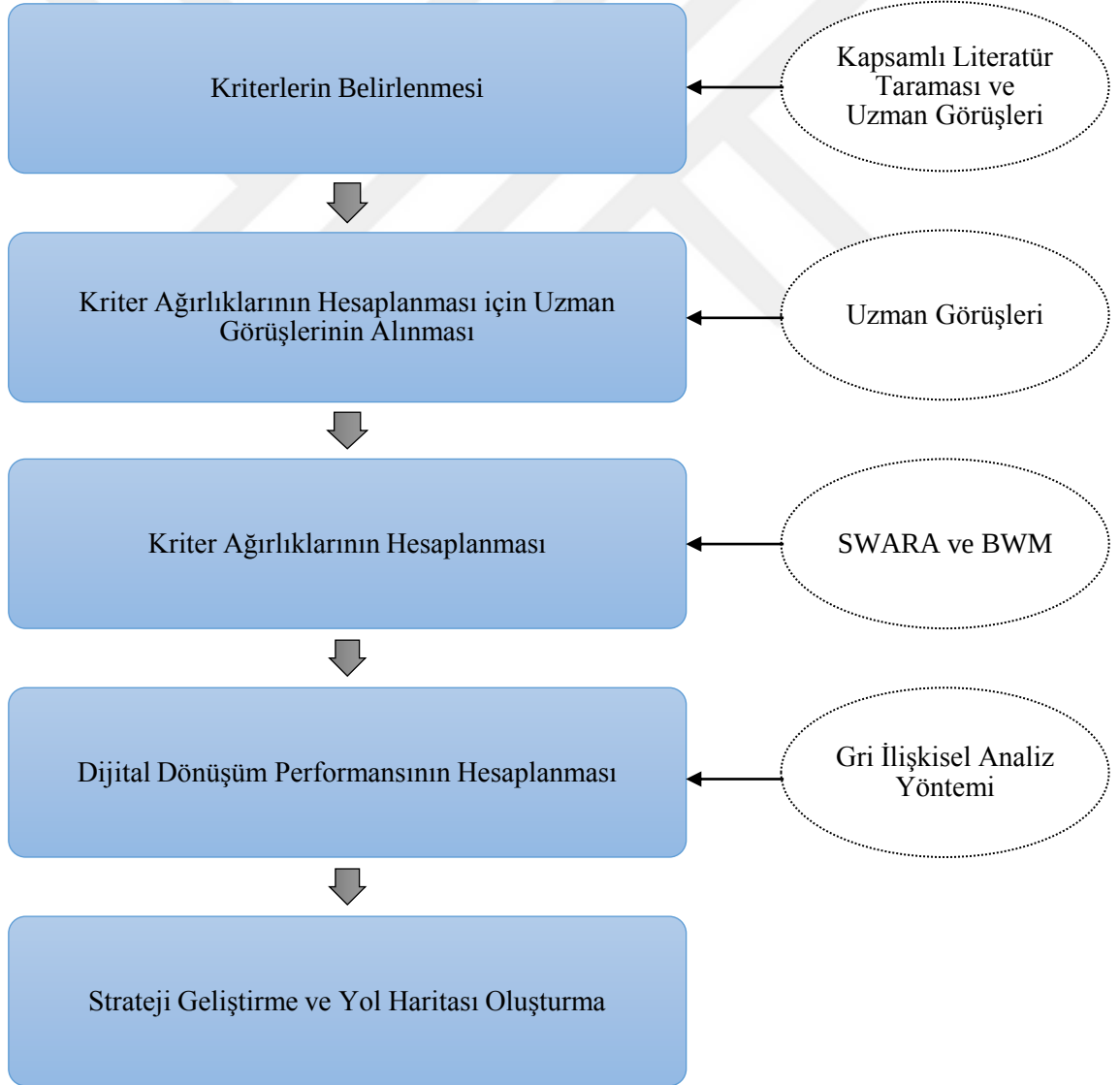


Şekil 4.1. Çok Kriterli Karar Verme Sürecinin Adımları

ÇKKV adımları incelendiğinde en önemli adımlardan birisi kriter ağırlıklarının hesaplanmasıdır. Bu aşamada kullanılan çok sayıda yöntem vardır. Bunlardan en yaygın kullanılanlar; AHP, ANP, CRITIC, ENTROPİ, SWARA gibi yöntemlerdir. Alternatiflerin sıralanması aşamasında ise en sık kullanılan yöntemler arasında COPRAS, EDAS, ELECTRE, VIKOR, WASPAS, SAW, DEMATEL, BWM gibi yöntemler bulunmaktadır.

5. ÖNERİLEN PERFORMANS ÖLÇÜM YÖNTEMİ

Bu bölümde, dijital dönüşüm etkinliğinin değerlendirilmesi amacıyla geliştirilen performans ölçüm sisteminin adımları ayrıntılı olarak ele alınacaktır. Performans ölçüm yönteminin ilk adımında, literatür taraması ve uzman görüşlerine dayalı olarak kriterler belirlenecek ve bu kriterlerin ağırlıkları hesaplanacaktır. Kriter ağırlıklarının hesaplanması için SWARA ve BWM yöntemleri kullanılacaktır. Performans skorunun hesaplanabilmesi içinse Gri İlişkisel Analiz yöntemi uygulanacaktır. Son olarak, bu analiz sonucunda elde edilen bulgular doğrultusunda strateji geliştirme ve yol haritası oluşturma süreci gerçekleştirilecektir. Önerilen performans ölçüm yöntemi adımlarını gösteren akış şeması Şekil 5.1'de sunulmuştur.



Şekil 5.1. Dijital Dönüşüm Performans Ölçüm Sistemi Aşamaları

Önerilen Performans Ölçüm sistemi için kullanılacak olan SWARA, BWM Yöntemi ve Gri ilişkisel analiz yöntemleri bu bölümde anlatılacaktır.

5.1 SWARA (Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis) Yöntemi

Türkçe'ye “Aşamalı Ağırlık Değerlendirme Oran Analizi Yöntemi” olarak çevrilen SWARA yöntemi yani “Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis” 2010 yılında literatüre kazandırılmıştır. Swara yöntemi son yıllarda sıklıkla kullanılmaya başlanan bir ÇKKV yöntemidir. Bu yöntem, ilk olarak Keršulienė, Zavadskas ve Turskis tarafından 2010 yılında ortaya konulmuştur (Keršulienė ve ark, 2010). Literatürde CRITIC, SWARA yöntemi, Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP), Analitik Ağ Prosesi (ANP), Entropi yöntemleri gibi kriter ağırlık belirlemede kullanılan yöntemleri bulunmaktadır (Zolfani ve ark, 2013). Ancak SWARA tekniğinde ağırlık belirlemek için, literatürde yer alan diğer yöntemlere kıyasla tercih edilmesinin birçok sebebi bulunmaktadır (Çakır, 2018).

İlk olarak SWARA yöntemi basit uygulanabilen bir yöntem olduğundan dolayı farklı uzmanların veya karar vericilerin aynı anda ortak bir amaç için çalışabilmelerini kolaylaştırır. Bu nedenle, karar vericiler zamandan tasarruf edebilirler. AHP ve ANP gibi yöntemlerle kıyaslandığında SWARA yönteminde uzmanların görüşleri ön planda olduğu için daha öznel bir değerlendirme sağlar. (Hashemkhani Zolfani ve ark, 2015). SWARA yöntemi ile ağırlıklandırma yaparken kriterler arasında yapılan ikili karşılaştırmaların sayısı AHP yöntemine göre daha azdır. Bu durum işlem maliyetinin azaltmasını sağlamaktadır. SWARA yönteminin diğer yöntemlere kıyasla daha kolay uygulanabilmesi, işlem maliyetini azaltması, karar vericilere öncelik belirlemek için daha fazla olanak sağlaması nedeniyle son yıllarda kriter ağırlıklandırma yöntemi olarak sıklıkla tercih edilmektedir. SWARA yöntemi ayrıca karar vericilerin kendi öncelikleri seçmesini sağlar. Ayrıca bu yöntemde karar verici olarak belirlenen uzmanların rolü daha da etkilidir. SWARA yönteminin işlem adımları aşağıda anlatılmıştır.

Adım 1: Uzmanlar, kriterler için önem sıralaması yapar. Örneğin en önemli olan ilk sırada, en önemsiz olan en son sırada olacak şekilde sıralama yapılır.

Adım 2: İkinci kriterden başlanarak, j-1. kriter ile j. Kriterin kıyaslaması yapılır ve j-1.kriterin j. kritere karşı göreceli önemi belirlenir. Bu belirlenen değere (s_j),

Keršulienė vd. (2010) tarafından “ortalama değerin karşılaştırmalı önemi” adı verilmiştir. S_j değeri için uzmanlar, 0,05 ve katlarını kullanmışlardır.

Adım 3: Tüm kriterler için katsayı değeri k_j , Eşitlik (5.1) kullanılarak hesaplanır.

$$j=1 \text{ ise } k_j=1, j>1 \text{ ise } k_j=s_j+1 \quad (5.1)$$

Adım 4: Tüm kriterler için q_j değeri yani düzeltilmiş ağırlıklar Eşitlik (5.2) kullanılarak hesaplanır. Birinci sırada yer alan kriterin q_j değeri 1 olarak kabul edilir ve q_j hesaplanırken q_j 'ye göre yapılan sıralama dikkate alınır.

$$j>1 \text{ ise } q_j = \frac{q_{j-1}}{k_j}; j=1 \text{ ise } q_j=1 \quad (5.2)$$

Adım 5: Bütün kriterler için nihai ağırlıkların hesaplaması Eşitlik (5.3) kullanılarak yapılır.

$$W_j = \frac{q_j}{\sum_{j=1}^n q_j}; j = 1, n \quad (5.3)$$

5.2 En İyi En Kötü Yöntemi (BWM)

2015 yılında Rezaei tarafından geliştirilen BWM, bir karar verici tarafından sağlanan ikili karşılaştırmalarda kriterlerin göreceli önem oranlarını kullanır. Bu yöntem vektör temelli bir yöntemdir. Öncelikle en iyi kriter ve en kötü kriter belirlenir ve sadece bu iki kriterin diğer kriterlere göre kıyaslaması yapılır. Kriter ağırlıkları doğrusal olmayan veya doğrusal bir modelin çözülmesiyle elde edilir. En popüler ikili karşılaştırma tabanlı ÇKKV yöntemlerinden biri olan Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ile karşılaştırıldığında BWM, daha az karşılaştırma verisine ihtiyaç duyarken, daha tutarlı karşılaştırmalar üreterek önceki analizlere göre daha güvenilir sonuçlar üretilmesine olanak tanır. Basitliği ve güvenilirliği sayesinde BWM, farklı karar verme problemlerinde yaygın olarak uygulanmıştır. Literatür incelendiğinde personel seçiminde, erp yazılımı seçiminde, ürün tasarımı kriterlerinin ağırlıklandırılması gibi alanlarda başarılı bir şekilde uygulanmıştır. BWM yöntemi çözüm adımları 6 adımdan oluşmaktadır (Rezaei, 2015).

Adım 1: Karar probleminde kullanılacak kriter setinin $(C_1, C_2, \dots, C_n)$ belirlenmesi

Adım 2: En iyi kriterin (örneğin en çok istenen, en önemli) ve en kötü kriterin (örneğin en istenilen, en az önemli) belirlenmesi: Karar vericiler bu adımda en önemli ve en az önemli kriterleri belirlerler.

Adım 3: En iyi kriterin diğer kriterlere göre tercih düzeylerinin belirlenmesi: Bu aşamada 1-9 Aralığındaki bir değerlendirme skalasından (Çizelge 5.1) (1: eşit önemli; 9: oldukça çok önemli) yararlanılarak, en önemli kriterin diğerlerine göre tercih düzeyleri belirlenir. Değerlendirmeler sonucunda en önemli kriterin diğerlerine göre tercihini gösteren Best-Others vektörü (A_B) , Eşitlik (5.4)'de gösterilen şekilde oluşturulur.

$$A_B = (A_{B1}, A_{B2}, \dots, A_{Bn}) \quad (5.4)$$

Eşitlik (5.4)'de yer alan A_B vektörü içerisindeki a_{Bj} en iyi kriteri temsil eden B'nin, j kriterine göre tercihini gösterecektir.

Çizelge 5.1. BWM Karşılaştırma Ölçeği

Önem derecesi	Kriterlerin Karşılaştırılması için Sözlü Anlatım
1	Eşit derecede önemli
2	Eşit olarak orta derecede önemli
3	Orta derecede daha önemli
4	Orta derecede çok daha önemli
5	Güçlü olarak önemli
6	Güçlü olarak çok önemli
7	Çok güçlü olarak önemli
8	Çok güçlü olarak daha önemli
9	Oldukça çok önemli

Adım 4: Diğer kriterlerin en kötü kritere göre tercih düzeylerinin belirlenmesi: Bu aşamada 1-9 aralığındaki değerlendirme skalasından yararlanılarak, diğer kriterlerin en az önemli kritere göre tercih düzeyleri belirlenir. Değerlendirmeler sonucunda diğer kriterlerin en az önemli kritere göre tercihini gösteren vektörü (A_w) , Eşitlik (5.5)'de gösterilen şekilde oluşturulur.

$$A_w = (a_{1w}, a_{2w}, \dots, a_{nw})^T \quad (5.5)$$

Eşitlik (5.5)'de yer alan A_w vektörü içerisindeki a_{jw} , j kriterinin en az önemli kritere göre tercihini gösterecektir.

Adım 5: Kriterlerin optimal ağırlıklarının hesaplanması: Bu aşamada kriter ağırlıkları $(w_{c1}, w_{c2}, \dots, w_{cn})$ minimaks bir modelin çözülmesi ile hesaplanır.

$\left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right|$ ve $\left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right|$ Farklarının maksimumunu minimum yapan model Eşitlik (5.6)-(5.10)'da gösterilen doğrusal programlama modeline dönüştürülür.

$$\min \xi \quad (5.6)$$

$$\left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi, \forall j \quad (5.7)$$

$$\left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \leq \xi, \forall j \quad (5.8)$$

$$\sum_j w_j = 1 \quad (5.9)$$

$$w_j \geq 0, \forall j \quad (5.10)$$

Eşitlik (5.6) - (5.10)'da gösterilen modelin çözülmesiyle kriter ağırlıkları $(w_{c1}, w_{c2}, \dots, w_{cn})$ ve yapılan değerlendirmelerin tutarlılığını gösterecek olan ξ değeri hesaplanır.

Adım 6: Tutarlılığın test edilmesi: Yöntemin uygulanmasının son aşaması olarak Çizelge 5.2'de gösterilen tutarlılık endeks değerleri kullanılarak, değerlendirme sonuçlarının tutarlılığı test edilir. Tutarlılık oranı ise Eşitlik (5.11)'den yararlanılarak hesaplanır.

$$\text{Tutarlılık Oranı (TO)} = \xi / \text{Tutarlılık endeks değeri (TE)} \quad (5.11)$$

Tutarlılık oranı sıfıra ne kadar yakınsa yapılan değerlendirmelerin daha tutarlı olduğu, 1'e ne kadar yakınsa tutarlılığın zayıf olduğu şeklinde yorumlanır.

Çizelge5.2. Tutarlılık Endeks Değerleri

a_{Bw}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
TE	0,00	0,44	1,00	1,63	2,30	3,00	3,73	4,47	5,23

5.3. Gri İlişkisel Analiz Yöntemi

1982 yılında Deng tarafından geliştirilen gri sistem teorisi karar verme süreçlerinde net bilgiye ulaşmanın mümkün olmadığı belirsizlik durumlarında kullanılan bir sistemdir. Gri sistem teorisinin uygulama alanlarından biri olan ve ayırık veri setleri arasındaki ilişkilerin analizinde kullanılan Gri İlişkisel Analiz popüler yöntemlerden biridir. Gri İlişkisel Analizin en büyük avantajları orijinal verilere dayanması, hesaplamaların kolay olması, anlaşılır olması ve iş ortamında en iyi karar verme yöntemlerinden biri olmasıdır.

Gri İlişkisel Analizde öncelikle tüm alternatifler karşılaştırılabilirlik dizisine dönüştürülür. Sonraki adımda ise bir referans (ideal hedef) dizi tanımlanır. Sonraki adımda veriler normalize edilerek 0-1 aralığındaki değerlere dönüştürülür. Daha sonra referans dizisi ile tüm karşılaştırılabilirlik dizileri arasında Gri İlişkisel katsayı hesaplanır. Son olarak, referans dizisi ve karşılaştırılabilirlik dizileri arasındaki Gri İlişkisel derece, gri ilişkisel katsayıya göre hesaplanır. Alternatifler arasında en yüksek Gri İlişkisel skoru alan alternatif en iyi seçim olacaktır (Ertuğrul ve ark.,2016).

Gri ilişkisel analiz yönteminin adımları adımları şu şekildedir:

Adım 1: Karar Matrisinin oluşturulması

İlk adımda alternatiflerin kriter değerlerini belirten karar matrisi oluşturulur. Burada n alternatifleri, m kriterleri, $x_i(j)$ i. alternatifin j. kritere göre değerini göstermektedir ve nxm boyutlu karar matrisi eşitlik (5.12)'deki gibi oluşturulur.

$$x_i = \begin{bmatrix} x_1(1) & x_1(2) & \dots & x_1(n) \\ x_2(1) & x_2(2) & \dots & x_2(n) \\ \vdots & \ddots & \dots & \vdots \\ x_m(1) & x_m(2) & \dots & x_m(n) \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Adım 2: Referans Serisinin Belirlenmesi

Gri ilişkisel analizin bu aşamasında değerlendirme kriterlerine ilişkin referans serileri belirlenmelidir. Referans seri $x_0 = x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(j) \dots \dots x_0(n)$ şeklindedir. $x_0(j) = j, j$. Kriterin değerleri arasındaki en büyük, en küçük ve olması istenen bir değeri belirtmektedir.

Adım 3: Karar Matrisinin Normalize Edilmesi

Normalizasyon işlemi fayda durumu, maliyet durumu ve optimal durum olmak üzere 3 farklı şekilde yapılmaktadır. Seri değerlerinin daha büyük olması amaca olumlu katkı sağlıyorsa normalizasyon işlemi Eşitlik (5.13) ile gerçekleştirilir.

$$x_{i*} = \frac{x_i(j) - \min_j x_i(j)}{\max_i(j) - \min_j x_i(j)} \quad (5.13)$$

Seri değerlerinin daha küçük olması amaca olumlu katkı sağlıyorsa normalizasyon işlemi Eşitlik (5.14) ile yapılır.

$$x_{i*} = \frac{\max_i(j) - x_i(j)}{\max_i(j) - \min_j x_i(j)} \quad (5.14)$$

Seri değerlerinin belirlenen bir optimal değere göre normalizasyonu gerçekleştirilecekse Eşitlik (5.15) kullanılır.

$$x_{i*} = \frac{|x_i(j) - x_{ob}(j)|}{\max_i(j) - x_{ob}(j)} \quad (5.15)$$

Adım 4: Mutlak Değer (Fark) Matrisinin Oluşturulması

x_{0*} ile x_{j*} arasındaki mutlak farkın değeri $\Delta_{0i}(j)$ eşitlik (5.16) ile hesaplanır.

$$\Delta_{0i}(j) = |x_{0*}(j) - x_{i*}(j)| \quad (5.16)$$

Adım 5: Gri İlişki Katsayılarının Hesaplanması

Gri ilişki katsayıları Eşitlik (5.17) kullanılarak hesaplanır.

$$\gamma_{0i}(j) = \frac{\Delta_{min} + \xi \Delta_{max}}{\Delta_{i}(j) + \xi \Delta_{max}} \quad (5.17)$$

Formülde yer alan ξ katsayısı 0 ile 1 arasında bir değer almaktadır. Ancak literatürde uygulamacılar genellikle bu değeri 0,5 olarak kullanılmaktadır.

Adım 6: Gri İlişki Derecesinin Hesaplanması

Gri ilişki derecesinin hesaplanması aşamasında iki farklı formül kullanılır. Kriterlerin önem seviyelerinin eşit olduğu varsayımında Eşitlik (5.18), önem seviyelerinin farklı olduğu durumlarda ise Eşitlik (5.19) kullanılır. w_j değeri kriter ağırlıklarını ifade eder ve ağırlıklar toplamı 1'e eşittir.

$$\Gamma_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \gamma_{0i}(j) \quad (5.18)$$

$$\Gamma_{0i} = \sum_{j=1}^n w_i(j) \cdot \gamma_{0i}(j) \quad (5.19)$$

6. DİJİTAL DÖNÜŞÜM ETKİNLİK DEĞERLENDİRME KRİTERLERİ

Teknolojide yaşanan hızlı değişimler sonucu ortaya çıkan dijitalleşme ve dijital teknolojiler kadar işletmelerin dijitalleşme seviyesinin belirlenmesi de işletmeler için önemlidir. Dijitalleşme seviyesinin ölçümü için literatürde ve pratikte birçok model kullanılmaktadır. DD etkinliğinin belirlenebilmesi için öncelikle DD süreçlerindeki önemli faktörler (kriterler) belirlenmiştir. Bunun için detaylı literatür taraması yapılarak üretimde dijital dönüşüm etkinliğini belirlemeye yönelik kullanılan kriterler belirlenmiştir. 3 ana başlık ve 6 alt başlık ve 26 adet kriter belirlenmiştir. Çalışmada kullanılacak olan kriterler 6 ana kriter olarak belirlenmiştir. Ana kriterler altında 26 alt kriter, dijital dönüşüm performans değerlendirilmesinde kullanılacaktır. Kriterler ve kısa açıklamaları Çizelge 6.1’de gösterilmiştir.

6.1 Teknolojik Yetenekler

6.1.1 Akıllı Üretim Teknolojileri

Gelişmiş Robotik (Otonom ve İşbirlikçi Robotlar) (K1.1): Robotik kavramı, George Devol tarafından tasarlanan “Evrensel Otomasyon” adını verdiği robot ile ilk olarak 1954 yılında dünyaya duyurulmuştur. Robotik kavramı, robotların tasarımıyla, yapım aşamalarıyla, işletim sistemleriyle ilgilenen ve kontrol, duyuşal geri bildirimleri almak için bilgisayar sistemlerinden yararlanan bir bilim dalıdır (Gulati ve ark., 2015). Yapay zekânın ilerlemesine paralel olarak işletmeler özellikle üretimde robotik teknolojilerden yararlanarak işletme içinde akıllı otomasyonlar kullanmaktadır. Akıllı otomasyonlar, günlük iş süreçleri ile büyük karmaşık bilgi ve verileri otonom bir hale getirmek için veriyi ve veri analitiğini, robotiği ve yapay zekâyı uygulayabilen sistemlerdir (Kaya, 2022). Geçmişte insan gücüyle yapılamayan katma değerli işleri günümüzde robotlar üstlenmeye başlamıştır. Yakın geçmişte kullanılan robotlar akıllı cihazlar olmadığı için sadece operatörler yardımıyla işlevsel olabiliyordu. Günümüzde ise robotlar algılama, analiz, kontrol ve veri depolama alanlarında destek sağlamaktadırlar. Robotik sistemler üretim faaliyetlerinde devrim yaratacak niteliktedirler. Robotlar insanlarla kıyaslandığında psikolojik ve fizyolojik yetersizlik unsurlarını devre dışı bırakmaktadır ve bu durum üretimin alanına hız kazanmaktadır (Uçak, 2021).

