



AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ



Gül EKŞİ

ÇEVİK ÜRETİM: İNSANSIZ DENİZ ARAÇLARI ÜZERİNE ENDÜSTRİ 4.0 VE
SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK PERSPEKTİFİNDEN BİR UYGULAMA

İşletme Anabilim Dalı
Doktora Tezi

Antalya, 2025



AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ



Gül EKŞİ

ÇEVİK ÜRETİM: İNSANSIZ DENİZ ARAÇLARI ÜZERİNE ENDÜSTRİ 4.0 VE
SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK PERSPEKTİFİNDEN BİR UYGULAMA

Danışman

Prof. Dr. Can Deniz KÖKSAL

İşletme Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Antalya, 2025

T.C.
Akdeniz Üniversitesi
Sosyal Bilimler Enstitüsü Müdürlüğüne,

Gül EKŞİ'in bu çalışması, jürimiz tarafından İşletme Anabilim Dalı Doktora Programı tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan	: Prof. Dr. Gökhan AKYÜZ	(İmza)
Üye (Danışman)	: Prof. Dr. Can Deniz KÖKSAL	(İmza)
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Serhan SEKRETER	(İmza)
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Bülent ÇEKİÇ	(İmza)
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Çiğdem AKBAŞ	(İmza)

Tez Başlığı:

Çevik Üretim: İnsansız Deniz Araçları Üzerine Endüstri 4.0 ve
Sürdürülebilirlik Perspektifinden Bir Uygulama

Onay: Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

Tez Savunma Tarihi : 16/07/2025

Mezuniyet Tarihi : 18/09/2025

AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “Çevik Üretim: İnsansız Deniz Araçları Üzerine Endüstri 4.0 ve Sürdürülebilirlik Perspektifinden Bir Uygulama” adlı bu çalışmanın, akademik kural ve etik değerlere uygun bir biçimde tarafımdan yazıldığını, yararlandığım bütün eserlerin kaynakçada gösterildiğini ve çalışma içerisinde bu eserlere atıf yapıldığını belirtir; bunu şerefimle doğrularım.

Gül EKŞİ





T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ



15 / 09 / 2025

TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU BEYAN BELGESİ

Öğrenci Bilgileri	
Adı-Soyadı	Gül EKŞİ
Öğrenci Numarası	201952013001
Anabilim Dalı	İşletme
Programı	İşletme, Doktora
Danışman Öğretim Üyesi Bilgileri	
Unvanı, Adı-Soyadı	Prof. Dr. Can Deniz KÖKSAL
Doktora Tez/Yüksek Lisans Tez/Dönem Projesi Başlığı	Çevik Üretim: İnsansız Deniz Araçları Üzerine Endüstri 4.0 ve Sürdürülebilirlik Perspektifinden Bir Uygulama
Turnitin Bilgileri	
Ödev Numarası	2394442758
Rapor Tarihi	15 Eylül 2025
Benzerlik Oranı	Alıntılar hariç: %4 Alıntılar dahil: %4
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE,	
Yukarıda bilgileri bulunan öğrenciye ait tez çalışmasının a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana Bölümler ve d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam -186- sayfalık kısmına ilişkin olarak Turnitin adlı intihal tespit programından Sosyal Bilimler Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esaslarında belirlenen filtrelemeler uygulanarak yukarıdaki detayları verilen ve ekte sunulan rapor alınmıştır. Danışman tarafından uygun olan seçenek işaretlenmelidir: ☒ Benzerlik oranları belirlenen limitleri aşmıyor ise: Yukarıda yer alan beyanın ve ekte sunulan Tez Çalışması Orijinallik Raporunun doğruluğunu onaylarım. ☐ Benzerlik oranları belirlenen limitleri aşıyor, ancak tez/dönem projesi danışmanı intihal yapılmadığı kanısında ise: Yukarıda yer alan beyanın ve ekte sunulan Tez Çalışması Orijinallik Raporunun doğruluğunu onaylar ve Uygulama Esaslarında öngörülen yüzdelik sınırlarının aşılmasına karşın, aşağıda belirtilen gerekçe ile intihal yapılmadığı kanısında olduğumu beyan ederim.	
Gerekçe:	
Benzerlik taraması yukarıda verilen ölçütlere uygun olarak tarafımda yapılmıştır. İlgili tezin orijinallik raporunun uygun olduğunu beyan ederim. Danışman Öğretim Üyesi Prof. Dr. Can Deniz KÖKSAL İmza	