Çizelge 6.1. Dijital Dönüşüm Etkinlik Değerlendirme Kriterleri

	Ana kriterler	Alt Kriterler	Çalışma(lar)
Teknolojik Yetenekler	K1-Akıllı üretim teknolojileri	K1.1-Gelişmiş Robotik (Otonom ve İşbirlikçi Robotlar)	Ayyıldız ve Demir, (2022). Biby ve Dehe, (2018) Kamble ve ark., (2019)
		K1.2-Siber Fiziksel Sistemler	Angreani ve ark., (2023) Kamble ve ark. (2019) Osterrieder, (2020) Yıldızbaşı ve Ünlü (2020)
		K1.3-Dijital İkiz ve Artırılmış Gerçeklik	Dermenci ve Sağbaş, (2023) Yıldızbaşı ve Ünlü (2020)
		K1.4-Eklemeli İmalat teknolojisi	Angreani ve ark., (2023) Biby ve Dehe, (2018) Wagire ve ark., (2020)
	K2-Veri ve yazılım altyapısı	K2.1-Endüstriyel Nesnelerin İnterneti	Angreani ve ark., (2020) Biby ve Dehe, (2018) Osterrieder, (2020)
		K2.2-Endüstriyel Veri Güvenliği	Dermenci ve Sağbaş, (2023) Kökümer, (2018) Özdemir, (2022)
		K2.3-Büyük Veri ve Analitik	Biby ve Dehe, (2018) Hitham ve ark. (2023) Yıldızbaşı ve Ünlü (2020)
		K2.4-Bulut Bilişim ve Uç Bilişim (Edge Computing)	Angreani ve ark., (2020) Biby ve Dehe, (2018) Dermenci ve Sağbaş, (2023)
		K2.5-Kurumsal Kaynak Planlaması (ERP) Yazılımı	Kökümer. (2018) Özdemir, (2022)
		K2.6-Blokzinciri Teknolojisi	Wagire ve ark., (2020) Wang ve Sao, (2024)
İnsan ve Organizasyonel Faktörler:	K3-İşgücü Gelişimi ve Stratejik Bağlılık	K3.1-Dijital beceriler ve yetkinlik geliştirme	Büyüközkan ve Güler, (2019). Wagire ve ark., (2020)
		K3.2-İnsan-robot iş birliği	Osterrieder, (2020)
		K3.3-Yatırım ve kaynak tahsisi	Dermenci ve Sağbaş, (2023) Keskin ve ark. (2019) Wagire ve ark., (2020)
		K3.4-Dijital dönüşüm stratejisi	Büyüközkan ve ark., (2020) Hitham ve ark. (2023)
		K3.5-Liderlik Desteği ve vizyonu	Büyüközkan ve Güler, (2019) Hitham ve ark. (2023)
Operasyonel verimlilik ve entegrasyon	K4-Üretim Süreci Otomasyonu	K4.1-Süreç Otomasyonu ve Kontrolü	Alkan ve Kahraman, (2019) Dermenci ve Sağbaş, (2023) Angreani ve ark., (2023)
		K4.2-Ürün ve Üretim İzlenebilirliği	Wagire ve ark., (2020)
		K4.3-Kestirimci Bakım ve Arıza Tespiti	Dotoli ve ark., (2018)
		K4.4-Esneklik ve Yeniden Yapılandırılabilirlik	Sriram ve Vinodh, (2020).
	K5-Kesintisiz Mühendislik ve Optimizasyon Uygulamaları	K5.1-Dijital Tasarım ve Prototipleme	Doğan ve Baloglu, (2020).
		K5.2-Üretim Yürütme Sistemleri (MES) Kullanımı	Biby ve Dehe, (2018) Kökümer, (2018)
		K5.3-Envanter Optimizasyon Uygulamaları	Khan ve Ahmed, (2024) Liu ve Nishi, (2023)
		K5.4-Enerji Tüketiminin İzlenmesi ve Optimizasyonu	Dotoli ve ark., (2018)
	K6-Entegrasyon ve Bağlantı	K6.1-ERP Yazılımının Entegrasyonu	Godbole, M. V. (2023) Keskinçilic ve İpkin, (2023)
		K6.2-Elektronik Ticaret Uygulamaları	Ayyıldız ve Demir, (2022) Wang ve Sao, (2024)
		K6.3-Dijital Teknolojilerin Entegrasyonu	Angreani ve ark., (2020) Ayyıldız ve Demir, (2022) Büyüközkan ve ark., (2020)

Çizelge 6.2. Kriter Açıklamaları

Alt Kriterler	Kriter açıklamaları
K1.1-Gelişmiş Robotik (Otonom ve İşbirlikçi Robotlar)	Gömülü bilişim sistemleri ve yapay zekâ tekniklerini kullanarak karar verebilen, veri toplayan ve diğer akıllı nesnelerle iletişim kurabilen makineler.
K1.2-Siber Fiziksel Sistemler	Siber-Fiziksel Sistemler (SFS), sensörler ve aktüatörler aracılığıyla fiziksel işlemleri sanal bilgi işlem dünyasına bağlayan yapılardır.
K1.3-Dijital İkiz ve Artırılmış Gerçeklik	Dijital ikiz, fiziksel nesnenin sanal modeli; artırılmış gerçeklik ise gerçek dünya ortamının bilgisayar grafikleriyle zenginleştirilmesi.
K1.4-Eklemeli İmalat teknolojisi	Malzemelerin katmanlar halinde üst üste biriktirilmesiyle nesnelerin oluşturulması yöntemidir. Özel parçaların hızlı bir şekilde üretilmesine imkân sunar.
K2.1-Endüstriyel Nesnelerin İnterneti	Endüstriyel operasyonlardan veri toplamak, izlemek ve analiz etmek için birlikte çalışan cihazlar, sensörler, uygulamalar ve ağ ekipmanlarından oluşan bir ekosistemdir.
K2.2-Endüstriyel Veri Güvenliği	Fabrika otomasyon sistemlerini, özellikle hassas üretim süreçlerini zararlı dış etkilere korumak için bilgi teknolojisi güvenliğini sağlarken bilgiye erişim sağlanmasıdır.
K2.3-Büyük Veri ve Analitik	Firmadaki verilerin en sade ve işlenebilir hale getirilip stratejiler geliştirmek için kullanılması ve büyük veri analiz etme yeteneğinin devamlı olarak geliştirilmesidir.
K2.4-Bulut Bilişim ve Uç Bilişim (Edge Computing)	İnternet servisi sağlayıcısının minimum çaba kullanıma sunulabilen, yapılandırılabilir bilgi işlem kaynaklarının (sunucular, ağlar, hizmetler, depolama ve uygulamalar) ortak bir havuzuna istenildiği zaman ağ erişimini sağlayan model olarak tanımlanır.
K2.5-Kurumsal Kaynak Planlaması (ERP) Yazılımı	Bir işletmenin tüm birimlerindeki her bir verinin, birleştirilmesi ve entegre edilmesi en önemli gereksinimdir. ERP sistemleri bu entegrasyonu sağlamak adına, işletmenin çeşitli iş süreçlerini ele alan birçok yazılım modülünü tek bir veri tabanı altında birleştirip çalıştırmaktadır.
K2.6-Blokzinciri Teknolojisi	Blockzincir teknolojisi, bir iş ağı içerisinde şeffaf bilgi paylaşımına olanak sağlayan gelişmiş bir veritabanı mekanizmasıdır. Bir blockzincir halinde birbirine bağlı bloklar halinde saklar.
K3.1-Dijital beceriler ve yetkinlik geliştirme	İşletmelerin Endüstri 4.0'ı benimsemek için çalışanların dijital becerilerine ve niteliklerine uyum sağlamasıdır.
K3.2-İnsan-robot iş birliği	İşçilerin ve makinelerin ortak bir çalışma alanını paylaşmasına, birbirlerinin hareketlerinden haberdar olması ve ara yüzler aracılığıyla iletişim kurmasını sağlayan çözümler bulunmasıdır.
K3.3-Yatırım ve kaynak tahsisi	Dijital dönüşüm yolculuğunda, yeni teknolojiler ve insan kaynağının eğitimi için yapılacak olan finansal yatırımlardır.
K3.4-Dijital dönüşüm stratejisi	Dijital dönüşüm yol haritasının netliğinin, kapsamlılığının ve genel iş hedefleriyle uyumunun değerlendirilmesi.
K3.5-Liderlik Desteği ve vizyonu	Liderliğin dijital dönüşüm konusundaki kararlılığının ve sürece aktif katılımının sağlanmasıdır.
K4.1-Süreç Otomasyonu Kontrolü	Üretim görevlerindeki otomasyon seviyesinin ve gerçek zamanlı izleme ve ayarlamalar için kontrol sistemlerinin kullanımının analiz edilmesi.
K4.2-Ürün ve Üretim İzlenebilirliği	Bir ürünün nerede ve ne zaman, kim tarafından üretildiğini” belirlemek için hammaddenin tedarik edilmesinden üretim safhasına, satışına, tüketimine ve imha edilmesine kadar uzanan tüm süreçlerin takibinin yapılmasıdır
K4.3-Kestirimci Bakım ve Arıza Tespiti	Amaçlanan operasyonlardan beklenmeyen sapmaları önlemek için arıza tespiti ve arıza tahmini ve teşhis algoritmalarının varlığı olarak tanımlanmaktadır
K4.4-Esneklik ve Yeniden Yapılandırılabilirlik	Esneklik, akıllı fabrikaların modülleri değiştirerek veya genişleterek ihtiyaçlara göre uyarlanmasını sağlamaktır. Yeniden yapılandırılabilir üretim sistemleri kısaca; modülerlik, bütünlük, isteğe göre uyarlama, olarak tanımlanabilmektedir.
K5.1-Dijital Tasarım ve Prototipleme	Ürün tasarımının dijital ve bağlantılı ortamlarda gerçekleştirilmesi ve ürün prototiplerinin ürün dijital olarak veya üç boyutlu yazıcılar ile hazırlanmasıdır.
K5.2-Üretim Yürütme Sistemleri (MES) Kullanımı	MES, operatörler için veri yönetimi yetenekleri ve ortak kullanıcı arayüzü sağlar. Bu sistem, kaliteyi, maliyeti ve teslim süresini izlemek için bileşen parçalarının ve montaj faaliyetlerinin doğru izlenebilirliğine ihtiyaç duyan kuruluşlar için faydalıdır.
K5.3-Envanter Optimizasyon Uygulamaları	Talebi karşılamak, lojistik maliyetlerini düşük tutmak ve stok yokluğu, fazla stok ve karşılanmayan siparişler gibi yaygın envanter sorunlarından engelleyerek doğru miktarda envanteri elde tutmak için kullanılan optimizasyon uygulamalarıdır.
K5.4-Enerji Tüketiminin İzlenmesi ve Optimizasyonu	Enerji tüketimini ölçmek için sensörler, enerji ve hammadde açısından kaynakların optimum kullanımının hesaplanmasıdır.
K6.1-ERP Yazılımının Entegrasyonu	İşletmelerin veri ve iş süreçlerinin koordinasyonunu ve iş birliğinin sağlanmasıdır.
K6.2-Elektronik Ticaret Uygulamaları	Elektronik ticaret kavramı, teknolojik gelişmelerle birlikte satış, satın alma, ödeme, dağıtım gibi tüm ticari faaliyetlerin internet üzerinden yapılmasıdır.
K6.3-Dijital Teknolojilerin Entegrasyonu	İşletmenin tüm operasyonlarını entegre etmeye yönelik çözümlerin sunulmasıdır.

Endüstri 4.0 üretim süreçlerindeki hedefine, üretimi tam otomatik hale getirmesiyle ulaşacaktır. Bu otomatikleşmeyi gerçekleştirmek için öncelikle müşteri ve tedarikçilerden alınan verilerin analiz edilerek robotların iş süreçlerine dâhil edilmesi planlanmaktadır. Üretim bandından geçmekte olan ürün ve malzemelerin sensörler ile tanımlanıp hangi işleme tabi tutulacakları kullanılan algoritmalar sayesinde bilinmektedir. Bu teknoloji hata oranını sıfıra indirmeye yarayacaktır. Sonrasında ise birbiri ile iletişim kurabilen diğer otonom sistemler tarafından kalite kontrolü yapılarak meydana gelecek hatalar da bu aşamada tespit edilebilmektedir. Tüm bu süreçler birbirleri ile haberleşebilen, iş bölümü ve analiz yapabilen otonom robotlar ile operasyonlarda meydana gelebilecek insan kaynaklı hataların en aza indirilmesini sağlayacaktır (Kumru, 2022).

Robotik teknolojisi, dijital dönüşümün en önemli itici gücüdür. Üretim sistemlerinin elemanları özerk ve kendi kendine hareket edebildikçe, üretim verimliliği ve çalışan üretkenliği büyük ölçüde artmaktadır. Endüstriyel otomasyon, akıllı depo ve dağıtım sistemlerinin doğmasını sağlamıştır. Ürünler veya mallar herhangi bir operatöre ihtiyaç duymadan otomatik olarak alınır, tanımlanır, sınıflandırılır, organize edilir ve sevkiyata hazırlanır. Bu sistemler, tüm operasyonları (tedarikçilerden son müşteriye kadar) minimum maliyet ve hatayla otomatikleştirirken, müşteri duyarlılığını ve hizmet kalitesini artırarak şirketlere güçlü bir pazar konumu sağlamaktadır (Paksoy ve ark, 2020).

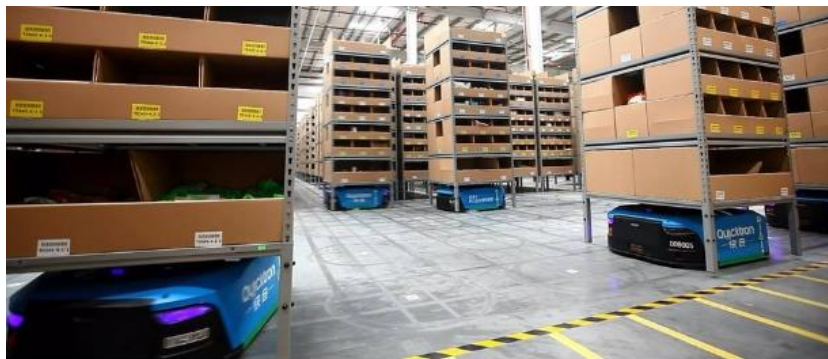
Otonom robot; içerdiği gömülü bilişim sistemleri ile yapay zekâ tekniklerini uygulayabilen, karar seçenekleri sunabilen, bunları eyleme dönüştürebilen, ortamdan veri toplayan, diğer akıllı ve bağlantılı nesnelerle iletişim kurabilen makineler olarak tanımlanır (Banger, 2016). Otonom Robotlar insan faktörü olmadan görev yapabilen robotlardır. Bu robotlar, sanayide üretimden, lojistik süreçlerine kadar birçok birimde kullanılır. İşletmeler, otonom robotları süreçlerinde kullanarak verimliliği artırabilir ve tekrarlayan görevleri otomatik hale getirebilir. Otonom robotlar, günümüzde daha çok endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır. Otonom robot teknolojisi, robotik ve mekatronik olarak adlandırılabilir. Otonom robotlar yaygın olarak otomotiv üretiminde kullanılmaktadır. Örneğin bir otomotiv fabrikasında, üretim hattında otonom robotların kullanılması montaj işlerini otomatik hale getirebilir ve çalışanlara güvenli ortam sunabilir (Aksoy,2024). İşletmelerde belirli görevleri yerine getirmek için farklı yapıda robotlar kullanılmaktadır. Bunlardan en çok bilinenleri endüstriyel robotlar ve lojistik robotlardır.

Endüstriyel Robotlar: Endüstriyel alanda kullanılan, sabit veya hareket edebilen, üç veya daha fazla programlanabilir şekilde olup otomatik kontrollü, yeniden programlanabilir, çok amaçlı robotlardır. Üretimde birçok aşamada kullanılan programlanmış yapılardır. Özellikle otomotiv, metal, petrol gibi pek çok sektörde sıkça kullanılmaktadır. Örnek bir endüstriyel robot sistemi Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Endüstriyel Robot Sistemi

Lojistik Robotlar: Lojistik robotları, tedarik zincirinin aşamalarında malların depolanması ve taşınması süreçlerini otomatik hale getirir. Genellikle depolarda ve depolama tesislerinde, lojistik sürecini organize etmek için kullanılırlar, ancak diğer ortamlarda da kullanılabilirler. Karanlık fabrikalarda, ışığın yeterli olmadığı ortamlarda da insan gücü yerine taşıma işleri bu robotlar aracılığıyla yapılmaktadır. Örnek bir lojistik robot örneği Şekil 6.2’de gösterilmiştir.



Şekil 6.2. Lojistik Robot Örneği

Siber-Fiziksel Sistemler (K1.2): (SFS), sensörler ve aktüatörler aracılığıyla fiziksel işlemleri sanal bilgi işlem dünyasına bağlayan yapılardır. Siber-fiziksel sistem kavramı ilk olarak 2006 yılında ABD’de fiziksel dünya ile sanal ortamların ilişkisini

vurgulamak amacıyla Lee tarafından ortaya atılmıştır. SFS, üretim süreçlerindeki izleme, koordinasyon ve kontrol gibi temel unsurların, bir teknoloji tarafından yönetildiği sistemlerdir. SFS, fiziksel makineleri ve ekipmanları siber teknolojiler ile entegre ederek daha akıllı hale getirmektedir (Dökme, 2020).

Siber-fiziksel sistemler, sanal ve fiziksel ortamları birleştirerek, akıllı nesnelerin birbirleriyle iletişime geçtikleri, ağa bağlı bir yapı yaratan teknolojileri etkin hale getirmektedir. Siber-fiziksel sistemler ve gelişmiş sensör ağları, mevcut gömülü sistemlerin bir sonraki adımıdır ve internet, çevrimiçi sunulan veri ve hizmetler ile birlikte gömülü sistemler (sensörler), SFS'yi oluşturan temel bileşenler olmaktadır (Soylu, 2018).

Dijital İkiz ve Artırılmış Gerçeklik (AR) (K1.3): Dijital ikiz, bir ürünün (gerçek cihaz, nesne, makine, varlık) veya ürün hizmet sisteminin dijital temsilidir. Genel olarak Dijital ikiz "fiziksel nesnelerin yaşam döngüsü boyunca anlaşılabilen, öğrenilebilen ve gerçek zamanlı verilerle gerekçelendirilebilen sanal temsilleri" veya "sahadan veri alan ve fiziksel süreçlerin çalışmasını tetikleyen bir simülasyon modeli" olarak tanımlanır. Fiziksel nesnenin durumundaki herhangi bir değişiklik, sanal modelin durumunda da bir değişikliğe neden olur ve bunun tersi de geçerlidir. Dijital ikiz teknolojisinin öncü bir uygulaması, NASA mühendislerinin tarafından kullanılmıştır ve NASA hala yeni nesil araçlar ve uçaklar geliştirmek için kullanmaktadır (Attaran ve ark., 2024).

Artırılmış Gerçeklik (AG), kullanıcının fiziksel ortamının, kullanıcının görüş alanındaki metin mesajları, resimler, 3 boyutlu sanal nesneler, videolar vb. gibi ek dijital içerikleri tablet, bilgisayar, akıllı telefon, sanal gerçeklik gözlükleri sayesinde bulunduğumuz ortamın üzerine yerleştirilerek gerçek zamanlı bir algı oluşturulmasıdır. Bazı durumlarda bu algı dokunma, duyma ve koklama yoluyla da yaşanabilmektedir. AG uygulamaları hâlihazırda eğitim, turizm ve tıp gibi çeşitli sosyal ve ticari sektörlerde de kullanılmaktadır. Bu teknoloji, planlama, tasarım, ergonomi değerlendirmesi, bakım, yönetim ve eğitim dâhil olmak üzere ürün yaşam döngüsü zorluklarının giderilmesine yardımcı olmak için birçok endüstriyel ortamda hâlihazırda kullanılmaktadır. Ayrıca AG teknolojisinin uygulanması, esnekliğin ve üretkenliğin artmasına önemli ölçüde katkıda bulunarak hataların tekrarını önlemektedir. Tipik bir AG uygulaması üç katmandan oluşur. Alt katman gerçek ve maddi dünyayı temsil eder. Orta katmanda gerçek dünyaya alakalı ve faydalı dijital bilgiler eklenir. Bu iki katmanın

birleştirilmesi, kullanıcılara dijital içeriğe erişim hakkı verilen üçüncü bir artırılmış dünya yaratır. AG uygulamaları, gerçek ve sanal nesneleri birleştirir ve kullanıcılar ile artırılmış dünya arasında gerçek zamanlı etkileşimi ve sanal ve gerçek nesnelerin geometrik hizalanmasını sağlar (Relji’c ve ark.,2021).

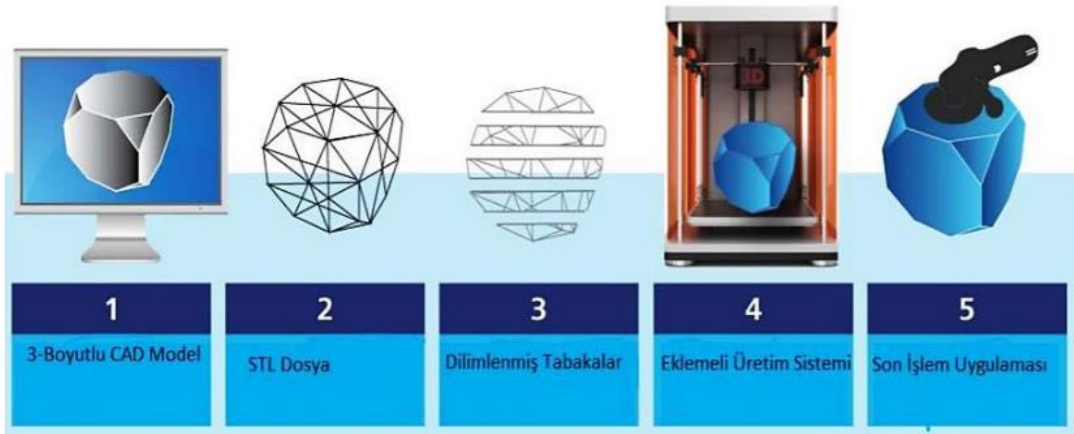
Günümüzde pek çok şirket AG’i ürünleriyle ilgili yeni hizmetler sağlamak için önemli bir araç olarak görmektedir. Hata oranını azaltarak önemli bir verimlilik avantajı sunabilmekte veya montaj hataları gibi bakım görevlerinde uzmanlarla iletişim kurmayı kolaylaştırmaktadır. AG, eğitim amaçlı olarak veya operatörler için canlı rehberlik sistemi olarak montaj operasyonları için kullanılabilir. AG’in kullanılabileceği bir diğer alan ise lojistikte genel depo operasyonlarıdır. Öne çıkan diğer uygulama alanları arasında kalite güvencesi ve bakım yer almaktadır. Operatörler (gerçek zamanlı) bilgilere güvenir hale gelir gelmez, AG bu bilgileri sahada sezgisel olarak görüntülemek için kullanılabilir. Bir AG sisteminin temel bileşenleri görselleştirme teknolojisi, sensör sistemi, izleme sistemi, işlem birimi ve kullanıcı ara yüzüdür (Wang ve ark., 2016). Montaj işlemleri gibi sabit uygulamalar için statik ekranlar veya projektörler kullanılır. Statik ekranlar, örneğin; montajın mevcut durumu için etkileşimli standart işletim prosedürleri ve bir sonraki montaj adımını canlandırır. Operatörlerin eller serbest olarak hareket etmelerine ve bilgilere erişmelerine ve okumalarına olanak tanıyarak operasyonları hızlandırmaktadırlar (Masood ve Egger,2020).

Eklemeli İmalat Teknolojisi (K1.4): Eklemeli üretim, günümüzde gelişen bir alandır ve üç boyutlu CAD modelleme ile çok çeşitli basit ve karmaşık yapıların üretilmesine yardımcı olur. Eklemeli üretim teknolojisi, malzemelerin katmanlarının üst üste birleştirilmesiyle gerçekleşen bir imalat işlemidir. Bu teknoloji, 1986 yılında Charles Hull tarafından stereolitografi (SLA) biçiminde geliştirilmiş ve şimdilerde araştırmacılar tarafından kullanım için çok sayıda en yeni teknik ve malzeme geliştirmek üzere takip edilmektedir. Eklemeli imalat, sadece prototiplerle sınırlı kalmayıp, uygun maliyetli ürünler, güçlü ve hafif parçalar, esnek tasarımlar, malzeme israfının en aza indirilmesi, erişim kolaylığı, hızlı tasarım ve üretim ve daha birçok avantaj sunması nedeniyle küçük ölçekli bir imalat olarak da kullanılmaktadır. Günümüzde katmanlı üretim teknolojisi, havacılık, savunma, tıp bilimi, elektronik, inşaat mühendisliği, otomotiv endüstrileri, deniz mühendisliği ve havacılık endüstrileri gibi çeşitli endüstriyel sektörlerde de geniş uygulama yelpazesi sunmaktadır. Malzeme alanında ilerlemeler meydana geldikçe 3D baskı için de geliştirilmiş çeşitli

malzemelerin imalatı da kolaylaşmıştır. Bunlar; metaller, polimerler, kompozitler, seramik, ahşap, toz, cam ve yapı malzemeleri, biyolojik olarak parçalanabilen malzemeler, akıllı malzemeler vb. olarak sayılabilmektedir. Bu malzemeler 3 boyutlu yazıcılar yardımıyla kolaylıkla basılabilmektedir ve her yöntem, belirli bir malzemenin basılması için belirli bir amaca yönelik olarak tasarlanmaktadır (Bhatia ve Sehgal, 2023).

Eklemeli üretim malzemeleri ve yöntemleri, her geçen gün yaşanan gelişmelerle birlikte 3D baskı teknolojisini geliştirmekte ve endüstriyel kullanım için daha iyi hale getirmektedir. Bu teknolojiye son gelişmeler, 3D yazıcıların maliyetini düşürmeye yardımcı olmakta ve onu özelleştirilmiş ürünleri bile basabilen, uygun fiyatlı bir teknoloji haline getirmektedir. Ürünün özelleştirilmesi, yüksek maliyeti nedeniyle üreticiler için zorlu bir iştir, ancak katmanlı üretim teknolojisi için küçük miktarlarda özelleştirilmiş ürünleri uygun fiyatlarla basmak kolaydır (Bhatia ve Sehgal, 2023).

Endüstri 4.0 kapsamında ileri teknolojilerinden biri olarak kabul edilen katmanlı imalat çok önemli bir rol oynamaktadır. Endüstride tam ilerleme için, siber-fiziksel entegrasyon ile yüksek verimliliğe sahip akıllı fabrikalarda kişiselleştirilmiş yüksek kaliteli ürünler üretebilmek için malzemelerin geliştirilmesi, tasarım ve yazılımla ilgili sorunların çözülmesi gerekmektedir (Perez ve ark., 2020). Eklemeli imalat yönteminin adımları Şekil 6.3’de gösterilmiştir.



Şekil 6.3. Eklemeli İmalat Yönteminin Adımları (Aslan, 2019)

6.1.2 Veri ve Yazılım Altyapısı

Endüstriyel nesnelerin İnterneti (K2.1): Endüstri 4.0'ı temsil eden endüstriyel nesnelerin interneti; akıllı cihazların, gelişmiş veri sistemlerin, fiziksel ve insan ağlarının birbirleriyle entegre edilmesidir. Nesnelerin İnterneti kavramı İngiliz girişimci Kevin Asthon tarafından ortaya atılmıştır. Bu kavram 1999 yılında gerçek dünyanın ve bilgisayarların sensörlerle iletişim kurduğu sistemi tanımlamak için kullanılmıştır (Yıldızbaşı, 2020).

Yakın geçmişte nesnelerin interneti endüstriyel cihaz ve ekipmanların bir ağa bağlanması şeklinde tanımlanmıştı. Ancak endüstriyel nesnelerin interneti, endüstriyel operasyonlardan veri toplamak, izlemek ve analiz etmek için birlikte çalışan cihazlar, sensörler, uygulamalar ve ağ ekipmanlarından oluşan bir ekosistemdir. Nesnelerin interneti günlük yaşam ve çalışma sahalarının her noktasında veri toplanmasına imkân sağlar ve akıllı telefon, tablet, taşınabilir bilgisayar gibi cihazlar nesnelerin internetinin uygulanmasında kullanılan bileşenlerdir (Köküner, 2018).

Nesnelerin İnterneti akıllı çağda, her alanda görülen dijitalleşme ile birlikte, mevcut iş süreçlerinde değişime neden olur. Üretim açısından baktığımızda ise, istenildiği zaman üretim ortamının izlenebilmesi tesislerin, dağıtım merkezlerinin, malların ve malzemelerin durumu ve akışı gözlemlenebilmektedir. Makinaların ve üretim ortamının gerçek zamanlı olarak izlenmesi, fabrikalarda mal akışının daha iyi kontrol edilebilmesini ve acil durumlarda harekete geçilerek ya da sorunların ortaya çıkabilmesi halinde önleyici faaliyetlerde bulunarak eksiklerin ve aksaklıkların giderilebilmesini sağlar (Kesbiç, 2020). Nesnelerin interneti teknolojisinin kullanımı işletmelerde önemli faydalar sağlamaktadır. Bunlar ise şu şekildedir;

- Makinelerin, süreçlerin ve birbirine bağlı sistemlerin durumunun daha iyi gözlemlenebilmesini sağlar.
- Makinelerin gelecekteki durumları ile ilgili doğru tahminler sunabilir.
- Makine koşullarını simüle ederek, mevcut durum analizini gerçekleştirebilir (Attaran, 2024).

Endüstriyel Veri Güvenliği (K2.2): Veri güvenliği; fabrika otomasyon sistemlerini, özellikle hassas üretim süreçlerini zararlı dış etkilerden korumak için bilgi teknolojilerinin güvenliğini sağlayarak bilgiye erişim sağlanmasıdır (Cheminod ve ark, 2013). Endüstri 4.0 teknolojisinin kullanımında veri güvenliği, koruma da dâhil olmak

üzere, internet platformlarının çevrimiçi işlemler yürütmek ve veri alışverişi yapmak için güvenli kabul edilmesi anlamına gelir (Chang, 2021). Dijital dönüşüm süreçleri büyük miktarda verinin toplanmasına, depolanmasına ve bu verilerin analizini sağlar. Bu verilerin yaşam döngüsü boyunca güvenliğini ve gizliliğini sağlamak önemlidir (Azambuja, 2024).

Endüstri 4.0, nesnelerin interneti gibi araçlar kullanılarak cihazlar arasında bağlantı kurmayı hedefler. Bağlantılı akıllı nesne sayısı arttıkça uygulamalarda veri güvenliği ile ilgili sorunlar ve alınması gereken önlemler öne çıkmaktadır. Gizli olan ticari sır niteliği taşıyan işletme verilerinin yerel ağlar ve internet üzerinde dolaşımında olması halen fabrikalar için bir risk faktörü oluşturmaktadır. Ancak bu riskleri azaltmak için alanda her geçen gün ilerleme kaydedilmektedir (Köküner, 2018).

Verilerin güvenliğini sağlamak amacıyla pek çok yaklaşım ortaya çıkmıştır ve bu hedefe ulaşmak için üç ihtiyacın yerine getirilmesi gerekmektedir. Bunlar; gizlilik, bütünlük ve kullanılabilirlik faktörleridir. Gizlilik, lisanssız bir kişinin kayıtlara erişmesini yasaklamak için koyulan kurallardır. “Bütünlük” terimi ise verilerin herhangi bir değişikliğe veya bozulmaya uğramadan korunmasını ifade etmektedir (Emad ve ark., 2017). Kullanılabilirlik, ise müşterinin bilgilere tutarlı ve zamanında erişmesini sağlamaktadır.

Veri güvenliğinin sağlanmasında tüm teknolojiler için geçerli bir uygulama bulunmasa da genel kabul gören bazı yöntemler bulunmaktadır. Bunlar aşağıdaki gibidir:

- Bilgilerin ve verilerin yetkisiz ve kötü niyetli şahısların eline geçmesini engelleyen gizlilik faktörüdür.
- Verilerin bozulmasını, silinmesini veya değiştirilmesini engelleyen ve verinin doğruluğunu sağlayan veri bütünlüğü faktörüdür.
- Kullanılan veri sisteminin, eksiksiz ve tutarlı bir biçimde çalışmasını hedefleyen güvenilirlik kriteridir (Yürük, 2023).

Büyük Veri ve Analitik (K2.3): Firmadaki verilerin en sade ve işlenebilir hale getirilip doğru kararlar almak ve stratejiler geliştirmek için kullanılması ve büyük miktarda veriyi (büyük veri) analiz etme yeteneğinin devamlı olarak geliştirilmesidir. Büyük veri kavramının literatüre girmesi ilk olarak 1990’lı yıllarda John Mashey tarafından olmuştur. Büyük Veri, “geleneksel yöntemler veya yazılımlar kullanılarak kısa süre içinde yönetilemeyecek kadar büyük, hızlı ve karmaşık veriler” olarak

tanımlanmaktadır (Sahut ve ark., 2022). En geniş tanımıyla büyük veri; geleneksel veri tabanı yöntemleri ve veri tabanı araçlarıyla verimli bir şekilde analiz edilemeyen veri hacmi demektir (Kaisler ve ark., 2013). Büyük veri hem yönetilen veri türünü hem de veriyi depolayıp analiz etmek için kullanılan teknolojileri anlatır. Geleneksel veriden farkı ise büyük veri daha fazla analiz ve işlem gerektirmektedir.

Büyük veri analizi ise geniş ve farklı türdeki verileri işlemek ve analiz etmek için kullanılan tekniklerin bütünüdür. Büyük veri analizinde, geleneksel veri analiz teknikleriyle analiz edilemeyen verilerin analizi gerçekleştirilebilmektedir. İşletmelerin büyük veri analizini verimliliği yükseltecek şekilde uygulaması gerekmektedir. Büyük veri analizinin işletmelere büyük yararlar sağlamaktadır. Bunlardan bazıları aşağıdaki gibidir (Uladi ve Arı, 2019):

- Fabrikada operasyonların ve üretimin iyileştirilmesi,
- Makinelerin arıza sürelerinin kısaltılması,
- Ürün kalitesinin iyileştirilmesi,
- Tedarik zincirinde verimliliğinin artırılması,

Özetle büyük veri, işletmenin dijitalleşme stratejileri için önemli bir etken olarak görülmektedir. Bu nedenle de büyük veri analitiği, yenilikçi ve dijital çözümlerin geliştirilmesine ve kurumsal performansın iyileştirilmesine yardımcı olmaktadır (Nguyen, 2024).

Bulut Bilişim ve Uç Bilişim (K2.4): Bulut Bilişim, kullanıcıların istediği zaman erişebileceği ve başka kullanıcılar ile bilgisayar kaynaklarını paylaşabileceği, internet tabanlı hizmetleri olarak tanımlanır. Ayrıca bulut bilişim, internet servis sağlayıcısının minimum çaba ile kolaylıkla kullanıma sunulabilen, yapılandırılabilir bilgi işlem kaynaklarının (sunucular, ağlar, hizmetler, depolama ve uygulamalar) ortak bir havuzuna istenildiği zaman ağ erişimini sağlayan model olarak tanımlanır. Bulut bilişimin temel amacı, kaynakları birden fazla bilgisayara dağıtmaktır (Kamran, 2023). Günümüzde bulut teknolojileri eğitim ve iş alanlarında araştırmacılar ve sanayiciler arasında gelişen teknolojilerden biri olmuştur. Bulut kaynakları, ihtiyaçlara göre isteğe birden fazla kullanıcıya dinamik olarak tahsis edilmektedir. Bu yaklaşım sayesinde uygulama maliyetleri azalmakta ve böylece bilgi işlem hizmetlerinin kullanımını maksimuma çıkarmaktadır. Bulut teknolojileri büyük depolama kapasitesine sahiptir ve

herhangi bir altyapı yatırımı gerektirmeden çok daha fazla veriyi saklamakta ve işlemektedir (Singla ve ark., 2018).

Bulut bilişim sistemleri otomotiv, sağlık, sigortacılık gibi birçok farklı sektördeki işletmelere özelleştirilmiş, esnek ve uygun maliyetli iş yapma olanağı sunmaktadır. Veri erişilebilirliği, veri güvenliği, verimli yedekleme gibi özellikleriyle daha fazla şirket bulut bilişime bağımlı hale gelmiştir. Bulut bilişim, Endüstri 4.0'ın itici güçlerinden biridir ve 4. Sanayi Devrimi'nin uygulanması ve ilerleyişi açısından büyük öneme sahiptir (Paksoy ve Deveci, 2023).

Bulut bilişim sağladığı servis modeline göre 3'e ayrılmaktadır. Bunlar; altyapı olarak servis (IaaS), platform olarak servis (PaaS) ve yazılım olarak servistir (SaaS). Bulut bilişim ayrıca genel (public), topluluk (community), özel (private) ve melez (hybrid) olmak üzere 4 farklı uygulama modelinden oluşmaktadır. Bulut bilişimin avantajları ele alındığında çok sayıda madde bulunmaktadır. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Bilgi teknolojilerine istenildiği yer ve zamanda hızlı bir şekilde erişim sağlamaktadır.
- Bulut bilişim teknolojileri son derece güvenli veri merkezi sunucularında çalışır.
- Bulut teknoloji servisleri kullanıldığı sürece ödeme yapıldığı için daha ekonomiktir.

Uç bilişim, gecikmeleri ve bant genişliği kullanımını azaltmak için bilişimi veri kaynağına mümkün olduğunca yakınlaştırmaya odaklanan bir ağ mantığıdır. Basit bir ifadeyle uç bilişim, bulutta daha az işlem çalıştırmak ve bu süreçleri kullanıcının bilgisayarı, IoT cihazı veya uç sunucusu gibi yerel yerlere taşımak anlamına gelmektedir.

Kurumsal Kaynak Planlama (ERP) Yazılımı Kullanımı (K2.5): Dijital dönüşümde ivmelenme, bilgisayarların yaygınlaşmasıyla beraber, süreçlerin de otomatikleştirilmesi ve elektronik ortamda yürütülmesi ayrıca ağ üzerinden veri paylaşımında bulunabilmesi ile başlamıştır. Dünyada teknolojinin gelişimiyle birlikte tam otomatik süreçler ve web tabanlı çözümler, işletmeleri de dönüştürerek dijital dönüşümün ne kadar önemli olduğunu vurgulamıştır. Bu sebeple de işletmelerin karmaşık iş süreçleri otomatik hale getirmesine ve entegre etmesine olanak sağlayan ERP sistemlerinin kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Tüm bu gelişmeler ışığında, günümüzde DD sürecindeki işletmelerin var olabilmesi için ERP sistemleri hayati önem

taşımaktadır. İşletmenin ihtiyaçları doğrultusunda etkili bir Erp yazılımının kullanılması dijital dönüşüm yolculuğunda önemli faktörlerden biridir (Keskinkılıç ve İpkin, 2023).

ERP (Enterprise Resource Planning) yani kurumsal kaynak planlama; muhasebe, finans, satın alma ve üretim gibi günlük iş faaliyetlerini takip etmek ve yönetmek için kullanılan sistemler ve yazılımlardır. Kurumsal kaynak planlama işletmenin verilerinin ortak bir veri tabanında belirli bir düzenle tutulmasını sağlayarak verilerin doğru bir şekilde kullanılmasına ve analiz edilmesine imkân tanır. Endüstri 4.0 ile birlikte akıllı sanayide akıllı fabrikalara doğru bir dönüşüm söz konusudur. Birbiri ile iletişim kuran nesneler, makineler sistemler ile entegre olarak çalışan bir sistemde ERP merkezde konumlanarak sistemin omurgasını oluşturacaktır (Köküner, 2018).

ERP sistemlerinin uygulanmasıyla verilerin işlenmesi ve analitik gücü sayesinde güncel ve gerçek zamanlı bilgilerin kullanılabilmesi şirketlerin operasyonlarını standartlaştırmasına, merkezi yönetimi kolaylaştırmasına olanak sağlar. Üretimin planlanması ve kontrolü, ERP'nin en çok kullanıldığı birimlerden biridir ve daha iyi üretim izlenebilirliği, envanter yönetimi ve kaynakların verimli kullanımını sağlar. Bu gibi avantajlar, müşterilerle daha iyi hizmet sunulmasına, teslimatlarda gecikme olmadan daha kaliteli ürün üretilmesine ve sonuç olarak da memnuniyetin artmasına olanak tanır (Gessa ve ark., 2023).

ERP sistemlerine yakından bakıldığında, en önemli gereksinimin işletmede tüm birimlerindeki her bir verinin, birleştirilmesi ve entegre edilmesi görülmektedir. ERP sistemleri bunu gerçekleştirebilmek için, işletmenin çeşitli iş süreçlerini içeren birçok yazılım modülünü tek bir veri tabanı altında birleştirip çalıştırmaktadır. Tek bir ERP veri tabanı, üretim planlama, tedarik zinciri yönetimi, finans yönetimi, insan kaynakları yönetimi gibi alanların da dahil olduğu farklı yazılım modüllerini kapsamaktadır (Özköse ve Odabaş, 2021).

Blokszincir Teknolojisi (K2.6): Blokszincir işlem bilgilerini kaydederek, kriptografiyle güvence altına alınan ve bir fikir birliği mekanizması tarafından yönetilen, klasik finansal defterleri aşan sıralı bir veri tabanı veya dev bir elektronik tablo olarak tanımlanmaktadır (Hinings ve ark.,2018). Blokszincir günümüzde çeşitli nedenlerden dolayı önerilen bir modeldir. Örneğin, çok sayıda işlem yapan tarafın bulunduğu bir piyasada, farklı defterlerin mutabakatı ihtiyacını ortadan kaldırabilir. Defterdeki herhangi bir katılımcı, daha fazla şeffaflığa ve blokszinciri kendi kendini denetlemesine olanak tanıyarak önceki tüm işlemleri izleyebilir. Özetle, blokszinciri,

varlıkların mülkiyetini aktarmak ve doğru finansal bilgilerin yer aldığı bir defteri tutmak için kullanılan bir muhasebe teknolojisi olarak ifade edilebilir (Han ve ark.,2023).

Blockzincir umut verici ve devrim niteliğinde bir teknolojidir çünkü güvenlik risklerini azaltmaya, dolandırıcılığı ortadan kaldırmaya ve şeffaflığı geliştirmeye yardımcı olur. Blokzincir teknolojisiyle gıda tedarik zincirleri için şeffaflık sağlayabilir, sağlık verilerinin güvenliğini sağlayabilir ve genel olarak verileri ve mülkiyeti ele alma şeklini değiştirebilir. Blokzincir platformlarında dijital bilgiler, üçüncü tarafların katılımı olmadan bir kişiden diğerine serbestçe hareket edebilir. Bilgisayarı olan herkes ağa katılabilir ve işlem doğrulama sürecine katılabilir. Birden fazla cihaz, birden fazla cihazda kod bloğu olarak depolanan işlemi onaylar. Sonraki her işlem, tarihsel bir kayıt tutmak için bir zincire (dolayısıyla blok zincirine) eklenir ve bilgisayar korsanlığı olasılığını neredeyse ortadan kaldırır. Üçüncü bir taraf olmadan veri alışverişinin bu güvenli yönteminden yararlanmak, blockzincir teknolojisini çok çekici kılmaktadır. Bu teknoloji finansal işlemlerin yanı sıra diğer işlemler için de kullanılabilir. Güvenli ve şeffaf yapısına rağmen teknoloji, tek bir uzmanlık alanının ötesinde de uygulanabilecek kadar çok yönlüdür. Lojistik, eğitim, enerji gibi çok çeşitli endüstriler blokzincir teknolojisini kullanmaktadır (Habib ve ark, 2022).

Blokzincir Teknolojisi, müşteri kredi geçmişinin hızlı bir şekilde onaylanması, hızlı stok durumu analizi, sipariş/sevkiyat durumu bildirimi ve sipariş gerçekleştirme süreci boyunca şeffaflık sunması gibi avantajlarıyla sipariş gerçekleştirme sürecini hızlandırabilmektedir. Son yıllarda artan siber suç tehditleri, tedarik zinciri ağları üzerinde yüksek risk oluşturmaktadır. Blokzincir; görünürlük, gizlilik ve kesintisiz bilgi doğrulama özellikleriyle tedarik zinciri ağlarında siber suç risklerini azaltan üstün bir teknolojidir (Paksoy ve ark., 2020).

Endüstri 4.0 uygulamaları için blokzincir teknolojisi işletmelerde farklı alanlarda ve operasyonlarda kullanılabilir. Bunlar; finans, bilgi ve güvenlik, dijital satın alma süreçleri, sistemlerin entegrasyonu, veri depolama gibi operasyonlardır (Javaid ve ark, 2021).

6.2 İnsan Faktörü ve Organizasyonel Faktörler

6.2.1 İşgücü Gelişimi ve Stratejik Bağlılık

Dijital beceriler ve yetkinlik geliştirme (K3.1): Yeni teknolojiler, dijitalleşme ve otomasyon insanların iş yapma, çalışma ve yaşama biçimini değiştirmektedir.

Endüstriyel ve dijital dönüşümde teknolojik gelişmelerin ekonomi, toplum ve yaşam kalitesi üzerindeki etkileri iş piyasası için önemli zorluklar içermektedir. Dijital ve robotik teknolojilerdeki sürekli ve katlanarak artan ilerleme, hâlihazırda insanlar tarafından gerçekleştirilen işlerde değişikliklere neden olmaktadır. Araştırmalar birçok görevin çarpıcı biçimde değişeceğini ve birçok çalışanın yeni becerilere olan ihtiyaca uyum sağlamak zorunda kalacağını öngörmektedir. Dijital teknolojiler, eski çalışma yöntemlerinin yerini alırken, önceden açıkça tanımlanmış faaliyetleri daha iş birliğine dayalı ve karmaşık görevlere dönüştürdü. Çalışanların değişen iş ve süreçlere uyum sağlayabilmeleri için yeni dijital çağda insan kaynaklarının etkin kullanımı için dijital becerilerin geliştirilmesi kritik öneme sahiptir. Organizasyonel beceriler teknik, metodolojik, sosyal ve kişisel olarak ayrılabilir (Goulart ve ark.,2022).

Dijitalleşme süreçlerinde talebi artan bazı meslekler göze çarpmaktadır. Bunlara, robotik mühendisleri, büyük veri analistleri, dijital dönüşüm uzmanları, yazılım ve uygulama geliştiricileri ve yapay zekâ uzmanları gibi meslekler örnek olarak verilebilir. Dijital dönüşüm süreçlerine adapte olabilmek için çalışanların bazı becerilere sahip olması gerekmektedir. Problem çözme, yaratıcı ve eleştirel düşünme, iletişim becerileri gibi tamamlayıcı becerilere ek olarak analitik beceriler gereklidir. Günümüzde ve ilerleyen zamanlarda da sadece bilim, teknoloji, mühendislik gibi becerileri olan insanlara değil ayrıca inovasyon zekasına sahip insanlara da ihtiyaç vardır. Bu beceriler arasında; yapay zekâ, insan bilgisayar etkileşimi, veri bilimi, bilgisayar ağı, sistem analizi değerlendirmesi, akıl yürütme, karmaşık problem çözme gibi beceriler sayılabilir (Budak, 2021).

İnsan-Robot İş birliği (K3.2): Uluslararası Robotik Federasyonu ve Uluslararası Standardizasyon Örgütü endüstride kullanılan robotları endüstriyel ve hizmet robotları olmak üzere 2 kategoriye ayırmıştır. Endüstriyel robot programlanabilen, otomatik kontrol edilen robotlar olarak tanımlanmakta hizmet robotu ise endüstride otomasyon uygulamaları haricindeki görevleri yerine getiren robotlar olarak tanımlanmaktadır. Endüstride yararlanılan hizmet robotlarına örnek olarak mobil robotlar, endüstriyel robotlara ise robot kollar örnek verilebilir (Örnek, 2023). Geleneksel endüstriyel robotlar, genellikle güvenli çalışma sahalarındaki ağır işleri yaparken, robotik alanındaki ilerlemeler ile yeni nesil robot teknolojilerinin uygulanması ile robotların ve insanların ortak çalışma ortamlarında hibrit imalat yapması artık uygulanabilir hale gelmiştir (Gelen ve Özcan, 2019). Bu sebeple de İnsan-

Robot Etkileşimi (HRI) kavramını ortaya çıkarmıştır. İnsan-robot etkileşimi kavramı kısaca işçilerin ve makinelerin (robotlar dâhil) ortak bir çalışma alanını paylaşmasına, birbirlerinin hareketlerinden haberdar olmasına ve ara yüzler aracılığıyla iletişim kurmasına imkân sağlayan çözümler bulunmasıdır. Endüstriyel robotların insanlar ile etkileşim ve iş birliği akademik çalışmalarda üç farklı şekilde tanımlanmaktadır. Bunlar; bir arada bulunma, ortaklaşma, İşbirliği'dir. Robotlar ve insanlar arasındaki iş birliği hem endüstriyel hem de evsel ortamlarda günden güne gelişen bir trend haline gelmiştir.

Endüstri 4.0'ın ortaya çıkmasıyla da beraber akıllı fabrikalarda bulunan bahsi geçen insan-robot etkileşimi kavramı temelinde yeni gelişmelerden biri de işbirlikçi robot (Collaborative Robot-Cobot) uygulamalarıdır. Cobot güvenlik sorunu yaşamadan herhangi bir fiziksel engel koymadan insanlarla aynı ortamda güvenli bir şekilde çalışması için tasarlanmış, özellikle işçilerin çalışma koşullarını iyileştirecek robotik teknoloji kullanılarak yapılan üretim, taşıma, vb. araçlarıdır (Kaya, 2023). ISO 10218-2'e göre ise bir cobot, "tanımlanmış bir iş birliği yapılan çalışma ortamında bir insanla doğrudan etkileşim kurmak için tasarlanmış bir robottur". Bu nedenle de işbirlikçi robotlar, normalde insan iş birliğini gerektiren görevlerin otomatikleştirilmesine yardımcı oldukları için küçük ve orta ölçekli işletmelerde önem kazanmıştır. Bu robotlar, gelişmiş çalışma alanına erişilebilirlik, görev yürütme, gelişmiş güvenlik ve ergonomi ve uyarlanabilirlik sağlar (Yang ve ark., 2023).