İÇİNDEKİLER

ŞEKİLLER LİSTESİ.....	iii
TABLOLAR LİSTESİ.....	iv
KISALTMALAR LİSTESİ	v
ÖZET.....	vi
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
GİRİŞ	1

BİRİNCİ BÖLÜM

ÇEVİK ÜRETİM, ENDÜSTRİ 4.0 VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK KAVRAMLARININ TEMEL ÖZELLİKLERİ

1.1. Çeviklik ve Çevik Üretim.....	7
1.1.1. Çeviklik Yetenekleri ve Göstergeleri	8
1.1.2. Çeviklik Stratejileri.....	17
1.2. Endüstri 4.0	26
1.2.1. Endüstri 4.0 Teknolojileri	30
1.2.2. Endüstri 4.0'ın Bileşenleri	49
1.2.3. Endüstri 4.0'ın Tasarım İlkeleri	54
1.3. Sürdürülebilirlik Kavramının Temel Özellikleri.....	57
1.3.1. Sürdürülebilirlikten Sürdürülebilir Kalkınmaya Geçiş.....	58
1.3.2. Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları	60

İKİNCİ BÖLÜM

ENDÜSTRİ 4.0, SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE İNSANSIZ DENİZ ARACI PERSPEKTİFLERİNDEN ÇEVİK ÜRETİM DEĞERLENDİRMESİ

2.1. Literatür Taraması	65
2.2. Çevik Üretim Kavramının Tarihsel Gelişimi.....	68

2.2.1. Başlangıç Dönemi (1982-1993)	68
2.2.2. 90'lar Ortaları ve 2000'lerin Başlangıcı (1994-2001)	68
2.2.3. Endüstri 4.0'a Kadar Yaşanan Duraksama Dönemi (2002-2010).....	70
2.2.4. 2011'den Pandemiye Kadar Yaşanan Sakin Yükseliş (2011-2019).....	72
2.2.5. 2020 Covid-19 Pandemisi ve Sonrası.....	74
2.3. İnsansız Deniz Aracı	78

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

ENDÜSTRİ 4.0, SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE ÇEVİK ÜRETİM KAVRAMSAL ÇERÇEVESİ KAPSAMINDA İNSANSIZ DENİZ ARACI ÜRETİM SÜREÇLERİ HAKKINDA BİR DEĞERLENDİRME

3.1. Amaç.....	82
3.2. Kapsam	83
3.3. Soru Formunun Oluşturulması.....	84
3.4. Analiz Türünün Belirlenmesi.....	85
3.5. Uygulama.....	87
3.5.1. Bulanık Delphi	89
3.5.2. Bulanık TOPSIS	97
3.6. Bulgular ve Tartışma	110
3.6.1. Bulanık Delphi Bulguları.....	111
3.6.2. Bulanık TOPSIS Bulguları.....	125
SONUÇ	128
K A Y N A K Ç A.....	144
EK 1 BULANIK DELPHI SORU FORMU	164
EK 2 BULANIK TOPSIS SORU FORMU	168
ÖZGEÇMİŞ	173