Yatırım ve Kaynak Tahsisi (K3.3): Dijital dönüşümün sağlanabilmesi için işletmelerin bilgi teknolojilerine ve insan kaynaklarına yatırım yapması gerekmektedir. Dijital dönüşüme yapılan yatırımlar şirketlerin performansını ve karlılığını artırmaktadır. Dijital dönüşümün yapılan yatırımlar ile somut kazanımlar elde edilmektedir. Bu faydalar arasında verimliliğin artması, maliyet kontrolü, çalışan memnuniyeti sayılabilir. Ancak bu kazanımların elde edilebilmesi için şirketlerde yöneticilerin ve firma sahiplerinin yatırımları desteklemesi ve öncülük etmesi gerekmektedir.

Dijital Dönüşüm Stratejisi (K3.4): Dijital dönüşüm stratejisi, dijital teknolojilerin entegrasyonunun neden olduğu dönüşümleri sürdürülebilir bir şekilde yönetmek için uygulanan tasarlanmış bir plan olarak tanımlanabilir. Dijital dönüşüm stratejisinin başarılı bir şekilde uygulanmasını sağlamak ve bunun avantajlarından yararlanmak için dört önemli faktörü sağlamak gerekir. Bu faktörler teknolojilerin

kullanımı, yapısal değişiklikler, değer yaratmadaki değişiklikler ve dijital dönüşümün finansal yönleri olarak sıralanır (Mitroulis ve Kitsios, 2019).

Bir dijital dönüşüm stratejisinin iyi bir şekilde tanımlanabilmesi bir üretim ortamında dijital uygulamaların başarısında önemli bir yer tutar. Strateji, geliştirme ve üretimden ileri kalite kontrol, teslimat ve analize kadar iş faaliyetinin her yönünü kapsamalıdır. Potansiyel zorlukları belirlemek için şirketin eski sistemlerinin durumu dikkate alınmalıdır. Yeni sistemin uygulanmasına başlamadan önce makinelerden mevcut ve geçmiş durumlarıyla mümkün olduğunca fazla veri toplanmalıdır (Albukhitan, 2020).

Liderlik Desteği ve Vizyonu (K3.5) Dijital liderlik, bir organizasyonun dijital varlıklarının hem organizasyon seviyesinde hem de bireysel seviyede iş hedeflerine ulaşmak için kullanılmasıdır. Son zamanlardaki dijital teknolojiler, birçok işletmede rekabet ve organizasyon ortamlarında ve rollerde önemli değişikliklere yol açmaktadır. Organizasyonun roller, çalışma kültürü, teknolojiler gibi pek çok boyutunda değişiklik yapılması gerekmektedir. Dönüşüm programları, belirsiz gelecek için yeni temeller oluştururken, kısa vadeli somut gereksinimleri karşılayacak değişiklikleri yönlendirmek üzere geliştirilmektedir. Dijital liderlerin bu tür zorlukları hafifletecek ve kuruluşların dönüşümde ilerlemesine yardımcı olacak bir dizi yeterliliğe sahip olması gerekmektedir. Bu nedenle, organizasyonu belirsiz, daha dinamik bir geleceğe etkili bir şekilde yönlendirmek için yeni bir beceri seti gerekli olduğundan liderler üzerinde büyük bir etki vardır. Örneğin, dijital geleceğin doğasındaki belirsizlik nedeniyle gelecekte kullanılabilecek veya kullanılamayacak olan yeni teknolojilerle çalışmaya ilham vermek, dijital liderler için büyük bir zorluktur. Bugün pek çok lider, güçlü bir dijital lider olmak için gerekli becerilere sahip değil, ancak bu kavramın iyi yanı, gerekli becerileri geliştirmeye başlamalarıdır (Kıyak ve Bozkurt, 2020).

Güçlü dijital liderler organizasyonda vizyon ve amaç sağlamalıdır. Bu, dijital liderlerden en çok beklenen becerilerden biridir. Dijital liderler, çalışanlara çalışırken rehberlik edecek açık hedefler sunmalıdır. Ancak vizyonun netliği tek başına yeterli değildir; güçlü liderler uygulama fırsatları sağlamalıdır. Net bir vizyon ve amaç sağlamak, derinlemesine teknik bilgi gerektirmez, ancak güçlü bir liderin, vizyonu geliştirmek için çevreyi yeterince anlayacak temel dijital okuryazarlığa sahip olması gerekir (Kıyak ve Bozkurt, 2020).

6.3 Operasyonel Verimlilik ve Entegrasyon

6.3.1 Üretim Süreci Otomasyonu

Süreç Otomasyonu ve Kontrolü (K 4.1): Endüstriyel otomasyon, geleneksel olarak insanlar tarafından gerçekleştirilen görevlerin yerine getirilmesi için robotların, makinelerin ve kontrol sistemlerinin kullanılmasıdır. Otomasyon, üretim ve diğer endüstriyel uygulamalarda üretkenliği, kaliteyi ve güvenliğini artırabilir. Otomasyon teknolojisi, robotlar, sayısal kontrol (NC) takım tezgâhları, programlanabilir mantık kontrolörleri (PLC'ler), bilgisayar sayısal kontrol (CNC) sistemleri ve endüstriyel sensörler gibi çok çeşitli araç ve teknolojileri içerir. Otomasyon sistemleri mevcut üretim hatlarına entegre edilebilir veya tek başına kullanılabilir ve ekipmanın önleyici bakımı için veri toplamak amacıyla kullanılabilir (Anonim, 2023).

Endüstriyel otomasyon, geleneksel manuel emeğe göre çok sayıda avantaj sunar. Otomatik tesisler, insan işçilere göre daha hızlı ve daha doğru çalışabilir, yorulmadan günün her saati çalışabilir ve ekipmanların sağlık durumunu izlemek ve israfı azaltmak için veri toplayabilir. Otomasyon aynı zamanda tehlikeli ortamlarda güvenliğin artırılmasına da yardımcı olabilir. Son yıllarda endüstriyel otomasyon, otomotiv imalatı, yiyecek ve içecek işleme, ilaç ve elektronik montajı da dahil olmak üzere birçok endüstri tarafından benimsenmiştir. Şirketler verimliliği ve rekabet gücünü artırmanın yollarını ararken bu eğilimin devam etmesi bekleniyor. Endüstriyel otomasyon, üretim hatlarını güvenli hale getirebilir ve makineleri ve diğer endüstriyel ekipman teknolojilerini çalıştırmak için mantık tabanlı programlar kullanabilir. Makine, işinizin verimliliğini ortaya çıkarmak için programlamayı temel alarak herhangi bir insan müdahalesi olmadan kararlar alır (Anonim, 2023)

Ürün ve üretim izlenebilirliği (K4.2): Üretim ortamlarında izlenebilirlik, “bir ürünün nerede ve ne zaman, kim tarafından üretildiğini” belirlemek için hammaddenin tedarik edilmesinden üretim safhasına, satışına, tüketimine ve imha edilmesine kadar uzanan tüm süreçlerin takibinin yapılmasıdır. Son yıllarda tüketicilerin ürün kalitesinin ve güvenilirliğinin daha önemli hale gelmesiyle beraber izlenebilirliğin de önemi artmıştır, başta gıda sektörü olmak üzere otomotiv, elektronik, ilaç gibi geniş bir sektöre yayılmıştır.

Üretimde izlenebilirlik, bir ürünün üretiminden başlanarak paketleme, depolama, sevkiyat ve satışına kadar geldiği aşamalarla ilgili bilgilere ulaşılması ve kayıt altına

alınmasını sağlayan bir işlemdir. Bu sistem etkin ve sürdürülebilir bir üretimi mümkün kılmaktadır. İzlenebilirlik sayesinde verimlilik, doğruluk, görünürlük ve güvenliğin yanı sıra üretim süreçlerinin her aşaması üretici, tedarikçi, dağıtıcı ve diğer paydaşlar tarafından izlenebilir ve paylaşılabilir. Ayrıca, izlenebilirlik sayesinde ürünün sevkiyat tarihine, depodan çıkışına, son kontrolüne, kullanılan makineye, makineyi kullanan operatöre, ara kontrollere ve hammaddelerin sağlandığı tedarikçiye kadar birçok veri incelenebilmekte ve takip edilmektedir. Bu sistemle, olası hatalı işlemler ve ürünler kolayca tespit edilebilir ve hızlı aksiyon alınarak çözülebilir veya gelecekteki sorunlar için önlemler alınabilir. Özetle, izlenebilirlik yönetim kolaylığı açısından bir ürün veya hizmetin geriye doğru takip edilebilir olması şeklinde ifade edilen bir kavramdır ve ürünün üretiminden satışına kadar geçen süreçte çalışanlar, yöneticiler, firma sahipleri ve de en önemlisi tüketiciler için çok önemlidir. (Anonim, 2024)

İzlenebilirlik, nesnelerin interneti (IoT) uygulamalarının önem kazanmasıyla beraber, tedarik zinciri yönetimini etkileyen teknolojiler arasında yer almaya başlamıştır. Nesnelerin interneti (IoT), radyo frekans ile tanımlama (RFID) etiketleri, sensörler, barkodlar, GPS gibi teknolojiler, ürünlerin tedarik zinciri içerisinde her adımda izlenmesine imkân tanımaktadır (Koç, 2020). Üretim ve hizmet süreçlerinde kullanılan dijital izlenebilirlik sistemleri RFID, RTLS ve Beacon olmak üzere 3 grupta incelenebilir (Anonim, 2024).

RFID (Radio Frequency Identification) teknolojisi: Türkçesi radyo frekansı belirleme sistemi olan RFID için RFID kartları, RFID okuyucu ve RFID sistem yazılımı gerekmektedir. RFID sistemleri geniş bir alanda kullanılabilir. RFID teknolojisi ile;

- Fabrikalarda hammadde stoğunun bilgisine anlık olarak ulaşabilir.
- Fabrikalarda stoğa giren ve çıkan ürünlerin anlık olarak belirlenebilir.
- Fabrikalarda üretilen son ürünlerin stok bilgisi tutulabilir.
- Esnek üretim yapan fabrikalarda üretim bandındaki ürünün özelliklerinin belirlenmesi ve istenen özelliklere göre üretim yapılabilir.

RTLS (Real Time Location System) Teknolojileri: Türkçeye gerçek zamanlı takip sistemleri olarak çevrilen bu sistemler nesnelerin veya kişilerin konumunu gerçek zamanlı ve otomatik olarak belirleyen ve izleyen teknolojilerdir. Endüstriyel ortamlarda insanların, stokların, malzemelerin, ürünlerin konumunun net olarak bulunmasını sağlar.

Beacon Teknolojileri: Düşük enerjili Bluetooth (Bluetooth low energy – BLE) teknolojisinden yararlanarak konum bilgisini elde eden bir teknolojidir. Kısaca bu teknoloji düşük enerjili Bluetooth dalgalarını kullanarak diğer akıllı cihazlara sinyaller gönderir. Bu sistemde kullanılan Beacon cihazları akıllı cihazlara bağlanır ve bilgiyi konum bazlı arama yaparak daha hızlı ve doğru olarak üst sistemlere iletir. Ayrıca mesafeye bağlı olarak kişilere ulaşan bu teknoloji, etkileşime geçtiği kişilere de istenilen bilgileri iletebilirler.

Genel olarak bakıldığında kurumsal anlamda da izlenebilirliğin firmalara sağladığı bazı avantajlar vardır. Bunlar kısaca; risklerin azaltılması, tedarik zinciri seçimlerini kolaylaştırması, firmalar için gerekliliklerin sağlanabilmesi, paydaşlara daha kolay bilgi aktarılabilmesi, süreçlerin ve ürünlerin standartlarının kolay sağlanması olarak özetlenebilir (Koç, 2020).

Sonuç olarak izlenebilirlik prosesler arasındaki ürünlerin benzersiz şekilde tanımlanması, izlenmesi ve kalite kontrolünün sağlanmasıdır (Abrishambaf ve ark., 2013). Üretim ve hizmet süreçlerinde dijital izlenebilirlik sistemlerinin uygulanması Endüstri 4.0 yolculuğunda işletmeler için olmazsa olmaz çözümlerden biridir.

Kestrimci Bakım ve Arıza Tespiti (K4.3): Amaçlanan operasyonlardan beklenmeyen sapmaları önlemek için arıza tespiti ve arıza tahmini çok önemlidir (Arroyo ve ark. 2014). Arıza, kabul edilebilir ve standart bir durumdaki bir sistemin en az bir özelliğinin izin verilmeyen ve normal olmayan biçimde davranmasıdır. Bir arıza, üretimde kayba neden olan anormal bir durum olarak da ifade edilmektedir. Arıza teşhisi ise, bir sistemde arıza olup olmadığını belirleyen ve aynı zamanda arızanın nedenleri ve şiddetini de belirleyen bir yöntemdir. Arızanın teşhis edilmesiyle arızanın izole edilmesi sağlanabilir. Çünkü arızalarının nedenleri çözümlenirse bunların birçoğunu engellemek mümkün olmaktadır. Bir arıza durumu yaşandığında bu arızanın ve sonrasında arızanın sebebinin ortaya koyulması ve eğer giderilebiliyorsa giderilmesi gerekmektedir (Aydın, 2011).

Endüstride birçok mekanik ekipman, çalışma sırasında arızalandığında ekonomik kayıplara ve güvenlik tehditlerine neden olmaktadır. Bu nedenle, gerçek çalışma koşullarına göre uyarlanmış arıza tespit yöntemlerinin geliştirilmesi, arıza teşhislerinin doğruluğunun artırılması, insan müdahalesinin ve işçi maliyetlerinin azaltılması ve böylece tüm makine ve ekipmanın güvenli ve sorunsuz çalışmasının sağlanması gerekmektedir (Çınar ve ark, 2022).

Gerçek zamanlı durum izleme süreçlerindeki en zor adım arıza parametrelerini incelemek ve herhangi bir arızanın oluşup oluşmadığı tespit edebilmektir. Eğer arıza meydana gelmiş ise, ne tip bir arıza olduğunu saptayabilmek gereklidir. Günümüzde bazı fabrikalarda halen arızaların tespiti genellikle bir uzmanın bilgisi ve deneyimleri ile yapılmaktadır. Bununla birlikte, yapay zekânın gelişmesiyle bu süreci otomatik hale getirmek için önemli çalışmalar yürütülmektedir (Çıra ve ark, 2016).

Son yıllarda, sensörlerin ve ölçüm sistemlerinin gelişmesi ve dünya genelinde Endüstri 4.0 kavramının popüler hale gelmesiyle birlikte akıllı arıza teşhisi ve bu teşhis yöntemlerinin akıllı ölçüm uygulamalarına entegre edilmesi üretimde ön plana çıkmıştır. Makine öğrenmesi ve veri işleme algoritmaları ile bütünleşmiş akıllı ölçüm teknolojileri, endüstriyel makinelerdeki sorunları sensörler yardımıyla elde edilen verilerden hızlı ve etkili bir biçimde ortaya koyarak, arızaları daha meydana gelmeden önce yüksek başarıyla tespit ve teşhis edebilmektedir. Böylece arıza riski olan endüstriyel cihazlar önceden ve erken tespit edilerek gerekli önlemler alınabilmekte ve bu sayede ortaya çıkabilecek can ve mal kayıpları büyük oranda azaltılabilmektedir (Çınar ve ark, 2022).

Makinelerde ve cihazlarda oluşan arızalar analiz edilerek, soruna neden olan sorunların tespiti yapıp kalıcı çözümler sunularak arıza tekrarlarını önlemek, bakım ekiplerinin en önemli görevlerindendir. Bu işlemlerde ortaya çıkan arızalara yönelik incelemeler, bakım personellerinin tespitleri yardımıyla elde edilen verilerin analiz edilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Makine üzerinde zamanla meydana gelen arızaların kodlanması ve deneyim kazanılması yaşanan arıza türleriyle beraber artması, makine üzerindeki arızanın tespiti ve hızlı bir şekilde çözülmesi açısından önemlidir (Çömlekçi, 2020). Üretimde verimliliği sağlamak için üretim kaybına neden olan ekipmanların arıza süresinin kısaltılması ve bakım giderlerinin nasıl düşürüleceği konusu önemli bir konudur. Bu nedenle uygun bakım stratejilerinin uygulanması işletmelerde büyük önem arz etmektedir (Kumcu ve Özyörük, 2022).

Endüstri 4.0 yolculuğunda yapay zekâ imalat endüstrisinde dijital dönüşüme öncülük etmektedir. Yapay zeka, deneyimlenen olaylardan öğrenen makine öğrenimi algoritmalarından yararlanarak makine ve ekipmanların arıza sürelerinin kısaltılmasına ve üretim hatalarının tespit edilmesine, duruş sürelerinin minimuma düşürülmesine ve tedarik zinciri süreçlerinin iyileştirilebilmesine olanak tanır (Angelopoulos ve ark.,2020). Bu teknolojilerin sağladığı son uygulamalarından birisi de kestirimci bakım uygulamalarıdır. Tahmine dayalı bakım, üretimde ekipmanların bakıma ihtiyaç duyduğu

zamanı doğru tahmin etmek için endüstriyel nesnelerin interneti teknolojilerini, makine öğrenimi ile birleştirerek arızaların çözülmesine ve kararların doğru zamanda alınmasına imkân sağlar (Carvalho ve ark, 2019).

Kestirimci bakım, sistemlerde yaşanabilecek olası arıza sonuçlarını tahmin edebilmek için verilerin, makine öğrenmesi tekniklerinin ve istatistiksel yöntemlerin uygulanması olarak tanımlanmaktadır (Ceyhan ve Kasapbaşı, 2021). Kestirimci bakım, sensörler veya akıllı kontrol cihazları aracılığıyla elde edilen verileri makine öğrenimi algoritmalarıyla modeller ve bakım çalışmaları için en doğru kararı vermeye yardımcı olur (Özkat, 2021).

Arıza teşhisinde kullanılan önemli teknolojilerden birisi makine öğrenmesidir. Makine Öğrenmesi, yapay zekânın alt dallarından biridir ve doğrudan programlama yapmadan, bunun yerine verileri kullanarak sisteme öğrenme ve öğrendiklerini geliştirebilme yetenekleri kazandıran bir disiplindir. Üretim süreçlerinde sürekli olarak büyük miktarda veri ortaya çıkar, toplanır ve paylaşılır. Bu verilerden anlamlı sonuçlar elde etmek için büyük miktarda veriyi analiz etmek oldukça zordur ve bu işi manuel olarak yürütmek imkânsızdır. Veriler ile daha iyi tahminler geliştirebilmek için rastgele orman, destek vektör makinesi ve kümeleme algoritması gibi makine öğrenmesi algoritmalarını uygulamak mümkündür (Chazhoorvd., 2020).

Genel olarak Endüstri 4.0 teknolojilerinin ilerlemesiyle beraber arıza tespitinde görüntü işleme teknikleri, yapay sinir ağları, makine öğrenmesi, genetik algoritmalar, apriori algoritmaları, veri madenciliği uygulamaları, bulanık mantık yöntemleri ve uzman sistemler kullanılmaktadır.

Esneklik ve Yeniden Yapılandırılabilirlik (K4.4): Endüstri 4.0 uygulamaları, üretim süreçlerinde ve üretimde esnekliği ve yeniden yapılandırmayı desteklemektedir. Üretimde esneklik, değişen ihtiyaçlara daha kolay adapte olabilmeyi, yeniden yapılandırılabilirliği ve süreçlerde hızlı uyarılama yapmayı mümkün hale getirmektedir (Hermann ve ark, 2015). Diğer bir tanım olarak esneklik, akıllı fabrikaların modülleri değiştirerek veya genişleterek ihtiyaçlara göre uyarlanmasını sağlamaktır (Hermann ve ark., 2015). Esnek bir üretim sistemi müşterilerin farklı ürün taleplerine göre üretim süreçlerinin uyarlanabilmesi için, makinelerin özelliklerine göre farklı görevleri kolaylıkla verebilmektir (Santos ve ark., 2017). Esneklik, işletmelerde Endüstri 4.0'ın süreç ve işletme seviyesiyle yakından ilişkili önemli bir özelliktir. Esneklik, hatalı

ürünler üzerinde yeniden çalışabilme olanağı, işçilik ve stok maliyetlerinin azaltılması, taleplere hızlı cevap verme esnekliği gibi avantajlar sunar.

Yeniden yapılandırılabilir üretim sistemleri kısaca; modülerlik ve bütünlük sunan isteğe göre uyarlanabilen sistemler olarak tanımlanabilmektedir. Yeniden yapılandırma, ücret ve zamandan tasarruf edilmesinde, modülerlikte, bütünlükte, isteğe göre uyarlamada kolaylık sağlayabilmektedir (Hees ve Reinhart, 2015). Yeniden yapılandırılabilir üretimde; sistemin hızının değişmesi, farklı ürünlerin üretimi, farklı hacim ve kapasitede ürün üretimi, üretimin fonksiyonlarının değişikliği, sistemin maliyetinin düşük seviyede olabilmesi temel faktörlerdir. Yeniden yapılandırmada esneklik, hataları telafi etme, güncelleme veya ürün değişikliği gibi faydalar sunmuştur. Bu sistemde, otonom ve teknolojik araçlar çok sık kullanılmıştır. Sistem kontrollerinin otomasyon sayesinde sağlanması talep, ürün ve kaynaklarda oluşan değişikliklerin izlenerek, ihtiyaçlara cevap verebilme kapasitesinin artırılması amaçlanmıştır (Yavuz, 2016). Kısaca modülerlik ve yeniden yapılandırılabilirlik; modüler üretim sistemlerinin, esnek, hızlı bir şekilde yeniden yapılandırılabilir üretim sistemlerine izin verecek şekilde tasarlanması ve uygulanmasıdır (Ladiges ve ark., 2018).

Yeniden yapılandırılabilir özelliklere sahip üretim sistemleri bazı avantajlara da sahiptir. Bunlar; üretim sisteminde teknolojik gelişmelerin takip edilmesi, üretim sisteminin esnekliğinin artırılması, problemlerin hızlı tespit edilebilmesi, uzun vadede maliyeti düşürmesi gibi avantajlardır (Yavuz, 2016).

6.3.2 Kesintisiz Mühendislik ve Optimizasyon Uygulamaları

Dijital Tasarım ve Prototipleme (K5.1): Prototip, tasarımı ilgili bir soruyu yanıtlamaya veya bir varsayımı test etmeye hizmet eden, aslına uygunluğundan bağımsız olarak, üretim öncesi bir modelin hem fiziksel hem de dijital temsillerini ifade eder. Günümüzde, dijital prototipleme araçlarının kitlesel çoğalması, mühendislik tasarımının, yapım alanlarının ve öğrenen fabrikaların temel unsuru haline gelmiştir. Dijital prototiplemede geleneksel prototipleme anlayışına kıyasla imkansız gibi görünen geometrilerin artık oluşturulması mümkün olmaktadır (Nelson ve ark.,2020). Dijital tasarım ve prototipleme bir ürünün veya tasarımın sanal ortamda oluşturulan interaktif bir modelinin kullanılmasıdır. Bu işlem, geleneksel prototipleme tekniklerinden farklıdır ve fiziksel bir model oluşturmadan önce tasarımın dijital bir temsili oluşturur. Tasarımcılar ve mühendisler dijital prototipler sayesinde ürünün görünümünü, fonksiyonunu, performansını, test edebilirler. Dijital prototipleme işlemlerinde

kullanılan birçok araç veya program bulunmaktadır. Bunlara genel olarak, 3D modelleme, interaktif prototip araçları, simülasyonlar örnek verilebilir.

Üretim Yürütme Sistemleri (MES) Kullanımı (K5.2): Üretim yürütme sistemi veya MES, hammaddeden bitmiş ürüne kadar malların üretim sürecini izleyen, takip eden, belgeleyen ve kontrol eden kapsamlı, dinamik bir yazılım sistemidir. MES fabrikada karmaşık üretim sistemlerini ve veri akışlarını birbirine bağlayan, izleyen ve kontrolünü sağlayan bir bilgi sistemi olarak da tanımlanabilir. MES, endüstriyel otomasyonda bir bilgi merkezi olarak süreç şeffaflığının sağlanmasına, verimliliğin artırılmasına, zamanında performansa ve üretim planlarına uygunluğun sağlanmasına katkıda bulunur. MES'in uygulanmasından elde edilen faydalar şu şekilde özetlenebilir: kalitenin artması, önemli üretim verilerinin kalıcı olarak izlenmesine ve iş talimatlarının dijital formda bulunmasına olanak tanınması, teslim süresinin azaltılması, personel verimliliğinde artış, tüm üretim hattı için enerji tüketiminin azaltılması (Chen ve Voigt, 2020).

Üretim yürütme sistemleri ile kurumsal kaynak planlama (ERP)'nin entegrasyonunun sağlanması, dijital dönüşüm için gereklidir. ERP sistemleri üretim sahasına MES ile erişim sağlar ve ERP'nin en önemli katmanlarından biridir.

Envanter Optimizasyon Uygulamaları (K5.3): Envanter optimizasyonu, talebi karşılamak için doğru miktardaki doğru ürünleri uygun maliyetli bir şekilde sipariş etmeyi amaçlar. Bu, arz ve talep değişkenliğinin hesaba katılması ve stok kuralları ile envanter parametrelerinin dinamik olarak ayarlanması yoluyla yapılır. Envanter optimizasyonu, envanter maliyetlerini azaltırken ve maliyetli fazlalık veya eski stok riskini en aza indirirken optimum kullanılabilirliği sağlamayı amaçlar.

Günümüzde, işletmelerde başarılı bir envanter yönetimi için yapay zekâ destekli sistemler öne çıkmaktadır. Yapay zekâ destekli sistemler tahmin modelleri ve veri analizi yöntemlerini kullanarak etkin bir envanter yöntemi sağlar. Bu sistemler sayesinde envanter optimizasyonu sağlanır, stok maliyetleri azaltılır ve karlılık artırılabilir.

Enerji Tüketiminin İzlenmesi ve Optimizasyonu (K5.4): Kaynak verimliliği, teknolojik ve endüstriyel gelişmelerle birlikte getirdiği çevresel zararların artması, doğal kaynakların hızla azalması ve kaynak değerlerinin artmasıyla imalat sanayide önemli bir

hale gelmiştir. Bu nedenle, üretimde verimliliğin artırılması amacına ek olarak kaynakların da verimli kullanılması konusu geliştirilmeye ve yaygınlaştırılmaya başlanmıştır. Ayrıca kaynakların verimli kullanılması rekabetçilik ve hammadde tasarrufu açısından önem taşımaktadır. Kaynak verimliliğini sadece enerji, su ve hammadde tüketiminin azaltılmasından veya önemli ham maddelerin ikame edilmesinden ibaret değildir (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2017). Genel olarak kaynak verimliliği; enerji tüketimini ölçmek için sensörler, enerji ve ham madde açısından kaynakların optimum kullanımının hesaplanmasıdır (Dotoli ve ark. 2016).

Üretimde dijitalleşmenin enerji verimliliğini artırması beklenmektedir. Simülasyonlar, nesnelerin interneti gibi Endüstri 4.0 teknolojileri, kaynak tüketimi, işlevler ve sürdürülebilirlik iyileştirmelere öncülük etmektedir. Odak noktası, mutlak enerji tüketimini azaltmak olmalıdır ve özellikle enerjinin yoğun tüketildiği sektörlerde (metaller, kimyasallar, mineraller) yenilenebilir enerjilerin entegre edilmesi gerekmektedir.

Kaynak verimliliği, teknolojik ve endüstriyel gelişmelerle birlikte getirdiği çevresel zararların artması, doğal kaynakların hızla azalması ve kaynak değerlerinin artmasıyla imalat sanayide önemli bir hale gelmiştir. Bu nedenle, üretimde verimliliğin artırılması amacına ek olarak kaynakların da verimli kullanılması konusu geliştirilmeye ve yaygınlaştırılmaya başlanmıştır. Ayrıca kaynakların verimli kullanılması rekabetçilik ve hammadde tasarrufu açısından önem taşımaktadır. Kaynak verimliliğini sadece enerji, su ve hammadde tüketiminin azaltılmasından veya önemli ham maddelerin ikame edilmesinden ibaret değildir (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2017). Genel olarak kaynak verimliliği; enerji tüketimini ölçmek için sensörler, enerji ve ham madde açısından kaynakların optimum kullanımının hesaplanmasıdır (Dotoli ve ark. 2016).

6.3.3 Entegrasyon ve Bağlantı

ERP Yazılımının Entegrasyonu (K6.1): İşletmedeki tüm departmanların entegre edilmesinde ERP kullanmanın şirkete sağladığı birçok fayda bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi yönetim fonksiyonunda verimlilik ve işletmenin envanterinin kontrol edilmesi amacıyla yeterli verinin sağlanmasıdır. ERP'nin uygulanması işletmelere maliyetler, stratejik karar alma, esneklik, yanıt verebilirlik, esneklik ve süreç iyileştirme gibi konularda avantaj sunar. Sistemin üretim şirketlerinde entegrasyonu, departmanlar ve bireyler arasında bilgilerin gerçek zamanlı olarak aktarılmasına olanak sağlar. Gerçek zamanlı olarak alınan bilgiler, herhangi bir değişiklik karşısında daha

yüksek esneklik ve yanıt verme yeteneği sağlar. Bu sayede gerçek zamanlı veri görünürlüğü ve raporlama olanağı tanır. Sistemin entegrasyonu, tüm fonksiyonların aynı ritimde çalışması için her bir fonksiyonun diğer fonksiyonların diğer süreçlerini görmesine olanak sağlar. ERP yazılımları ile finans, muhasebe, üretim, satın alma ve insan kaynakları gibi iç süreçleri entegre edebilir (Tarigan ve ark., 2020). Ayrıca Erp sistemleri ile tedarikçi ve müşteri ilişkileri yönetimini sağlayan tedarik zinciri yönetimi sistemleri ile entegre edilebilir. Erp sistemleri işletmenin değişen koşullarına ve süreçlerine uyum sağlamalıdır ve hızla entegre edilmelidir. Bu nedenle Erp sistemlerinde esneklik ve ölçeklendirilebilirlik oldukça önemlidir.

Elektronik Ticaret Uygulamaları (K6.2): Teknolojik ürün ve hizmetlerde yaşanan gelişmeler ile işletmeler ürünlerini tüketicilere kolay ve hızlı bir şekilde sunmayı amaçlamaktadır. Firmaların hem içerde ve dış çevrelerindeki değişikliklere uyum sağlamaları ve yeni trendlere odaklanmalarına, iyileştirmeleri belirlemelerine ve bunların üretim sistemleri üzerindeki potansiyel etkilerini tahmin etmeye çalışmalarına olanak tanıyan yeni sistemler oluşturmaları gerekmektedir (Akkaya, 2020). Geleneksel ticaret yöntemi, elektronik ticaret ile değiştirilmeye başlanmıştır. Bu bağlamda mal veya hizmet üreticileri ürün veya hizmetlerini genellikle elektronik ortamda tüketicilere sunmaya başlamışlardır. Buna bağlı olarak e-ticaret işletmeler için önemli bir yer tutmaya başladı. E-ticaret en genel anlamıyla “ tarafların doğrudan fiziksel bağlantı olmaksızın veya fiziksel bir alışverişe ihtiyaç duymadan elektronik ortamda iletişim kurduğu her türlü ticari ticari faaliyet” olarak tanımlanabilir (Yılmaz, 2018). Günümüzde çoğu işletme e-ticareten yararlanarak sanal ortamda yer edinmeye çalışmaktadır. Sanal ortamlarda faaliyet gösteren işletmelerin sayısı arttıkça e-ticaret bir ivme haline geldi. Ekonomik gelişmelerden biri olan e-ticaretin kullanım alanı gün geçtikçe yaygınlaşmaya başlamıştır. İşletmelerin faaliyet gösterdiği sanal mağazada maliyetlerin azalması ve geleneksel ticarete araçların ortadan kalkması fiyatların düşmesine neden oldu. Bu nedenle e-ticaretin yaygınlaşmasında etkili olmuş ve tüketiciler tarafından tercih edilmiştir (Güven, 2020).

Elektronik ticaret kavramını, teknolojik gelişmelerle birlikte satış, satın alma, ödeme, dağıtım gibi tüm ticari faaliyetlerin internet üzerinden yapılması şeklinde açıklanabilir. Ayrıca e-ticaret için çok farklı tanımlamalar bulunmaktadır. Dünya Ticaret Örgütü’ne göre elektronik ticaret veya e-ticaret, “mal ve hizmetlerin elektronik kanallar ile üretimi, dağıtımı, pazarlanması, satışı veya teslimi” olarak tanımlanır. Bir

işletmede e-ticaret ile satış ve siparişlerinin kaydedilmesi, e-faturanın düzenlenmesi, müşteri bilgilerinin kaydedilmesi gibi fonksiyonların tamamen yazılımsal ve entegre olarak yapılması, dijital dönüşüm ve endüstri 4.0 uygulamalarına önem verildiğini gösterir.

Dijital Teknolojilerin Entegrasyonu (K6.3): Entegrasyon, birden fazla kurumsal sistemi, cihazı veya uygulamayı bir bütün olarak çalışacak ve bilgi paylaşacak şekilde birbirine bağlama sürecidir. Sistem entegrasyonunu sağlamak için bazı uygulamalar vardır.

API (Uygulama Programlama Arayüzleri): Yazılım uygulamalarının veri, özellik ve işlevsellik alışverişinde bulunmak üzere birbirleriyle iletişim kurmasını sağlayan bir dizi kural veya protokoldür.

Middleware (Ara Katman Yazılımları): Ara yazılım, iletişim ve veri yönetimi için bir yöntem sağlayarak uygulamalar ve işletim sistemleri arasındaki boşluğu dolduran bir yazılımdır. Bu yazılımlar, diğer yazılım araçları veya veritabanlarıyla veri alışverişi yapma olanağı olmayan uygulamalar için kullanılmaktadır.

SOA (Servis Odaklı Mimari): Yazılım bileşenlerini hizmet arayüzleri aracılığıyla yeniden kullanılabilir ve birlikte çalışabilir hale getirmenin yolu olarak tanımlanır. Hizmetler, yeni uygulamalara hızla dahil edilebilmeleri için ortak arayüz standartlarını ve mimari modeli kullanır.

EDI (Elektronik Veri Alışverişi): İşletmelerde bilgisayar sistemleri arasında fatura, satın alma siparişleri gibi ticari belgelerin veya elektronik belgelerin formata dayalı, yapılandırılmış ve kurtarılabilir şekilde iletilmesidir (Masudin ve ark., 2021).

7. KRİTER ÖNEM SEVİYELERİNİN ELDE EDİLMESİ

Performans ölçüm sistemi geliştirilmesi için belirlenen kriterlerin ağırlıklandırılması ilk adımdır. Bunun için ÇKKV yöntemlerinden SWARA ve BWM yöntemleri kullanılmıştır. Kriter ağırlıklandırma işlemleri için uzmanlardan görüşler alınmıştır. Formlar oluşturulmuş, dijital dönüşüm alanında uzman olan akademisyenlerden ve sektördeki uzmanlardan bu kriterleri değerlendirmesi istenmiştir.

Bu bölümde, SWARA ve BWM yöntemleri kullanılarak ağırlıklandırmaları yapılacaktır. Son aşamada ise her iki yöntemle elde edilmiş ağırlıkların ortalaması alınıp nihai ağırlıklar ve nihai sıralamalar elde edilecektir.

7.1 SWARA Yöntemi ile Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi

Dijital dönüşüm etkinliğinin değerlendirilmesi için 6 ana kriter ve 26 alt kriter belirlenmiştir. Belirlenen kriterlerin ağırlıklarının SWARA yöntemi ile belirlenebilmesi için on uzmanın görüşleri alınmıştır. Yöntemin ilk adımı olarak uzmanlar, ana kriterler ve alt kriterler için kriterleri en önemliden en önemsiz doğru sıralamışlardır. Sonrasında ise uzmanlardan s_j değerini belirlemeleri istenmiştir. Bunun için ikinci kriterden başlanarak uzmanlardan kriter j 'nin kriter $(j-1)$ 'den ne kadar önemli olduğunu belirlemeleri istenir. Değerlendirme 5 ve 5'in katları kullanılarak gerçekleştirilir. Çizelge 7.1' de K3 kriteri K2 kriterinden %20 daha önemlidir ve bu da tabloda 0,2 değeri olarak gösterilir. Sonrasında ise k_j değeri s_j değerine 1 eklenerek bulunur. Sonrasında ise SWARA adımları ve formülleri uygulanarak q_j değerleri ve ağırlıklar (w_j) hesaplanır. Bu işlemler her bir uzman tarafından ana kriterler ve alt kriterler için ayrı ayrı yapılır. Her bir uzman için bu işlemlerin gösterimi uzun olacağı için sadece uzman-1 için önem sıraları, s_j , k_j , q_j ve w_j değerleri detaylı olarak gösterilmiştir. Diğer uzman görüşleri sonucunda elde edilen ağırlıklar ortalama olarak gösterilecektir.

Çizelge 7.1. Uzman 1’ ait ana kriterlerin değerlendirilmesi (SWARA)

Ana Kriterlerin Değerlendirilmesi					
Önem sırası	Kriterler	sj	kj	qj	wj
1	K3-İşgücü Gelişimi ve Stratejik Bağlılık	—	1	1	0,253
2	K2-Veri ve Yazılım Altyapısı	0,2	1,2	0,833	0,211
3	K4-Üretim Süreci Otomasyonu	0,3	1,3	0,641	0,162
4	K6-Entegrasyon ve Bağlantı	0,1	1,1	0,582	0,147
5	K5-Kesintisiz Mühendislik ve Optimizasyon Uygulamaları	0,2	1,2	0,485	0,123
6	K1-Akıllı Üretim Teknolojileri	0,2	1,2	0,404	0,102
			Toplam	3,947	

Çizelge 7.2. Uzman -1’ Ait Akıllı Üretim Teknolojileri Kriterinin Değerlendirmesi (K1) (SWARA)

Akıllı Üretim Teknolojileri Kriterinin Değerlendirilmesi(K1)					
Önem sırası	Kriterler	sj	kj	qj	wj
1	K1.2.Siber Fiziksel Sistemler (SFS)	—	1	1	0,344
2	K1.4.Eklemeli İmalat teknolojisi	0,3	1,3	0,769	0,264
3	K1.1.Gelişmiş Robotik (Otonom ve İşbirlikçi Robotlar)	0,2	1,2	0,641	0,220
4	K1.3.Dijital İkiz ve Artırılmış Gerçeklik	0,3	1,3	0,493	0,169
			Toplam	2,903	

Çizelge 7.3. Uzman 1’e Ait Veri ve Yazılım Altyapısı Kriterinin Değerlendirmesi (K2) (SWARA)

Veri ve Yazılım Altyapısı Kriterinin Değerlendirilmesi (K2)					
Önem sırası	Kriterler	sj	kj	qj	wj
1	K2.5.Kurumsal Kaynak Planlaması (Erp) Yazılımı	—	1	1	0,254
2	K2.1.Endüstriyel Nesnelerin İnterneti (IoT)	0,2	1,2	0,833	0,211
3	K2.2.Endüstriyel Veri Güvenliği	0,3	1,3	0,641	0,162
4	K2.3.Büyük Veri ve Analitik	0,2	1,2	0,534	0,135
5	K2.6.Blokszinciri Teknolojisi	0,1	1,1	0,485	0,123
6	K2.4.Bulut Bilişim ve Uç Bilişim	0,1	1,1	0,441	0,112
			Toplam	3,935	

Çizelge 7.4. Uzman 1'e Ait İşgücü Gelişimi ve Stratejik Bağlılık Kriterinin Değerlendirilmesi (K3) (SWARA)

İşgücü Gelişimi ve Stratejik Bağlılık Kriterinin Değerlendirilmesi (K3)					
Önem sırası	Kriterler	sj	kj	qj	wj
1	K3.5.Liderlik Vizyonu ve Desteği	—	1	1	0,329
2	K3.1.Dijital Beceriler ve Yetkinlik Geliştirme	0,5	1,5	0,666	0,219
3	K3.4.Dijital Dönüşüm Stratejisi	0,2	1,2	0,555	0,182
4	K3.2.İnsan-Robot İş birliği	0,3	1,3	0,427	0,140
5	K3.3.Yatırım ve Kaynak Tahsisi	0,1	1,1	0,388	0,127
			Toplam	3,038	

Çizelge 7.5. Uzman 1'e ait Üretim Süreci Otomasyonu Kriterinin Değerlendirmesi (K4) (SWARA)

Üretim Süreci Otomasyonu Kriterinin Değerlendirilmesi (K4)					
Önem sırası	Kriterler	sj	kj	qj	wj
1	K4.4.Esneklik ve Yeniden Yapılandırılabilirlik	—	1	1	0,394
2	K4.3.Kestrimci Bakım ve Arıza Tespiti	0,7	1,7	0,588	0,232
3	K4.1.Süreç Otomasyonu ve Kontrolü	0,1	1,1	0,534	0,211
4	K4.2.Ürün ve Üretim İzlenebilirliği	0,3	1,3	0,411	0,162
			Toplam	2,534	

Çizelge 7.6. Uzman 1'e ait Kesintisiz Mühendislik ve Optimizasyon Uygulamaları Kriterinin Değerlendirmesi (K5) (SWARA)

Kesintisiz Mühendislik ve Optimizasyon Uygulamaları Kriterinin Değerlendirilmesi (K5)					
Önem sırası	Kriterler	sj	kj	qj	wj
1	K5.3.Envanter Optimizasyon Uygulamaları	—	1	1	0,428
2	K5.1.Dijital Tasarım ve Prototipleme	0,7	1,7	0,588	0,252
3	K5.4.Enerji Tüketiminin İzlenmesi ve Optimizasyonu	0,4	1,4	0,420	0,180
4	K5.2.Üretim Yürütme Sistemleri (MES) Kullanımı	0,3	1,3	0,323	0,138
			Toplam	2,331	

Çizelge 7.7. Uzman 1'e Ait Entegrasyon ve Bağlantı Kriterinin Değerlendirmesi (K6) (SWARA)

Entegrasyon ve Bağlantı Kriterinin Değerlendirilmesi (K6)					
Önem sırası	Kriterler	sj	kj	qj	wj
1	K6.1.ERP Yazılımının Entegrasyonu	—	1	1	0,418
2	K6.3.Dijital Teknolojilerin Entegrasyonu	0,2	1,2	0,833	0,348
3	K6.2.Elektronik Ticaret Uygulamaları	0,5	1,5	0,555	0,232
			Toplam	2,388	

Ana kriterlerin ve alt kriterlerin ağırlıkları SWARA işlem adımları uygulanarak hesaplanmıştır. Her bir uzman için, alt kriterlerin nihai ağırlıklarının elde edebilmek adına 10 uzman için hesaplanan alt kriter ağırlıkları ile o kritere ait ana kriter ağırlıkları çarpılmıştır. Örneğin K1 ana kriteri ile altındaki alt kriterler (K1.1, K1.2, K1.3, K1.4) ile çarpılarak, alt kriterlerin nihai ağırlıkları elde edilmiştir. Örneğin K1.1 ağırlığının nihai ağırlığını hesaplamak için K1'in ağırlık değeri (0,103) ile K1.1'in ağırlığı (0,220) değeri ile çarpılarak (0,023) değeri nihai ağırlık olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 7.8. Uzman-1' e Ait Ana Kriter Ağırlıkları, Alt Kriterlerin Ağırlıkları ve Alt Kriterlerin Nihai Ağırlıkları (SWARA)

Ana Kriterler	Ana Kriter Ağırlıkları	Alt kriterler	Alt Kriter Ağırlıkları	Nihai Alt Kriter Ağırlıkları
K1-Akıllı üretim teknolojileri	0,103	K1.1.Gelişmiş Robotik (Otonom ve İşbirlikçi Robotlar)	0,220	0,023
		K1.2.Siber Fiziksel Sistemler (SFS)	0,344	0,035
		K1.3.Dijital İkiz ve Artırılmış Gerçeklik	0,169	0,017
		K1.4.Eklemeli İmalat teknolojisi	0,264	0,027
K2-Veri ve Yazılım Altyapısı	0,211	K2.1.Endüstriyel Nesnelerin İnterneti (IoT)	0,211	0,045
		K2.2.Endüstriyel Veri Güvenliği	0,162	0,034
		K2.3.Büyük Veri ve Analitik	0,135	0,029
		K2.4.Bulut Bilişim ve Uç Bilişim	0,112	0,024
		K2.5.Kurumsal Kaynak Planlaması (ERP) Yazılımı	0,254	0,054
		K2.6.Blokcinciri Teknolojisi	0,123	0,026
K3-İşgücü Gelişimi ve Stratejik Bağlılık	0,253	K3.1.Dijital Beceriler ve Yetkinlik Geliştirme	0,219	0,056
		K3.2.İnsan-Robot İş birliği	0,140	0,036
		K3.3.Yatırım ve Kaynak Tahsisi	0,127	0,032
		K3.4.Dijital Dönüşüm Stratejisi	0,182	0,046
		K3.5.Liderlik Vizyonu ve Desteği	0,329	0,083
K4-Üretim Süreci Otomasyonu	0,162	K4.1.Süreç Otomasyonu ve Kontrolü	0,211	0,034
		K4.2.Ürün ve Üretim İzlenebilirliği	0,162	0,026
		K4.3.Kestrimci Bakım ve Arıza Tespiti	0,232	0,038
		K4.4.Esneklik ve Yeniden Yapılandırılabilirlik	0,394	0,064
K5-Kesintisiz Mühendislik ve Optimizasyon Uygulamaları	0,123	K5.1.Dijital Tasarım Ve Prototipleme	0,252	0,031
		K5.2.Üretim Yürütme Sistemleri (MES) Kullanımı	0,138	0,017
		K5.3.Envanter Optimizasyon Uygulamaları	0,428	0,053
		K5.4.Enerji Tüketiminin İzlenmesi ve Optimizasyonu	0,180	0,022
K6-Entegrasyon ve Bağlantı	0,148	K6.1.ERP Yazılımının Entegrasyonu	0,418	0,062
		K6.2.Elektronik Ticaret Uygulamaları	0,232	0,034
		K6.3.Dijital Teknolojilerin Entegrasyonu	0,348	0,051

Uzman-1 için yapılan değerlendirmeler aynı şekilde diğer 9 uzman tarafından da yapılmıştır. Her bir uzman değerlendirmesi sonucu elde hesaplanan ağırlıkların

geometrik ortalaması alınmış ve nihai ağırlıklar elde edilmiştir. Geometrik ortamlar alındıktan sonra tekrar bir normalizasyon işlemi uygulanmıştır. Çünkü aritmetik ortalamada olduğu gibi geometrik ortalamaların toplamında 1 sonucuna ulaşamamaktadır. Bu şekilde bir ağırlık dağılımı sorunuyla karşılaşmamak için yaşamamak için geometrik ortalaması bulunan nihai kriter ağırlıklarına normalizasyon işlemi uygulanmıştır. 10 uzman değerlendirmesi sonucu elde edilen ortalama ağırlıklar ve normalize ortalama ağırlıklar ana kriterler ve alt kriterler için Çizelge 7.9’da ve Çizelge 7.10’da gösterilmiştir.