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 Endüstri 4.0'ın Temel Koşulları.....	29
Şekil 1.2 Sürdürülebilirliğin Temel Boyutlarının Dönüşümü.....	61
Şekil 1.3 BM'nin Çalıştığı Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları.....	62
Şekil 2.1 Literatür Taraması Sonucu Erişilen Yayınların Yıllara Göre Sıralanması.....	67
Şekil 3.1 Tez İş Akış Aşamaları.....	88
Şekil 3.2 Karar Probleminin Hiyerarşik Yapısı.....	103



TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1 Literatür Taramasında Kullanılan Anahtar Kelimeler.....	66
Tablo 3.1 Dilsel Terimler ve Üçgen Bulanık Değerler.....	92
Tablo 3.2 Tedarik Zinciri Kategorisinde Yer Alan İfadelerin BDELPHI Yöntemine Göre Değerlendirilmesi.....	94
Tablo 3.3 Bulanık Delphi Sonrası ÇYG'ler.....	96
Tablo 3.4 Bulanık Delphi Sonrası ÇS'ler.....	96
Tablo 3.5. Bulanık TOPSIS Analizinde Yer Alan Karar Vericilerin Demografik Bilgileri...	101
Tablo 3.6 Dilsel Değişkenler ve Üçgen Bulanık Sayı Karşılıkları.....	103
Tablo 3.7 Karar Vericilerin TE01 Kriterine Göre Alternatifleri Dilsel Değişkenlerle Değerlendirmesi.....	105
Tablo 3.8 TE01 Kriterine Göre Alternatiflerin Değerlendirme Sonuçlarının Üçgen Bulanık Sayı Karşılıkları.....	105
Tablo 3.9 Örnek Bulanık Karar Matrisi ($\tilde{D}$).....	106
Tablo 3.10 Bulanık Karar Matrisi.....	106
Tablo 3.11 Normalize Edilmiş Bulanık Karar Matrisi.....	107
Tablo 3.12 Ağırlıklı Normalize Edilmiş Bulanık Karar Matrisi.....	108
Tablo 3.13 Pozitif İdeal Çözümlere Olan Uzaklıklar.....	108
Tablo 3.14 Negatif İdeal Çözümlere Olan Uzaklıklar.....	108
Tablo 3.15 Alternatiflerin FPIS ve FNIS'ue Olan Uzaklıkları.....	109
Tablo 3.16 Bulanık TOPSIS'e Göre Çeviklik Stratejileri Alternatiflerinin Sıralaması.....	110

KISALTMALAR LİSTESİ

3D	Three Dimensional / Üç Boyutlu
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AI	Artificial Intelligence / Yapay Zekâ
AR	Augmented Reality / Artırılmış Gerçeklik
BDELPHI	Bulanık Delphi
BKH	Binyıl Kalkınma Hedefleri
Bkz	Bakınız
BM	Birleşmiş Milletler
BTOPSIS	Bulanık TOPSIS
CPS	Cyber Physical Systems / Siber Fiziksel Sistemler
ÇS	Çeviklik Stratejileri
ÇYG	Çeviklik Yetenekleri ve Göstergeleri
DSN	Dijital Tedarik Ağları
ENSO	El Niño Güney Salınımı
İDA	İnsansız Deniz Aracı
IIoT	Industrial Internet of Things / Endüstriyel Nesnelerin İnterneti
IoS	Hizmetlerin İnterneti
IoT	Nesnelerin İnterneti
ISGLSAMS	Entegre Sürdürülebilir-yeşil-yalın-altı Sigma-çevik Üretim Sistemi
KOBİ	Küçük ve Orta Ölçekli İşletmeler
RFID	Radio Frekansı ile Tanımlama
SKA	Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları
TOPSIS	Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution
UNEP	BM Çevre Programı
VR	Virtual Reality / Sanal Gerçeklik
WoS	Web of Science
YTO	Yazar Tarafından Oluşturulmuştur