Çizelge 7.9.Ana Kriterlerin Ortalama Ağırlıkları ve Normalize Edilmiş Ortalama Ağırlıklar (SWARA)

	U-1	U-2	U-3	U-4	U-5	U-6	U-7	U-8	U-9	U-10	geo.ort	normalize-ort.
K1	0,103	0,117	0,099	0,086	0,264	0,127	0,215	0,206	0,194	0,172	0,148	0,156
K2	0,211	0,152	0,170	0,215	0,203	0,289	0,258	0,227	0,141	0,243	0,206	0,217
K3	0,253	0,330	0,129	0,258	0,169	0,106	0,144	0,091	0,253	0,105	0,167	0,176
K4	0,162	0,085	0,195	0,165	0,118	0,078	0,093	0,171	0,162	0,164	0,133	0,140
K5	0,123	0,097	0,254	0,125	0,098	0,222	0,103	0,188	0,122	0,180	0,143	0,150
K6	0,148	0,220	0,154	0,150	0,147	0,178	0,187	0,118	0,128	0,136	0,154	0,162
Toplam												1

Çizelge 7.10. Alt Kriterlerin Ortalama Ağırlıkları ve Normalize Edilmiş Ortalama Ağırlıklar (SWARA)

	U-1	U-2	U-3	U-4	U-5	U-6	U-7	U-8	U-9	U-10	geo.ort	normalize
K1.1.	0,023	0,045	0,028	0,023	0,103	0,030	0,075	0,065	0,060	0,064	0,045	0,049
K1.2.	0,035	0,023	0,035	0,016	0,076	0,036	0,065	0,047	0,050	0,046	0,039	0,043
K1.3.	0,017	0,019	0,020	0,013	0,037	0,042	0,042	0,054	0,040	0,036	0,029	0,032
K1.4.	0,027	0,030	0,017	0,034	0,048	0,019	0,032	0,039	0,044	0,026	0,030	0,033
K2.1.	0,045	0,015	0,034	0,025	0,033	0,030	0,062	0,046	0,023	0,065	0,035	0,038
K2.2.	0,034	0,033	0,045	0,033	0,041	0,059	0,033	0,040	0,029	0,028	0,037	0,040
K2.3.	0,029	0,023	0,024	0,040	0,025	0,091	0,045	0,036	0,019	0,050	0,034	0,037
K2.4.	0,024	0,018	0,021	0,030	0,022	0,038	0,024	0,029	0,015	0,032	0,025	0,027
K2.5.	0,054	0,049	0,030	0,064	0,066	0,049	0,075	0,051	0,038	0,045	0,050	0,055
K2.6.	0,026	0,013	0,016	0,022	0,015	0,022	0,019	0,025	0,017	0,023	0,019	0,021
K3.1.	0,056	0,043	0,029	0,054	0,035	0,012	0,027	0,024	0,034	0,034	0,032	0,035
K3.2.	0,036	0,036	0,016	0,029	0,019	0,015	0,017	0,018	0,029	0,019	0,022	0,024

K3.3.	0,032	0,056	0,021	0,035	0,040	0,018	0,047	0,020	0,060	0,024	0,032	0,035
K3.4.	0,046	0,078	0,023	0,065	0,050	0,037	0,033	0,016	0,045	0,015	0,036	0,039
K3.5.	0,083	0,117	0,040	0,075	0,027	0,024	0,020	0,012	0,085	0,013	0,037	0,040
K4.1.	0,034	0,017	0,051	0,035	0,024	0,020	0,036	0,054	0,034	0,056	0,034	0,036
K4.2.	0,026	0,022	0,063	0,059	0,042	0,031	0,025	0,036	0,055	0,029	0,036	0,039
K4.3.	0,038	0,014	0,037	0,029	0,030	0,012	0,014	0,043	0,031	0,036	0,026	0,028
K4.4.	0,064	0,032	0,044	0,042	0,021	0,016	0,018	0,038	0,042	0,042	0,033	0,036
K5.1.	0,031	0,014	0,066	0,023	0,015	0,079	0,019	0,048	0,023	0,038	0,030	0,033
K5.2.	0,017	0,026	0,058	0,035	0,024	0,041	0,041	0,055	0,041	0,068	0,037	0,040
K5.3.	0,053	0,039	0,080	0,052	0,034	0,056	0,028	0,041	0,032	0,045	0,044	0,048
K5.4.	0,022	0,018	0,050	0,015	0,026	0,047	0,016	0,043	0,026	0,030	0,027	0,029
K6.1.	0,062	0,101	0,048	0,064	0,063	0,053	0,067	0,040	0,051	0,060	0,059	0,064
K6.2.	0,034	0,052	0,046	0,034	0,033	0,042	0,043	0,033	0,041	0,033	0,039	0,042
K6.3.	0,051	0,067	0,060	0,052	0,052	0,082	0,077	0,044	0,037	0,043	0,055	0,059
Toplam												1

7.2 BWM Yöntemi ile Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi

Dijital dönüşüm etkinliğinin değerlendirilmesi için 6 ana kriter ve 26 alt kriter belirlenmiştir. Bu kriterlerin ağırlıklarının BWM yöntemiyle hesaplanabilmesi için 10 uzmandan görüş alınmıştır. Öncelikle uzmanlardan en iyi (en önemli) ve en kötü (en önemsiz) kriterleri seçmeleri istenmiştir. Daha sonra en önemli kriterin, diğer kriterlerden ne kadar önemli olduğunu ve diğer kriterlerin en az önemli kriterden ne kadar önemli olduğunu 1-9 skalasına göre değerlendirmeleri istenmiş ve değerlendirme matrisleri elde edilmiştir. Bu işlemler ana kriterler için ve her ana kriterin altındaki alt kriterler için yapılmıştır. Her bir uzman için bu işlemlerin gösterimi uzun olacağı için sadece uzman-1 için değerlendirme matrisleri, ağırlıklar ve tutarlılık oranları detaylı olarak gösterilmiştir. Diğer uzman görüşleri sonucunda elde edilen ağırlıklar ve tutarlılık oranları ortalama olarak verilecektir.

Çizelge 7.11. Uzman -1'e Ait Ana Kriterlerin Değerlendirmeleri (BWM)

Ana Kriterlerin Değerlendirilmesi						
En İyi Kriter = K3 (İşgücü gelişimi ve stratejik bağlılık)	En Kötü Kriter =K1 (Akıllı üretim sistemleri)					
En iyi kriterin diğer kriterlere göre önem düzeyleri = K3	K1	K2	K3	K4	K5	K6
	5	2	1	3	4	3
Diğer kriterlerin en kötü kritere göre önem düzeyleri = K1	K1	K2	K3	K4	K5	K6
	1	7	5	2	3	3

Çizelge 7.12. Uzman -1' Ait Akıllı Üretim Teknolojileri Kriterinin Değerlendirmesi(K1)(BWM)

Akıllı Üretim Teknolojileri Kriterinin Değerlendirilmesi (K1)				
En İyi Kriter = K1.2 (Siber Fiziksel Sistemler (SFS))	En Kötü Kriter =K1.3 (Dijital İkiz ve Artırılmış Gerçeklik)			
En iyi kriterin diğer kriterlere göre önem düzeyleri = K1.2	K1.1	K1.2	K1.3	K1.4
	3	1	5	2
Diğer kriterlerin en kötü kritere göre önem düzeyleri = K1.3	K1.1	K1.2	K1.3	K1.4
	2	5	1	5

Çizelge 7.13. Uzman-1'e Ait Veri ve Yazılım Altyapısı Kriterinin Değerlendirmesi (K2) (BWM)

Veri ve Yazılım Altyapısı Kriterinin Değerlendirilmesi (K2)						
En İyi Kriter = K2.5 (Kurumsal Kaynak Planlama (ERP) Yazılımı)	En Kötü Kriter =K2.4 (Bulut Bilişim ve Uç Bilişim)					
En iyi kriterin diğer kriterlere göre önem düzeyleri = K2.5	K2.1	K2.2	K2.3	K2.4	K2.5	K2.6
	3	4	5	7	1	6
Diğer kriterlerin en kötü kritere göre önem düzeyleri = K2.4	K2.1	K2.2	K2.3	K2.4	K2.5	K2.6
	6	4	5	1	7	2

Çizelge 7.14. Uzman 1'e Ait İşgücü Gelişimi ve Stratejik Bağlılık Kriterinin Değerlendirmesi (K3) (BWM)

İşgücü Gelişimi ve Stratejik Bağlılık Kriterinin Değerlendirilmesi (K3)					
En İyi Kriter = K3.5 (Liderlik Desteği ve Vizyonu)	En Kötü Kriter =K3.3 (Yatırım ve Kaynak Tahsisi)				
En iyi kriterin diğer kriterlere göre önem düzeyleri = K3.5	K3.1	K3.2	K3.3	K3.4	K3.5
	2	4	5	3	1
Diğer kriterlerin en kötü kritere göre önem düzeyleri = K3.3	K3.1	K3.2	K3.3	K3.4	K3.5
	5	4	1	3	5

Çizelge 7.15. Uzman-1'e ait Üretim Süreci Otomasyonu Kriterinin Değerlendirmesi (K4) (BWM)

Üretim Süreci Otomasyonu Kriterinin Değerlendirilmesi (K4)				
En İyi Kriter =K4.4 (Esneklik ve Yeniden Yapılandırılabilirlik)	En Kötü Kriter =K4.2 (Ürün ve Üretim İzlenebilirliği)			
En iyi kriterin diğer kriterlere göre önem düzeyleri = K4.4	K4.1	K4.2	K4.3	K4.4
	2	3	2	1
Diğer kriterlerin en kötü kritere göre önem düzeyleri = K4.2	K4.1	K4.2	K4.3	K4.4
	2	1	2	3

Çizelge 7.16. Uzman 1'e Ait Kesintisiz Mühendislik ve Optimizasyon Uygulamaları Kriterinin Değerlendirmesi (K5) (BWM)

Kesintisiz Mühendislik ve Optimizasyon Uygulamaları Kriterinin Değerlendirilmesi(K5)				
En İyi Kriter = K5.3 (Envanter Optimizasyonu Uygulamaları)	En Kötü Kriter =K5.2 (Üretim Yürütme Sistemleri (MES) Kullanımı)			
En iyi kriterin diğer kriterlere göre önem düzeyleri = K5.3	K5.1	K5.2	K5.3	K5.4
	3	7	1	4
Diğer kriterlerin en kötü kritere göre önem düzeyleri = K5.2	K5.1	K5.2	K5.3	K5.4
	5	1	7	5

Çizelge 7.17. Uzman 1'e Ait Entegrasyon ve Bağlantı Kriterinin Değerlendirmesi (K6) (BWM)

Entegrasyon ve Bağlantı Kriterinin Değerlendirilmesi (K6)			
En İyi Kriter =K6.1 (ERP Yazılımının Entegrasyonu)	En Kötü Kriter =K6.2 (Elektronik Ticaret Uygulamaları)		
En iyi kriterin diğer kriterlere göre önem düzeyleri = K6.1	K6.1	K6.2	K6.3
	1	9	6
Diğer kriterlerin en kötü kritere göre önem düzeyleri = K6.2	K6.1	K6.2	K6.3
	9	1	4

Uzmanlardan değerlendirmeler alındıktan sonra Excel üzerinden BWM-Excel-Solver eklentisi yardımıyla ana kriterlerin ağırlıkları ve tutarlılık oranları hesaplanmıştır ve sonuçlar Çizelge 7.18'de gösterilmiştir. Tutarlılık oranı=0,045 olarak hesaplanmıştır. Sıfıra yakın bir değer olduğu için değerlendirmelerin tutarlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Çizelge 7.18. Uzman 1'e Ait Ana Kriterlerin Ağırlıkları ve Tutarlılık Oranı (BWM)

Kriterler	Ana kriter ağırlıkları	Tutarlılık Oranı
K1-Akıllı Üretim Teknolojileri	0,046	0,045
K2-Veri ve Yazılım Altyapısı	0,219	
K3-İşgücü Gelişimi ve Stratejik Bağlılık	0,334	
K4-Üretim Süreci Otomasyonu	0,146	
K5-Kesintisiz Mühendislik ve Optimizasyon Uygulamaları	0,109	
K6-Entegrasyon ve Bağlantı	0,146	

Alt kriterler de Excel çözücü eklentisi ile hesaplanmış ve alt kriter ağırlıkları ve tutarlılık oranları elde edilmiştir. Tutarlılık oranları 0'a yakın olduğu için değerlendirmelerin tutarlı olduğu görülmüştür. Alt kriterlerin nihai ağırlıklarının elde edilebilmesi için her bir uzman için elde edilen alt kriter ağırlıkları ile o kritere ait ana kriter ağırlığı çarpılarak hesaplanmıştır. Örneğin K1 ana kriteri ile altındaki alt kriterler (K1.1, K1.2, K1.3, K1.4) ile çarpılarak, alt kriterlerin nihai ağırlıkları elde edilmiştir. Örneğin K1.1 ağırlığının nihai ağırlığını hesaplamak için K1'in ağırlık değeri (0,046) ile

K1.1'in ağırlığı (0,185) değeri çarpılarak (0,009) değeri nihai ağırlık olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 7.19.Uzman 1'e Ait Alt Kriterlerin Ağırlıkları ve Tutarlılık Oranı (BWM)

Ana kriterler	Ana kriter ağırlıkları	Alt Kriterler	Alt Kriter Ağırlıkları	Nihai Alt Kriter Ağırlıkları	Tutarlılık oranı
K1-Akıllı üretim teknolojileri	0,046	K1.1.Gelişmiş Robotik (Otonom ve İşbirlikçi Robotlar)	0,185	0,009	0,040
		K1.2.Siber Fiziksel Sistemler (SFS)	0,462	0,021	
		K1.3.Dijital İkiz ve Artırılmış Gerçeklik	0,074	0,003	
		K1.4.Eklemeli İmalat teknolojisi	0,277	0,013	
K2-Veri ve Yazılım Altyapısı	0,219	K2.1.Endüstriyel Nesnelerin İnterneti (İiot)	0,183	0,040	0,031
		K2.2.Endüstriyel Veri Güvenliği	0,137	0,030	
		K2.3.Büyük Veri ve Analitik	0,109	0,024	
		K2.4.Bulut Bilişim ve Uç Bilişim	0,045	0,010	
		K2.5.Kurumsal Kaynak Planlaması (Erp) Yazılımı	0,432	0,095	
		K2.6.Blokszinciri Teknolojisi	0,091	0,020	
K3-İşgücü Gelişimi ve Stratejik Bağlılık	0,334	K3.1.Dijital Beceriler ve Yetkinlik Geliştirme	0,251	0,084	0,046
		K3.2.İnsan-Robot İş birliği	0,125	0,042	
		K3.3.Yatırım ve Kaynak Tahsisi	0,058	0,019	
		K3.4.Dijital Dönüşüm Stratejisi	0,167	0,056	
		K3.5.Liderlik Vizyonu ve Desteği	0,396	0,133	
K4-Üretim Süreci Otomasyonu	0,146	K4.1.Süreç Otomasyonu ve Kontrolü	0,225	0,033	0,032
		K4.2.Ürün ve Üretim İzlenebilirliği	0,129	0,019	
		K4.3.Kestrimci Bakım ve Arıza Tespiti	0,225	0,033	
		K4.4.Esneklik ve Yeniden Yapılandırılabilirlik	0,419	0,061	
K5-Kesintisiz Mühendislik ve Optimizasyon Uygulamaları	0,109	K5.1.Dijital Tasarım ve Prototipleme	0,225	0,025	0,035
		K5.2.Üretim Yürütme Sistemleri (MES) Kullanımı	0,059	0,007	
		K5.3.Envanter Optimizasyon Uygulamaları	0,546	0,060	
		K5.4.Enerji Tüketiminin İzlenmesi ve Optimizasyonu	0,168	0,018	
K6-Entegrasyon ve Bağlantı	0,146	K6.1.ERP Yazılımının Entegrasyonu	0,776	0,113	0,026
		K6.2.Elektronik Ticaret Uygulamaları	0,071	0,010	
		K6.3.Dijital Teknolojilerin Entegrasyonu	0,151	0,022	

Uzman-1 için yapılan değerlendirmeler aynı şekilde diğer 9 uzman tarafından da yapılmıştır. Her bir uzman için ana kriterler ve alt kriterler bazında ağırlıklar ve tutarlılık oranları hesaplanmıştır. Tutarlılık oranları 0'a yakın değerler olduğu için değerlendirmeler tutarlıdır. Her bir uzman değerlendirmesi sonucu elde edilen ağırlıkların geometrik ortalaması alınmış ve nihai ağırlıklar elde edilmiştir. Geometrik ortamlar alındıktan sonra tekrar bir normalizasyon işlemi uygulanmıştır. Çünkü aritmetik ortalamada olduğu gibi geometrik ortalamaların toplamında 1 sonucuna ulaşılammaktadır. Bu şekilde bir ağırlık dağılımı sorunuyla karşılaşmamak için geometrik ortalaması bulunan nihai kriter ağırlıklarına normalizasyon işlemi uygulanmıştır. Bu işlemler hem ana kriterler hem de alt kriterler için yapılmıştır.

Çizelge 7.20.Ortalama Ana Kriter Ağırlıkları ve Normalize Kriter Ağırlıkları ve Tutarlılık Oranları

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	TO
U-1	0,046	0,219	0,334	0,146	0,109	0,146	0,045
U-2	0,086	0,129	0,414	0,039	0,074	0,258	0,023
U-3	0,039	0,140	0,105	0,210	0,366	0,140	0,012
U-4	0,046	0,234	0,394	0,156	0,078	0,093	0,020
U-5	0,345	0,245	0,122	0,098	0,067	0,122	0,145
U-6	0,111	0,379	0,089	0,053	0,221	0,148	0,211
U-7	0,134	0,446	0,107	0,045	0,089	0,179	0,020
U-8	0,234	0,394	0,046	0,093	0,156	0,078	0,020
U-9	0,251	0,100	0,402	0,126	0,038	0,084	0,022
U-10	0,170	0,307	0,068	0,170	0,170	0,114	0,021
geo.ort	0,114	0,233	0,156	0,098	0,112	0,128	
normalize-ort	0,135	0,277	0,185	0,117	0,133	0,152	

Çizelge 7.21.K-1 Altındaki Ortalama Alt Kriter Ağırlıkları ve Normalize Kriter Ağırlıkları (BWM)

	K1.1	K1.2	K1.3	K1.4	TO
U-1	0,009	0,021	0,003	0,013	0,040
U-2	0,047	0,014	0,006	0,019	0,021
U-3	0,008	0,021	0,006	0,003	0,051
U-4	0,010	0,006	0,003	0,026	0,029
U-5	0,163	0,092	0,028	0,061	0,027
U-6	0,019	0,029	0,052	0,011	0,032
U-7	0,075	0,031	0,018	0,010	0,043
U-8	0,106	0,042	0,064	0,021	0,056
U-9	0,126	0,072	0,018	0,036	0,024
U-10	0,085	0,049	0,024	0,012	0,024
geo.ort	0,040	0,029	0,014	0,016	
normalize-ort	0,053	0,039	0,019	0,022	

Çizelge 7.22.K-2 Altındaki Ortalama Alt Kriter Ağırlıkları ve Normalize Kriter Ağırlıkları (BWM)

	K2.1	K2.2	K2.3	K2.4	K2.5	K2.6	TO
U-1	0,040	0,030	0,024	0,010	0,095	0,020	0,031
U-2	0,009	0,030	0,020	0,015	0,051	0,005	0,013
U-3	0,024	0,045	0,018	0,018	0,027	0,007	0,031
U-4	0,019	0,038	0,056	0,023	0,089	0,009	0,027
U-5	0,028	0,064	0,036	0,036	0,071	0,011	0,010
U-6	0,034	0,084	0,144	0,042	0,056	0,020	0,021
U-7	0,105	0,042	0,070	0,035	0,174	0,020	0,022
U-8	0,052	0,078	0,039	0,078	0,128	0,020	0,031
U-9	0,013	0,025	0,008	0,004	0,043	0,007	0,014
U-10	0,097	0,039	0,058	0,039	0,058	0,016	0,028
geo.ort	0,032	0,044	0,036	0,023	0,069	0,012	
normalize-ort	0,042	0,059	0,048	0,031	0,093	0,016	

Çizelge 7.23.K-3 Altındaki Ortalama Alt Kriter Ağırlıkları ve Normalize Kriter Ağırlıkları (BWM)

	K3.1	K3.2	K3.3	K3.4	K3.5	TO
U-1	0,084	0,042	0,019	0,056	0,133	0,046
U-2	0,043	0,020	0,054	0,108	0,189	0,015
U-3	0,023	0,006	0,015	0,023	0,038	0,031
U-4	0,044	0,025	0,031	0,109	0,185	0,028
U-5	0,019	0,007	0,029	0,048	0,019	0,037
U-6	0,006	0,010	0,014	0,037	0,021	0,025
U-7	0,019	0,007	0,047	0,019	0,014	0,042
U-8	0,021	0,006	0,008	0,006	0,003	0,038
U-9	0,040	0,023	0,079	0,059	0,200	0,025
U-10	0,024	0,014	0,014	0,009	0,007	0,059
geo.ort	0,027	0,013	0,025	0,033	0,037	
normalize-ort	0,035	0,018	0,033	0,045	0,049	

Çizelge 7.24.K-4 Altındaki Ortalama Alt Kriter Ağırlıkları ve Normalize Kriter Ağırlıkları (BWM)

	K4.1	K4.2	K4.3	K4.4	TO
U-1	0,033	0,019	0,033	0,061	0,032
U-2	0,005	0,011	0,003	0,020	0,025
U-3	0,047	0,088	0,027	0,047	0,032
U-4	0,028	0,073	0,013	0,042	0,028
U-5	0,018	0,045	0,027	0,009	0,056
U-6	0,014	0,025	0,005	0,009	0,032
U-7	0,027	0,008	0,004	0,006	0,029
U-8	0,043	0,010	0,024	0,016	0,032
U-9	0,023	0,059	0,008	0,035	0,026
U-10	0,069	0,018	0,041	0,041	0,081
geo.ort	0,025	0,026	0,013	0,022	
normalize-ort	0,033	0,034	0,018	0,030	

Çizelge 7.25.K-5 Altındaki Ortalama Alt Kriter Ağırlıkları ve Normalize Kriter Ağırlıkları (BWM)

	K5.1	K5.2	K5.3	K5.4	TO
U-1	0,025	0,007	0,060	0,018	0,035
U-2	0,005	0,022	0,038	0,009	0,020
U-3	0,095	0,063	0,170	0,038	0,032
U-4	0,011	0,018	0,045	0,005	0,029
U-5	0,006	0,011	0,032	0,017	0,010
U-6	0,103	0,023	0,057	0,038	0,032
U-7	0,013	0,046	0,025	0,006	0,015
U-8	0,042	0,073	0,013	0,028	0,028
U-9	0,002	0,023	0,007	0,006	0,038
U-10	0,038	0,071	0,038	0,022	0,032
geo.ort	0,018	0,027	0,035	0,014	
normalize-ort	0,024	0,036	0,047	0,019	

Çizelge 7.26. K-6 Altındaki Ortalama Alt Kriter Ağırlıkları ve Normalize Kriter Ağırlıkları (BWM)

	K6.1	K6.2	K6.3	TO
U-1	0,113	0,010	0,022	0,026
U-2	0,154	0,020	0,084	0,015
U-3	0,044	0,018	0,079	0,038
U-4	0,060	0,010	0,023	0,039
U-5	0,069	0,015	0,038	0,038
U-6	0,038	0,015	0,094	0,061
U-7	0,058	0,018	0,103	0,033
U-8	0,032	0,021	0,024	0,517
U-9	0,045	0,024	0,014	0,042
U-10	0,062	0,019	0,033	0,042
geo.ort	0,060	0,017	0,041	
normalize-ort	0,08062	0,02208	0,05504	

7.3 Nihai Ağırlıkların Elde Edilmesi ve Kriterlerin Sıralanması

BWM ve SWARA yöntemleriyle hesaplanan ana kriter ağırlıklarının aritmetik ortalaması alınarak nihai ağırlıklar elde edilmiştir ve nihai ağırlıklara göre kriterler sıralanmıştır. Her iki yöntem ile hesaplanan ana kriter ağırlıkları, nihai ana kriter ağırlıkları ve sıralama Çizelge 7.27’de gösterilmiştir. Nihai ağırlıklara göre en yüksek ağırlığa sahip olan ana kriter K2- Veri ve Yazılım Altyapısı kriteridir. En düşük ağırlığa sahip kriter ise kriter K4-Üretim Süreci Otomasyonu kriteridir.

Çizelge 7.27. Ana Kriterlerin BWM, SWARA, Nihai Ağırlıkları ve Sıralaması

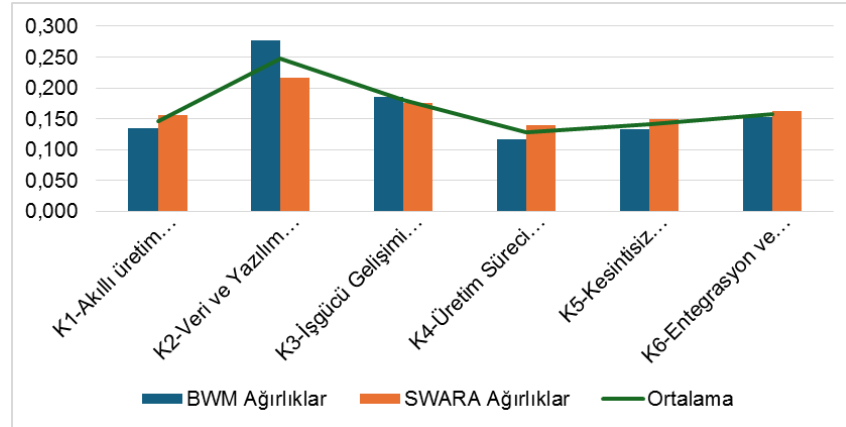
KRİTERLER	BWM Ağırlıklar	SWARA Ağırlıklar	Ortalama	SIRALAMA
K1-Akıllı üretim teknolojileri	0,135	0,156	0,146	4
K2-Veri ve Yazılım Altyapısı	0,277	0,217	0,247	1
K3-İşgücü Gelişimi ve Stratejik Bağlılık	0,185	0,176	0,181	2
K4-Üretim Süreci Otomasyonu	0,117	0,140	0,128	6
K5-Kesintisiz Mühendislik ve Optimizasyon Uygulamaları	0,133	0,150	0,142	5
K6-Entegrasyon ve Bağlantı	0,152	0,162	0,157	3

Çizelge 7.27’de görüldüğü gibi, K2 - Veri ve Yazılım Altyapısı (0,247) en yüksek ağırlığa sahiptir ve dijital dönüşüm sürecinde en kritik faktör olarak öne

çıkılmaktadır. Bu durum, veri ve yazılım altyapısının dijital dönüşümün belkemiği olduğunu ve başarılı bir dijital dönüşüm için güçlü bir veri yönetimi ve yazılım altyapısının vazgeçilmez olduğunu göstermektedir. K3 - İşgücü Gelişimi ve Stratejik Bağlılık (0,181), ikinci en yüksek ağırlığa sahip bu kriter, dijital dönüşümde işgücünün gelişiminin ve stratejik bağlılığın önemli olduğunu vurgulamaktadır. Dijital dönüşüm sürecinde çalışanların dijital yetkinliklerinin artırılması ve stratejik hedeflere bağlılıklarının sağlanması gereklidir. K6 - Entegrasyon ve Bağlantı (0,157), dijital dönüşüm sürecinde üçüncü en önemli kriter olarak belirlenmiştir. Farklı sistemler ve süreçler arasında entegrasyonun sağlanması, dijital dönüşümün etkinliği için kritiktir. K1 - Akıllı Üretim Teknolojileri (0,146), dijital dönüşümde önemli bir yer tutmaktadır. Bu teknolojiler, üretim süreçlerini optimize etmek ve verimliliği artırmak için gereklidir. K5 - Kesintisiz Mühendislik ve Optimizasyon Uygulamaları (0,142), üretim ve mühendislik süreçlerinin kesintisiz bir şekilde optimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır. Bu, üretim süreçlerinin sürekli olarak iyileştirilmesini ve verimliliğin artırılmasını sağlar. K4 - Üretim Süreci Otomasyonu (0,128), en düşük ağırlığa sahip kriterdir, dijital dönüşümde üretim süreci otomasyonunun diğer kriterlere göre daha az öncelikli olduğunu göstermektedir. Ancak, otomasyon yine de dijital dönüşümün önemli bir parçasıdır ve verimliliği artırmada önemli rol oynar.

Sonuçlardan da görüldüğü üzere, dijital dönüşüm sürecinde en yüksek öncelik veri ve yazılım altyapısına verilmiştir. Bu, işletmelerin dijital dönüşüm yolculuğunda güçlü bir bilgi teknolojisi altyapısının ve veri yönetim sistemlerinin oluşturulmasının kritik olduğunu göstermektedir. İşgücü gelişimi ve stratejik bağlılık, çalışanların dijital dönüşüme adapte olması ve sürecin stratejik hedeflerle uyumlu ilerlemesi açısından büyük önem taşımaktadır. Entegrasyon ve bağlantı, farklı sistemler ve süreçler arasındaki uyumun sağlanması için kritik bir faktördür.

BWM ve SWARA yöntemleriyle hesaplanan ana kriter ağırlıkları ve kriterlerin ortalamaları alınarak elde edilen nihai ağırlıkların grafiği Şekil 7.1’de gösterilmiştir.



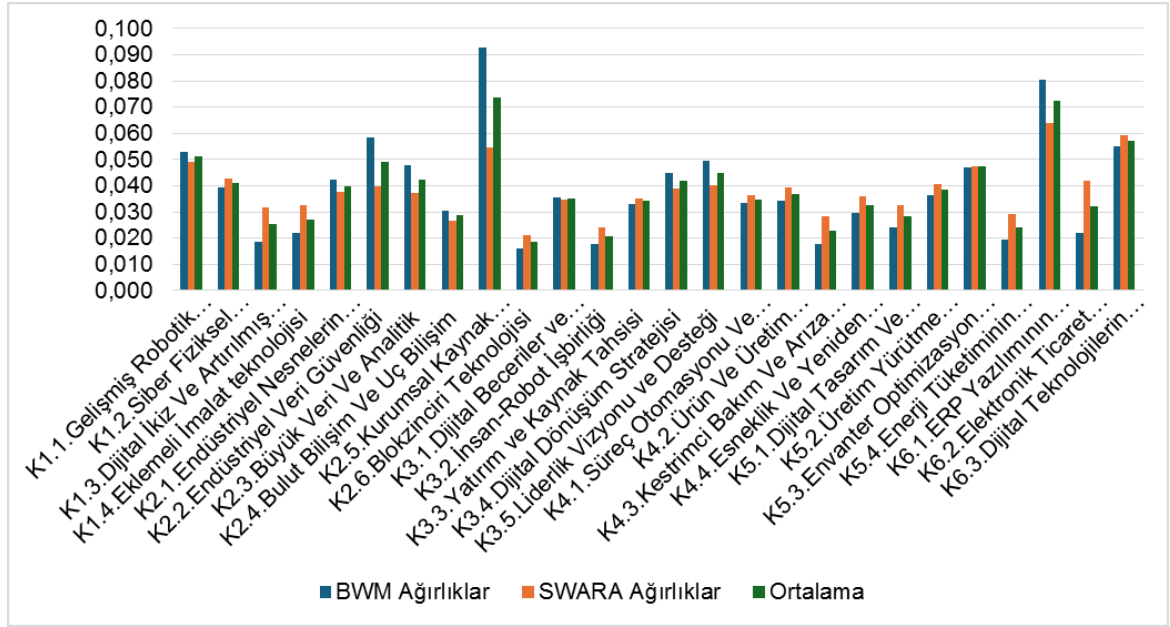
Şekil 7.1. Ana Kriterlerin BWM, SWARA ve Nihai Ağırlıkları

BWM ve SWARA yöntemleriyle hesaplanan alt kriter ağırlıklarının aritmetik ortalaması alınarak nihai ağırlıklar elde edilmiştir ve nihai ağırlıklara göre kriterler sıralanmıştır. Her iki yöntem ile hesaplanan alt kriterlerin ağırlıkları, nihai alt kriter ağırlıkları ve sıralama Çizelge 7.28’da gösterilmiştir. Nihai ağırlıklara göre en yüksek ağırlığa sahip alt kriter, K2.5-Kurumsal Kaynak Planlaması (ERP) Yazılımı, dijital dönüşüm için en kritik faktör olarak belirlenmiştir. Bunu, K6.1-ERP Yazılımının Entegrasyonu ve K6.3-Dijital Teknolojilerin Entegrasyonu izlemektedir. En düşük ağırlığa sahip kriterler arasında ise K2.6-Blokzinciri Teknolojisi ve K1.3-Dijital İkiz ve Artırılmış Gerçeklik yer almaktadır. Bu sonuçlar, dijital dönüşüm sürecinde öncelikli olarak ERP yazılımı ve entegrasyonunun dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

Çizelge 7.28. Alt Kriterlerin BWM, SWARA, Nihai Ağırlıkları ve Sıralaması

Ana Kriterler	Alt Kriterler	BWM Ağırlıklar	SWARA Ağırlıklar	Ortalama	Sıra
K1-Akıllı üretim teknolojileri	K1.1.Gelişmiş Robotik (Otonom ve İşbirlikçi Robotlar)	0,053	0,049	0,051	4
	K1.2.Siber Fiziksel Sistemler (SFS)	0,039	0,043	0,041	10
	K1.3.Dijital İkiz ve Artırılmış Gerçeklik	0,019	0,032	0,025	22
	K1.4.Eklemeli İmalat teknolojisi	0,022	0,033	0,027	21
K2-Veri ve Yazılım Altyapısı	K2.1.Endüstriyel Nesnelerin İnterneti (IIot)	0,042	0,038	0,040	11
	K2.2.Endüstriyel Veri Güvenliği	0,059	0,040	0,049	5
	K2.3.Büyük Veri ve Analitik	0,048	0,037	0,042	8
	K2.4.Bulut Bilişim ve Uç Bilişim	0,031	0,027	0,029	19
	K2.5.Kurumsal Kaynak Planlaması (Erp) Yazılımı	0,093	0,055	0,074	1
	K2.6.Blokzinciri Teknolojisi	0,016	0,021	0,018	26
K3-İşgücü Gelişimi ve Stratejik Bağlılık	K3.1.Dijital Beceriler ve Yetkinlik Geliştirme	0,035	0,035	0,035	14
	K3.2.İnsan-Robot İş birliği	0,018	0,024	0,021	25
	K3.3.Yatırım ve Kaynak Tahsisi	0,033	0,035	0,034	16
	K3.4.Dijital Dönüşüm Stratejisi	0,045	0,039	0,042	9
	K3.5.Liderlik Vizyonu ve Desteği	0,049	0,040	0,045	7
K4-Üretim Süreci Otomasyonu	K4.1.Süreç Otomasyonu ve Kontrolü	0,033	0,036	0,035	15
	K4.2.Ürün ve Üretim İzlenebilirliği	0,034	0,039	0,037	13
	K4.3.Kestrimci Bakım ve Arıza Tespiti	0,018	0,028	0,023	24
	K4.4.Esneklik ve Yeniden Yapılandırılabilirlik	0,030	0,036	0,033	17
K5-Kesintisiz Mühendislik ve Optimizasyon Uygulamaları	K5.1.Dijital Tasarım ve Prototipleme	0,024	0,033	0,028	20
	K5.2.Üretim Yürütme Sistemleri (MES) Kullanımı	0,036	0,040	0,038	12
	K5.3.Envanter Optimizasyon Uygulamaları	0,047	0,048	0,047	6
	K5.4.Enerji Tüketiminin İzlenmesi ve Optimizasyonu	0,019	0,029	0,024	23
K6-Entegrasyon ve Bağlantı	K6.1.ERP Yazılımının Entegrasyonu	0,081	0,064	0,072	2
	K6.2.Elektronik Ticaret Uygulamaları	0,022	0,042	0,032	18
	K6.3.Dijital Teknolojilerin Entegrasyonu	0,055	0,059	0,057	3

BWM ve SWARA yöntemleriyle hesaplanan alt kriter ağırlıkları ve kriterlerin ortalamaları alınarak elde edilen nihai ağırlıkların grafiği Şekil 7.2’de gösterilmiştir.



Şekil 7.2. Alt Kriterlerin BWM, SWARA ve Nihai Ağırlıkları

8. ÖRNEK UYGULAMA

Dijital dönüşüm etkinliğinin hesaplanabilmesi için elde edilen nihai kriter ağırlıkları ile performans değerleri gri ilişkisel analiz yöntemi kullanılarak birleştirilmiştir. Sonrasında ise TOPSIS yöntemi ve SAW (Basit Ağırlıklı Toplam Yöntemi) ile de performans skoru hesaplanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Örnek uygulama için Konya’da faaliyet gösteren bir yedek parça firması seçilmiştir. Bu bölümde öncelikle çok kriterli karar verme yöntemlerinden Gri ilişkisel analiz yönteminin adımları anlatılmıştır. Daha sonra ise GİA ile örnek firmanın dijital dönüşüm performansı hesaplanmıştır. En son aşamada ise GİA, TOPSIS ve SAW yöntemleriyle hesaplanan performans skorları karşılaştırılmıştır.

8.1 Örnek Bir Firmanın Dijital Dönüşüm Performansının Belirlenmesi

Seçilen firmada çalışan mühendislerden firmanın kriterleri ne oranda sağladığını değerlendirmeleri istenmiştir. Bu değerlendirmeleri, Likert ölçeğine göre 1-5 arasında puan verme yöntemine göre yapmaları istenmiştir. Firmada çalışan 3 yetkili mühendis kriterler için 1-5 arasında puan vermiştir ve bu değerlerin ortalaması alınarak hesaplamalarda kullanılmıştır. Örneğin K1.1 kriteri için karar vericiler sırasıyla 2,3,3 değerlerini vermişlerdir ve bu değerlerin ortalaması alınarak 2,66 değeri hesaplamalarda kullanılmıştır.

Elde edilen kriter ağırlıkları ve firmanın kriter performans değerleri Gri İlişkisel Analiz yöntemiyle birleştirilmiştir ve Çizelge 8.1’de gösterilmiştir. Gerekli hesaplamalar sonucunda örnek firmanın dijital dönüşüm etkinlik performansı (yüzde 49,61) olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 8.1. Firmanın Dijital Dönüşüm Performansının Belirlenmesi

	maks	maks	maks	maks	maks	maks	maks	maks	maks	maks
kriterler	K1.1	K1.2	K1.3	K1.4	K2.1	K2.2	K2.3	K2.4	K2.5	K2.6
ağırlıklar	0,051	0,041	0,025	0,027	0,040	0,049	0,042	0,029	0,074	0,018
firma skoru	2,667	2,333	1,333	2,333	2,667	4,333	3,000	2,333	2,667	1,000
maks	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
min	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
normalize	0,417	0,333	0,083	0,333	0,417	0,833	0,500	0,333	0,417	0,000
referans	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$\Delta 0i(j)$	0,583	0,667	0,917	0,667	0,583	0,167	0,500	0,667	0,583	1,000
Δmak	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Δmin	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ort	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$\gamma_{oi}(j)$	0,462	0,429	0,353	0,429	0,462	0,750	0,500	0,429	0,462	0,333
	maks	maks	maks	maks	maks	maks	maks	maks	maks	
kriterler	K3.1	K3.2	K3.3	K3.4	K3.5	K4.1	K4.2	K4.3	K4.4	
ağırlıklar	0,035	0,021	0,034	0,042	0,045	0,035	0,037	0,023	0,033	
firma skoru	3,333	2,333	3,667	2,000	3,667	2,667	4,000	1,667	3,333	
maks	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
min	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
normalize	0,583	0,333	0,667	0,250	0,667	0,417	0,750	0,167	0,583	
referans	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
$\Delta 0i(j)$	0,417	0,667	0,333	0,750	0,333	0,583	0,250	0,833	0,417	
Δmak	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Δmin	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
ort	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
$\gamma_{oi}(j)$	0,545	0,429	0,600	0,400	0,600	0,462	0,667	0,375	0,545	
	maks	maks	maks	maks	maks	maks	maks			
kriterler	K5.1	K5.2	K5.3	K5.4	K6.1	K6.2	K6.3			
ağırlıklar	0,028	0,038	0,047	0,024	0,072	0,032	0,057			
firma skoru	2,333	2,333	3,667	3,667	1,667	3,667	3,000			
maks	5	5	5	5	5	5	5			
min	1	1	1	1	1	1	1			
normalize	0,333	0,333	0,667	0,667	0,167	0,667	0,500			
referans	1	1	1	1	1	1	1			
$\Delta 0i(j)$	0,667	0,667	0,333	0,333	0,833	0,333	0,500			
Δmak	1	1	1	1	1	1	1			
Δmin	0	0	0	0	0	0	0			
ort	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5			
$\gamma_{oi}(j)$	0,429	0,429	0,600	0,600	0,375	0,600	0,500			
performans skoru	0,496									
performans skoru (%)	49,61									

8.2 Farklı Yöntemlerle Elde Edilen Performans Skorlarının Karşılaştırılması

Örnek firmanın performans skorunun farklı ÇKKV yöntemleriyle karşılaştırılabilmesi için GİA yöntemine ek olarak TOPSIS ve SAW yöntemleri uygulanmıştır. Bu 3 yöntemden elde edilen performans skorlarının karşılaştırması Çizelge 8.2’de gösterilmiştir. 3 yöntemden elde edilen sonuçların birbirine yakın değerler olduğu ve sonuçların tutarlı olduğu görülmüştür.

Çizelge 8.2. Farklı ÇKKV Yöntemleriyle Performans Skorlarının Karşılaştırılması

	GİA	TOPSIS	SAW
Performans skoru	0,496	0,5619	0,5619
Performans skoru (%)	49,61	56,19	56,19

GİA, TOPSIS ve SAW yöntemlerinden elde edilen performans skorları karşılaştırıldığında GİA yönteminden %49,61 sonucu elde edilmiştir, TOPSIS ve SAW yöntemlerinin her birinden de %56,19 sonucu elde edilmiştir. GİA yöntemden elde edilen sonuç ile TOPSIS ve SAW yöntemlerinin sonuçlarının birbirine yakın değerler olduğu ve sonuçların tutarlı olduğu görülmüştür.

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüz iş dünyasında, işletmelerin maliyetleri düşürebilmesi ve hızlı, verimli üretim yapabilmesi için süreçlerini dönüştürmeleri ve Endüstri 4.0'ın gerektirdiği yenilikleri ve teknolojileri benimsemeleri zorunludur. Bu dönüşümü başarıyla gerçekleştirebilmek için işletmelerin dijital dönüşüm yolculuklarında hangi konumda olduklarını belirlemeleri gerekmektedir.

Bu çalışma, üretim işletmelerinin dijital dönüşümünü gerçekleştirmeleri için kritik faktörleri belirlemekte ve bu dönüşümün etkinliğini ölçmek için rehberlik sağlamaktadır. Dijital dönüşümün gerekliliklerini oluşturan faktörler detaylı olarak araştırılmış ve literatür taraması ile belirlenen ana ve alt kriterler tanımlanmıştır. Bu kapsamda, 6 ana kriter altında 26 alt kriter belirlenmiş ve işletmelerin öncelikle odaklanmaları gereken kriterler vurgulanmıştır.

Kriterlerin önem seviyelerinin belirlenmesi amacıyla kriterler dijital dönüşüm alanında uzman olan akademisyenler ve sektördeki profesyoneller tarafından değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler sonucunda elde edilen veriler, SWARA ve BWM yöntemleri kullanılarak analiz edilmiş ve kriterlerin ağırlıkları belirlenmiştir. Bu iki yöntemle hesaplanan ağırlıkların ortalaması alınarak nihai ağırlıklar ve sıralama elde edilmiştir. BWM ve SWARA yöntemleriyle elde edilen sonuçların ortalamasına göre, en yüksek ağırlığa sahip ana kriter K2 (Veri ve Yazılım Altyapısı) olarak belirlenmiştir. En düşük ağırlığa sahip kriter ise K4 (Üretim Süreci Otomasyonu) olarak belirlenmiştir. Alt kriterlerin değerlendirmesi sonucunda ise en yüksek ağırlığa sahip kriter, K2.5-Kurumsal Kaynak Planlaması (ERP) Yazılımı, dijital dönüşüm için en kritik faktör olarak belirlenmiştir. Bunu, K6.1-ERP Yazılımının Entegrasyonu ve K6.3-Dijital Teknolojilerin Entegrasyonu izlemektedir. En düşük ağırlığa sahip kriterler arasında ise K2.6-Blokszinciri Teknolojisi ve K1.3-Dijital İkiz ve Artırılmış Gerçeklik yer almaktadır. Bu sonuçlar, dijital dönüşüm sürecinde öncelikli olarak ERP yazılımı ve entegrasyonunun dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

Örnek bir uygulama olarak, bir yedek parça firmasından alınan verilerle, nihai ağırlıklar ve Gri İlişkisel Analiz yöntemi kullanılarak dijital dönüşüm etkinliği yüzdesel olarak hesaplanmıştır. Geliştirilen performans ölçüm sisteminin örnek firmaya uygulanması sonucunda, firmanın dijital dönüşüm etkinliği hesaplanmıştır. Sonuçların karşılaştırılması için SAW ve TOPSIS yöntemleri kullanılarak önerilen yöntemin doğruluğu gösterilmiştir.

Literatürde, dijital dönüşüm etkinlik ve olgunluk değerlendirmesi üzerine birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada kapsamlı bir literatür taraması ve uzman görüşleri ile detaylı bir kriter kümesi oluşturulmuştur. Ayrıca, BWM, SWARA ve GİA yöntemleri entegre edilerek ilk kez bu alanda uygulanmıştır. Gelecekteki çalışmalarda, kriter seti genişletilebilir ve daha fazla kriter eklenebilir. Ayrıca, kriterlerin önem derecelerini analiz etmek için daha fazla uzmanın görüşlerine başvurulabilir. Performans değerlendirmesi için farklı çok kriterli karar verme yöntemleri de kullanılabilir.



KAYNAKLAR

- Acatech. (2013). Acatech: Recommendations for Implementing the Strategic Initiative Industrie 4.0, <https://en.acatech.de/publication/recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0-final-report-of-the-industrie-4-0-working-group/>, [online], [Ziyaret Tarihi: 28 Mart 2024].
- Akal, Z. (2005). İşletmelerde Performans Ölçüm ve Denetimi: Çok Yönlü Performans Göstergeleri. *Milli Prodüktivite Merkezi Yayınları*.
- Akkaya, B. (2020). Review of leadership styles in perspective of dynamic capabilities: An empirical research on managers in manufacturing firms. *Yönetim Bilimleri Dergisi*, 18(36), 389–407.
- Aksoy, C. (2024). İşletmelerin Dijital Dönüşümü Ve Dijital Liderlik Yaklaşımı. *Kalite Ve Strateji Yönetimi Dergisi*, 4(1), 1-29.
- Albukhitan, S. (2020). Developing digital transformation strategy for manufacturing. *Procedia computer science*, 170, 664-671.
- Alkan, N., & Kahraman, C. (2023). Prioritization of supply chain digital transformation strategies using multi-expert fermatean fuzzy analytic hierarchy process. *Informatica*, 34(1), 1-33.
- Ammar, M., Haleem, A., Javaid, M., Walia, R., & Bahl, S. (2021). Improving material quality management and manufacturing organizations system through Industry 4.0 technologies. *Materials Today: Proceedings*, 45, 5089-5096.
- Angelopoulos, A., Michailidis, E. T., Nomikos, N., Trakadas, P., Hatziefremidis, A., Voliotis, S., Zahariadis, T. (2020). Tackling faults in the industry 4.0 era—a survey of machine-learning solutions and key aspects. *Sensors*, 20(1), 109.
- Angreani, L. S., Vijaya, A., & Wicaksono, H. (2020). Systematic literature review of industry 4.0 maturity model for manufacturing and logistics sectors. *Procedia manufacturing*, 52, 337-343.
- Angreani, L. S., Vijaya, A., & Wicaksono, H. (2023). Identifying Essential Driving Factors of Industry 4.0 Maturity Models Using Fuzzy MCDM Methods. *Procedia CIRP*, 120, 1582-1587.
- Anonim. (2024). İzlenebilirlik Hakkında Temel Bilgiler ve Kalite Yönetimi için Bağımsız Bir Sistem, [online], <https://entek.com.tr/works/izlenebilirlik-nedir/>, [Ziyaret Tarihi: 11 Mart 2024].
- Anonim. (2024). Üretim ve Hizmet Süreçlerinde Dijital İzlenebilirlik Sistemleri (RFID, RTLS, BEOCON), [online], <http://techabel.com/uretim-ve-hizmet-sureclerinde-dijital-izlenebilirlik-sistemleri-rfid-rtls-beocon/> [Ziyaret Tarihi: 11 Mart 2024].
- Anonim.(2024). Üretimde İzlenebilirlik, [online], <https://odsdanismanlik.com/tr/makaleler/uretimde-izlenebilirlik/>, [Ziyaret Tarihi: 11 Mart 2024].

- Anonim.(2023).What is Industrial Automation?.[online].
<https://industlabs.com/news/what-is-industrial-automation>. [Ziyaret Tarihi: 24 Nisan 2024].
- Aslam, F., Aimin, W., Li, M., & Ur Rehman, K. (2020). Innovation in the era of IoT and industry 5.0: Absolute innovation management (AIM) framework. *Information*, 11(2), 124.
- Aslan, B. (2019). Yenilikçi tasarım yöntemleri kullanarak eklemeli imalata yönelik optimum ürün geliştirilmesi. Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa.
- Atan, M. ,(2005), Üretim ve verimliliği artırma teknikleri. Gazi Üniversitesi Ekonometri Bölümü Ders Notu.
- Attaran, S., Attaran, M., & Celik, B. G. (2024). Digital Twins and Industrial Internet of Things: Uncovering operational intelligence in industry 4.0. *Decision Analytics Journal*, 10, 100398.
- Aydın, İ.,(2011), Gerçek Zamanlı Durum İzleme Ve Arıza Teşhisi İçin Bağımsız Akıllı Hesaplama Tekniklerinin Geliştirilmesi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,Doktora Tezi, Elazığ.
- Ayyıldız, M. E., & Demir, A. O. (2022). Dijital Dönüşüm Olgunluk Seviyesinin Ölçülmesine Yönelik Modellerin İncelenmesi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Girişimcilik Dergisi*, 6(12), 61-80.
- Ayyıldız, M.E. (2023). İşletmelerde Dijital Dönüşüm Olgunluğunun Ölçülmesine Yönelik Ölçek Geliştirilmesi, İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Azambuja, A.J., Giese, T. (2023). Digital Twins in Industry 4.0 – Opportunities and challenges related to Cyber Security. *11th CIRP Global Web Conference (CIRPe 2023)*, 25-30.
- Banger G. (2017). Endüstri 4.0 Ekstra, 1.Baskı, *Dorlion Yayınları*, Ankara.
- Banger, G. (2016). Endüstri 4.0 ve Akıllı İşletme, *Dorlion Yayınları*, Ankara.
- Barth, M., & A. Fay. 2013. “Automated Generation of Simulation Models for Control Code Tests.” *Control Engineering Practice* 21: 218–230.
- Berman, S. J., & Marshall, A. (2014). The next digital transformation: From an individual-centered to an everyone-to-everyone economy. *Strategy & Leadership*, 42(5), 9-17.
- Bhatia, A., & Sehgal, A. K. (2023). Additive manufacturing materials, methods and applications: A review. *Materials Today: Proceedings*, 81, 1060-1067.
- Bibby, L., & Dehe, B. (2018). Defining and assessing industry 4.0 maturity levels–case of the defence sector. *Production Planning & Control*, 29(12), 1030-1043.

- Budak, N. (2021). Geleceğin meslekleri ve dijital beceriler. *In, Çalışma ekonomisi ve endüstri ilişkileri seçme yazılar-V*, 283-312.
- Büyüközkan, G., & Güler, M. (2020). Analysis of companies' digital maturity by hesitant fuzzy linguistic MCDM methods. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 38(1), 1119-1132.
- Büyüközkan, G., Feyzioğlu, O., & Havle, C. A. (2020). Analysis of success factors in aviation 4.0 using integrated intuitionistic fuzzy MCDM methods. *In Intelligent and Fuzzy Techniques in Big Data Analytics and Decision Making: Proceedings of the INFUS 2019 Conference, Istanbul, Turkey, July 23-25, 2019* (pp. 598-606).
- Cai, H., L. D. Xu, B. Xu, C. Xie, S. Qin, and L. Jiang. 2014. "IoT-based Configurable Information Service Platform for Product Lifecycle Management." *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 10 (2): 1558–1567.
- Carvalho, T. P., Soares, F. A., Vita, R., Francisco, R. D. P., Basto, J. P., & Alcala, S. G., (2019), A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance, *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106024.
- Ceyhan, H., Kasapbaşı, M., C. (2021). Üretim Sistemlerinde Makine Öğrenmesi ile Kestirimci Bakım, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 33, 167-175.
- Chang, S.-C.; Chang, H.-H.; Lu, M.-T. 2021, Evaluating Industry 4.0 Technology Application in SMEs: Using a Hybrid MCDM Approach, *Mathematics*, 9, 414.
- Chazhooor, A., Mounika, Y., Sarobin, M. V. R., Sanjana, M. V., Yasashvini, R. (2020), Predictive Maintenance using Machine Learning Based Classification Models, *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 954(1), 012001.
- Cheminod, M., L. Durante, and A. Valenzano. (2013). "Review of Security Issues in Industrial Networks." *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 9 (1): 277–293.
- Chen, X., & Voigt, T. (2020). Implementation of the Manufacturing Execution System in the food and beverage industry. *Journal of Food Engineering*, 278, 109932.
- Çakır, E., 2018, Elektronik Belge Yönetim Sistemi (Ebys) Yazılımı Seçiminde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri: Bir Belediye Örneği, *Business Economics and Management Research Journal*, 1(1), 15-30
- Çakır, S., Perçin, S. (2013). Çok Kriterli Karar Verme Teknikleriyle Lojistik Firmalarında Performans Ölçümü. *Ege Akademik Bakış*, 13(4), 449-460
- Çark, Ö. (2020). Dijital Dönüşümün İşgücü Ve Meslekler Üzerindeki Etkileri. *International Journal Of Entrepreneurship And Management Inquiries*, 4(Özel Sayı 1), 19-34.
- Çetinkaya, E. (2021). İmalat Sanayinde Dijital Dönüşüm: Trakya Bölgesi'nde Bir Saha Araştırması, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ.

- Çevik Aka, D. (2023). Evaluation Of The Effects Of Industry 4.0 On Organizational Agility With Fucom: Implementation In The Textile Industry, *Uluslararası İktisadi Ve İdari İncelemeler Dergisi*(40), 33-48.
- Çınar, E., Gültekin, Ö., Özkan, K., Yazıcı, A. (2022). A novel deep learning approach for intelligent fault diagnosis applications based on time-frequency images. *Neural Computing and Applications*, 34, 4803–4812
- Çıra, F., M. Arkan, B., Gümüş. (2016). “Detection of Stator Winding Inter-Turn Short Circuit Faults in Permanent Magnet Synchronous Motors and Automatic Classification of Fault Severity via a Pattern Recognition System. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 11 (2).
- Çömlekçi, O. (2020). Endüstriyel Otomasyon Sistemlerinde Yapay Zeka Yöntemleri İle Arıza Tespiti, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bursa.
- Demircan Keskin, F., Kabasakal, İ., Kaymaz, Y., & Soyuer, H. (2019). An assessment model for organizational adoption of industry 4.0 based on multi-criteria decision techniques. In *Proceedings of the International Symposium for Production Research 2018 18* (pp. 85-100). Springer International Publishing.
- Dermenci, M., S., Sağbaş A. (2023). Dijital Dönüşüm Ekseninde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Endüstri 4.0 Olgunluk Modelinin Değerlendirilmesi, *European Journal of Engineering and Applied Sciences*, 6 (2), 74-85.
- Doğan, O., & Baloğlu, N. (2020). Endüstri 4.0 kavramsal farkındalık ölçeği. *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Sosyal ve Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 22(38), 58-81.
- Dotoli, M., A. Fay, M. Miśkiewicz, and C. Seatzu. (2016). “Advanced Control in Factory Automation: a Survey.” *International Journal of Production Research* 55 (5): 1243–1259
- Dökme, S. (2020). Sakarya’da Dijital Dönüşüme Yönelik Sanayi Kuruluşlarında Karşılaştırmalı Değerlendirme Çalışması. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.
- Elkadi, Hitham., & El Tazi, N. (2023). Identifying and prioritizing digital transformation elements using fuzzy analytic hierarchy process. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 14(9).
- Emad F., Khalaf ve Mustafa M., Kadi., (2017), A Survey of Access Control and Data Encryption for Database Security. *JKAU: Eng. Sci.*, 28(1), 19 - 30 .
- Erik, A., & Kuvvetli, Y. (2021). Üretim İşletmelerinin Endüstri 4.0 Entegrasyonunun Veri Zarflama Analizi ile Değerlendirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(3), 637-647.
- Erkan., E.F. (2022). Yapay Zeka Teknikleri İle Desteklenmiş Bulanık Bilişsel Haritalama Yöntemi Kullanılarak Kurumların Dijital Dönüşümlerinin

Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya

- Ertuğrul, İ., Öztaş, T., Özçil, A., & Öztaş, G. Z. (2016). Grey relational analysis approach in academic performance comparison of university a case study of Turkish universities.
- Farajollahi, F. (2016). Bankacılık Sektöründe Kurumsal Sosyal Açıklamalarının Finansal Performans Üzerindeki Etkilerinin İncelemesi: BIST-30’da Bir Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Sosyal bilimler Enstitüsü, Erzurum
- Gabriel, M., Pessl, E. (2016). Industry 4.0 and sustainability impacts: Critical discussion of sustainability aspects with a special focus on future of work and ecological consequences. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*, 14(2), 131.
- Gelen, G., Zcan, S., (2018), İnsan-robot etkileşiminin biyomimetik yaklaşımla sağlanması, *Pamukkale Univ Muh Bilim Derg*, 25(2), 188-198.
- Gessa , A., Jimenez, A., Sancha, P. (2023). Exploring ERP systems adoption in challenging times. Insights of SMEs stories, *Technological Forecasting & Social Change*, 195
- Godbole, M. V. (2023). Revolutionizing Enterprise Resource Planning (ERP) Systems through Artificial Intelligence. *International Numeric Journal of Machine Learning and Robots*, 7(7), 1-15.
- Goulart, V. G., Liboni, L. B., & Cezarino, L. O. (2022). Balancing skills in the digital transformation era: The future of jobs and the role of higher education. *Industry and Higher Education*, 36(2), 118-127.
- Gulati, M., Anand, V., Salaria, S., Jain, N. ve Gupta S. (2015) . Computerized implant-dentistry: advances toward automation. *J Indian Soc Periodontol* ,19(5) .
- Guven, H. (2020). Industry 4.0 and marketing 4.0: in perspective of digitalization and E-Commerce. In *Agile Business Leadership Methods for Industry 4.0* (pp. 25-46).
- Habib, G., Sharma, S., Ibrahim, S., Ahmad, I., Qureshi, S., & Ishfaq, M. (2022). Blockchain technology: benefits, challenges, applications, and integration of blockchain technology with cloud computing. *Future Internet*, 14(11), 341.
- Han, H., Shiwakoti, R. K., Jarvis, R., Mordi, C., & Botchie, D. (2023). Accounting and auditing with blockchain technology and artificial Intelligence: A literature review. *International Journal of Accounting Information Systems*, 48, 100598.
- Hashemkhani Zolfani, S., Salimi, J., Maknoon, R. ve Simona, K. (2015). Technology foresight about R&D projects selection; application of SWARA method at the policy making level. *Engineering Economics*, 26(5), 571–580. 9571.

- Hashemkhani Zolfani, S., Zavadskas, E. K. ve Turskis, Z. (2013). Design of Products with Both International and Local Perspectives Based on Yin-Yang Balance Theory and SWARA Method. *Economic Research*, 26(2), 153–166.
- Hees, A., Reinhart, G. (2015)., Approach For Production Planning In Reconfigurable Manufacturing Systems. *Procedia CIRP*, 33,. 70 – 75
- Hermann, M., Pentek, T., ve Otto, B. (2016), Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review, *Technische Universität Dortmund*.
- Hinings, B., Gegenhuber, T., & Greenwood, R. (2018). Digital innovation and transformation: An institutional perspective. *Information and organization*, 28(1), 52-61.
- Huynh, M.T., Nippa, M., Aichner, T. (2023). Big data analytics capabilities: Patchwork or progress? A systematic review of the status quo and implications for future research. *Technological Forecasting & Social Change*, 197, 122884.
- İlgin, M.A., Urkan, B. & Kurtul, E. (2021). Türk İmalat Sanayinin Endüstri 4.0’a Geçiş Sürecini Olumsuz Etkileyen Faktörlerin Kalite Evi ve Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ile Analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (21), 591-599.
- İpkin, M., & Keskinçiliç, M. (2023). İşletmelerde Erp Uygulamalarının Dijital Dönüşüm Sürecine Katkıları. *Aurum Journal Of Social Sciences*, 8(1), 49-74.
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., & Suman, R. (2022). Artificial intelligence applications for industry 4.0: A literature-based study. *Journal of Industrial Integration and Management*, 7(01), 83-111.
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Khan, S., & Suman, R. (2021). Blockchain technology applications for Industry 4.0: A literature-based review. *Blockchain: Research and Applications*, 2(4), 100027.
- Kaisler S., Armour F., Espinosa J. A., Money, W. (2013). Big data: Issues and Challenges Moving Forward. In 2013. *46th Hawaii International Conference on System Sciences* , 995-1004.
- Kamble, S., Gunasekaran, A., & Dhone, N. C. (2020). Industry 4.0 and lean manufacturing practices for sustainable organisational performance in Indian manufacturing companies. *International journal of production research*, 58(5), 1319-1337.
- Kamran, M. (2023). Fundamentals of Smart Grid Systems, 1-22.
- Kane, G.C. (2017). Digital Maturity, Not Digital Transformation. *MIT Sloan Management Review*.
- Kaya, B., Adem, A., Dağdeviren, M. (2023). Ergonomi 4.0 Ve Akıllı Fabrikalar: Yeni İş Tasarımına Yönelik İnsan Faktörü Temelli Bir Ölçek Önerisi. *Endüstri Mühendisliği / Journal of Industrial Engineering* ,34(1), 109-140.

- Kaya, C. (2022). Dijital Dönüşümün Örgütsel Değişim Ve İş Süreçlerine Etkisine İlişkin Çoklu Durum Çalışması, Akdeniz Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Antalya.
- Kaygın,E., Zengin,Y., Topçuoğlu ,E. (2019). Endüstri 4.0’a Akademik Bakış. *İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 33(4), 1065-1081.
- Keršulienė, V., Zavadskas, E. K. ve Turskis, Z. (2010). Selection of Rational Dispute Resolution Method by Applying New Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis. *Journal of Business Economics and Management*, 11(2), 243–258.
- Kesbiç, Ö., (2020), Üretimde Dijital Dönüşüm Ve Etkileri: Türkiye Ekonomisi Açısından Bir Analiz, Manisa Celal Bayar Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Manisa.
- Keskinkılıç, M & İpkin, M. (2023). İşletmelerde ERP Uygulamalarının Dijital Dönüşüm Sürecine Katkıları, *Aurum Sosyal Bilimler Dergisi*, 8(1), 49-74.
- Khan, A., & Ahmed, A. (2024). Optimizing Retail Operations, Inventory Management and Sales Forecasting with Big Data and AI in China. *Emerging Trends in Machine Intelligence and Big Data*, 16(1), 18-37.
- Kıyak, A., & Bozkurt, G. (2020). A General Overview To Digital Leadership Concept. *Uluslararası Sosyal Ve Ekonomik Çalışmalar Dergisi*, 1(1), 84-95.
- Koç, E. (2020). Tedarik Zinciri İzlenebilirliği Ve Sürdürülebilirliğinde Yeni Paradigma: Blokzincir. *Bingöl Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*,10(20), 417-437.
- Koleva, N. (2018). Industry 4.0’s Opportunities and Challenges for Production Engineering and Managemnet. *Innovations*, 6(1), 17-18.
- Köküner, Z., Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri İle Beyaz Eşya Sektöründe Endüstri 4.0 Dijital Dönüşüm Yetkinlik Analizi, 2018, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Kumcu, S., Özyörük, B. (2022). Veri Madenciliğinde Birliktelik Kuralları ile Bir CNC Tezgahı İçin Arıza Analizi, *Savunma Bilimleri Dergisi*,41,206-223.
- Kumru, S. (2022). İşletmelerde Dijital Dönüşüm Süreçlerinin Stratejik Yönetimi: Bir Alan Araştırması, İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Ladiges, J., A. Fay, T. Holm, U. Hempen, L. Urbas, M. Obst, and T. Albers. (2018). “Integration of Modular Process Units Into Process Control Systems.” *IEEE Transactions on Industry Applications* 54 (2): 1870–1880.
- Lee, J. (2015). Smart Factory Systems. *Informatik Spektrum*.
- Leitão, P., A. W. Colombo, S. Karnouskos. (2016). Industrial Automation Based on Cyber-Physical Systems Technologies: Prototype Implementations and Challenges, *Computers in Industry*. 81(11), 25.

- Lydon, B. (2016). Industry 4.0: Intelligent and Flexible Product, *Intech*.
- Maretto, L., Faccio M., Battini, D. (2022). A Multi-Criteria Decision-Making Model Based on Fuzzy Logic and AHP for the Selection of Digital Technologies, *IFAC PapersOnline*, 55(2), 319-324.
- Masood, T., & Egger, J. (2020). Adopting augmented reality in the age of industrial digitalisation. *Computers in Industry*, 115, 103112.
- Masudin, I., Lau, E., Safitri, N. T., Restuputri, D. P., & Handayani, D. I. (2021). The impact of the traceability of the information systems on humanitarian logistics performance: Case study of Indonesian relief logistics services. *Cogent Business & Management*, 8(1), 1906052.
- Metesen. (2021). Akıllı Üretim Çağı: Endüstri 4.0 ve Getirecekleri, <http://www.metesen.org.tr/akilli-uretim-cagiendustri4-0//>, [online].
- Mitroulis, D., Kitsios, F., & Kitsios, F. (2019, February). Digital transformation strategy: A literature review. In *Proceedings of the 6th National Student Conference of HELORS, Xanthi, Greece* (pp. 59-61).
- Mürbek, N., Aksoy, E. (2016). Bir Petrol Şirketinin Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri İle Performans Değerlendirmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 21(3).
- Nelson, J., Berlin, A., Menold, J., & Parkinson, M. (2020). The role of digital prototyping tools in learning factories. *Procedia Manufacturing*, 45, 528-533.
- Osterrieder, P., Budde, L., & Friedli, T. (2020). The smart factory as a key construct of industry 4.0: A systematic literature review. *International Journal of Production Economics*, 221, 107476.
- Örnek, Ö., Yazıcı, A., Özkan, M. (2023). İnsan-Robot Etkileşimi Çalışmalarına yönelik İnsanın OctoMap ile Çoklu Çözünürlüklü Modellenmesi. *DEUFMD*, 25(74), 303-316.
- Özçelik, T. Ö., Erkollar, A., Cebeci, H. İ. (2018). Bir İmalat İşletmesi için Endüstri 4.0 (Dijital) Olgunluk Seviyesi Belirleme Uygulaması, *Paper presented at the Fifth International Management Information Systems Conference*.
- Özdemir, Y.S. (2022). A Spherical Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making Model For Industry 4.0 Performance Measurement, *Axioms*, 11, 325
- Özkat, E. C. (2021). Makine Öğrenmesi Metodolojisi Kullanılarak Yüksek Hızlı Rulmanlarda Sağlık Göstergesinin Belirlenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (22), 176.
- Özköse E, Odabaş MS. (2021). Advantages of using ERP program in business. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 4(4), 226-231.
- Paksoy, T., & Deveci, M. (Eds.). (2023). Smart and Sustainable Operations and Supply Chain Management in Industry 4.0. CRC Press.

- Paksoy, T., Kochan, C. G., & Ali, S. S. (Eds.). (2020). Logistics 4.0: Digital transformation of supply chain management. CRC Press.
- Pamuk, N. S., Soysal, M. (2018). Yeni Sanayi Devrimi Endüstri 4.0 Üzerine Bir İnceleme. *Verimlilik Dergisi*, 1, 41-66.
- Pérez, M., Carou, D., Rubio, E. M., & Teti, R. (2020). Current advances in additive manufacturing. *Procedia Cirp*, 88, 439-444.
- Reljić, V., Milenković, I., Dudić, S., Šulc, J., & Bajči, B. (2021). Augmented reality applications in industry 4.0 environment. *Applied Sciences*, 11(12), 5592.
- Rezaei, J. (2015). Best-Worst Multi-Criteria Decision-Making Method. *Omega*, 53, 49–57.
- Rogers, D. (2016). The digital transformation playbook. Rethink your business for the digital age. *Columbia University Press*.
- Ryan, D. (2016). Understanding Digital Marketing: Marketing Strategies for Engaging the Digital Generation. *Kogan Page Publishers*.
- Sağbaş, A., & Dermenci, M. S. (2023). Dijital Dönüşüm Ekseninde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Endüstri 4.0 Olgunluk Modelinin Değerlendirilmesi. *European Journal of Engineering and Applied Sciences*, 6(2), 74-85.
- Sahut, J.M., Schweizer, D., Peris-Ortiz, M., (2022), Technological forecasting and social change introduction to the VSI technological innovations to ensure confidence in the digital World, *Technol. Forecast. Soc. Chang*, 179, 121680.
- Salik, Ata, N. (2024). Türkiye'nin Endüstri 4.0'a Geçiş Sürecinin Değerlendirilmesi, *Yönetim Bilimleri Dergisi*, 22(51), 119-141.
- Santos, B. P., Alberto, A., Lima, T. D. F. M., Charrua-Santos, F. M. B. (2018). Industria 4.0: desafios e oportunidades. *Revista Producao e Desenvolvimento*, 4(1), 111-124.
- Santos, C., Mehraei, A., Barros, A. C., Araujo, M., & Ares, E. (2017), Towards Industry 4.0: an overview of European strategic roadmaps, *Procedia Manufacturing*, 13, 972-979.
- Sarıcioğlu, P., İlerisoy, Z.Y., Soyluk, A. (2022). Mimarlık ve Endüstri 4.0 Eşleşmesi. *Yapı Dergisi*, 12-16.
- Sauter, T. (2010). "The Three Generations of Field-Level Networks—Evolution and Compatibility Issues." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 57 (11): 3585–3595.
- Sharma, M., Raut, R., Sehrawat, R., Ishizaka, A. (2022), Digitalisation of manufacturing operations: The influential role of organisational, social, environmental, and technological impediments. *Expert Systems With Applications*, 211.

- Singla, C.,Kaushal, S., Verma,A., Kumar, H. (2018). Computational Intelligence for Multimedia Big Data on the Cloud with Engineering Applications. *Intelligent Data-Centric Systems*,147-157.
- Sivaslıoğlu, F. (2022). İşletmelerde Finansal Olmayan Performans Değerleme Yaklaşımları: Kavramsal Bir Çerçeve. *International Academic Social Resources Journal*, 7(40), 842-856.
- Soylu, A. (2018). Endüstri 4.0 ve Girişimcilikte Yeni Yaklaşımlar. *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*,(32), 43-57.
- Sriram R.M., Vinodh Z.,2020, Analysis of readiness factors for Industry 4.0 implementation in SMEs using COPRAS. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 0122.
- Sriram, R. M., & Vinodh, S. (2021). Analysis of readiness factors for Industry 4.0 implementation in SMEs using COPRAS. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 38(5), 1178-1192.
- Stanujkic, D., Karabasevic, D. ve Zavadskas, E. K. (2015). A Framework for the Selection of a Packaging Design Based on the SWARA Method. *Engineering Economics*, 26(2), 181–187.
- Şekkeli H., Bakan İ. (2018). Akıllı Fabrikalar. *Journal of Life Economics Dergisi*,5 (4).
- T.C. Bilim, Sanayi Ve Teknoloji Bakanlığı. (2017). Kalkınmada Anahtar Verimlilik, 29 (347).
- Tarigan, Z. J. H., Siagian, H., & Jie, F. (2020). The role of top management commitment to enhancing the competitive advantage through ERP integration and purchasing strategy. *International Journal of Enterprise Information Systems (IJEIS)*, 16(1), 53-68.
- Tonga, M.,Y.,Tonga , M. (2022). Endüstri 4.0’a Genel Bir Bakış: Sanayinin Geleceği.
- Töre, Başat, H. (2011). Çok Boyutlu Bir Performans Ölçüm Modeli Olarak Performans Prizması Ve “The London Youth” Örneği. *Afyon Kocatepe Üniversitesi, İ.İ.B.F. Dergisi*, 3(1), 13-37.
- Uçak, K.D. (2021). B2B Üretim Şirketlerinde Süreç Temelli Endüstri 4.0 Öz Değerlendirme Ve Bulanık Ahp İle Dijitalleşme Yol Haritası Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Uladi A. İ., Arı E. S. (2023). Büyük Veri Büyük Veri Analizi Ve Uygulama Alanları, *Yönetim Bilişim Sistemleri Dergisi*,9(1), 1-14.
- Uslu, B., Gür, Ş., Eren, T. (2019). Endüstri 4.0 Uygulaması İçin Stratejilerin Aas Ve Topsıs Yöntemleri İle Değerlendirilmesi. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology B- Theoretical Sciences*,7(1), 13-28.

- Wagire, A. A., Joshi, R., Rathore, A. P. S., & Jain, R. (2021). Development of maturity model for assessing the implementation of Industry 4.0: learning from theory and practice. *Production Planning & Control*, 32(8), 603-622.
- Waibel, M. W., Steenkamp, L. P., Moloko, N., Oosthuizen, G. A. (2017). Investigating the effects of smart production systems on sustainability elements. *Procedia Manufacturing*, 8, 731-737.
- Wang, D., & Shao, X. (2024). Research on the impact of digital transformation on the production efficiency of manufacturing enterprises: Institution-based analysis of the threshold effect. *International Review of Economics & Finance*, 91, 883-897.
- Wang, X., Ong, S.K., Nee, A.Y.C. (2016). A comprehensive survey of augmented reality assembly research. *Adv. Manuf.* 4 (1), 1–22.
- Wyrwicka, M. K., Mrugalska, B. (2017). Industry 4.0 towards opportunities and challenges of implementation. *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research*.
- Yang, X., Zhou, Z., Li, L., Zhang, X., (2023), Collaborative robot dynamics with physical human–robot interaction and parameter identification with PINN, *Mechanism and Machine Theory* ,189.
- Yavuz, E. (2016). Üretim Yapan İşletmelerin Yeniden Yapılandırılabilir Üretim Bakımından İncelenmesi: Erzurum İli Örneği, *Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 9(46), 857-865.
- Yıldız Tonga, M., Tonga, M. (2022). Endüstri 4.0’a Genel Bir Bakış: Sanayinin Geleceği. *G.Ü. İslahiye İibf Uluslararası E-Dergi*, 6(6), 40-60.
- Yıldızbaşı, A., & Ünlü, V. (2020). Performance evaluation of SMEs towards Industry 4.0 using fuzzy group decision making methods. *SN Applied Sciences*, 2(3), 355.
- Yılmaz, G. (2018). Seçilmiş ülkeler bazında e-ticaretin gelecek perspektifi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Yürük., Z. (2023). Veri Sorumlusunun Veri Güvenliğine İlişkin İdari Ve Teknik Tedbirleri Alma Yükümlülüğü. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 22(48), 899-920.
- Zeng, S., Zhou, J., Zhang, C., Merigo, J.M. (2022). Intuitionistic fuzzy social network hybrid MCDM model for an assessment of digital reforms of manufacturing industry in China. *Technological Forecasting & Social Change* 176, 121435.
- Zhang, C., & Lu, Y. (2021). Study on artificial intelligence: The state of the art and future prospects. *Journal of Industrial Information Integration*, 23, 100224.