ÖZET

Çevik üretim kavramı literatürde uzun süredir tartışılmasına rağmen esas gelişimini özellikle son on yılda kaydetmiştir. Literatür taraması, bu ilginin artışında Endüstri 4.0 uygulamalarının yaygınlaşması, hızla değişen müşteri talepleri, ekonomik dalgalanmalar, iklim krizleri ve Covid-19 gibi küresel şokların belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Bu gelişmeler, çevikliğin yalnızca rekabet avantajı sağlamak için değil, aynı zamanda belirsizlik ortamında işletmelerin varlığını sürdürebilmesi için kritik bir unsur haline geldiğini göstermektedir. Bu bağlamda çalışmada, Endüstri 4.0'ın çevik üretimi daha sürdürülebilir kılma potansiyeli incelenmiş ve araştırmanın ampirik kısmı, çeviklik ihtiyacının en yoğun hissedildiği alanlardan biri olan İnsansız Deniz Araçları (İDA) üretim süreçlerine odaklanmıştır.

Literatür doğrultusunda çeviklik stratejileri (ÇS) ile çeviklik yetenekleri ve göstergeleri (ÇYG) tanımlanmış; sektör uzmanları ve akademisyenlerden elde edilen görüşlerle 68 ifadeden oluşan kapsamlı bir soru formu hazırlanmıştır. Uzman görüşleri Bulanık Delphi yöntemiyle analiz edilmiş, görece düşük önem atfedilen ifadeler elenmiş ve sonuçta 13 ÇYG ile 12 ÇS geçerliliğini korumuştur. Ardından Bulanık TOPSIS yöntemi uygulanarak bu stratejiler önem sırasına konulmuş ve TES01 kodlu “Finansal Güç ve Teknolojik Yetenekler” stratejisi en kritik strateji olarak öne çıkmıştır. Buna karşılık, en az kritik strateji ise SOS08 kodlu “Risk Yönetimi” olmuştur. Bu bulgu, çevikliğin teknoloji ve finansal yetkinliklerle daha güçlü ilişkilendirildiğini, risk yönetiminin ise destekleyici fakat ikincil bir rol üstlendiğine işaret etmektedir. Sürdürülebilirlik kategorisine ait olan SÜS03 kodlu “Çevik ve Çevreci Üretim” stratejisinin ikinci sırada yer alması ise çalışmanın amacını destekleyen bir bulgu olarak değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çevik Üretim; Endüstri 4.0; Sürdürülebilirlik; İnsansız Deniz Aracı; Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri

ABSTRACT

**AGILE PRODUCTION: AN APPLICATION ON UNMANNED SURFACE
VEHICLES FROM THE PERSPECTIVE OF INDUSTRY 4.0 AND
SUSTAINABILITY**

Although the concept of agile production has long been debated in the literature, its substantive development has taken place particularly over the past decade. A review of the literature indicates that the proliferation of Industry 4.0 applications, rapidly changing customer demands, economic fluctuations, climate crises, and global shocks such as the Covid-19 pandemic have been decisive factors in this growing interest. These developments demonstrate that agility has become a critical element not only for securing competitive advantage but also for ensuring organizational survival in an environment of uncertainty. In this context, the present study examines the potential of Industry 4.0 to render agile production more sustainable, with the empirical part of the research focusing on the production processes of Unmanned Surface Vehicles (USVs), one of the domains where the need for agility is most strongly felt.

In line with the literature, agility strategies (ÇS) and agility capabilities and indicators (ÇYG) were defined, and a comprehensive questionnaire consisting of 68 items was developed based on the insights of industry experts and academics. The expert evaluations were analyzed using the Fuzzy Delphi method, through which items assigned relatively low importance were eliminated, resulting in the retention of 13 ÇYGs and 12 ÇSs. Subsequently, the Fuzzy TOPSIS method was applied to rank these strategies in order of importance. The strategy coded TES01, “Financial Strength and Technological Capabilities,” emerged as the most critical, whereas the least critical was identified as SOS08, “Risk Management.” This finding suggests that agility is more strongly associated with technological and financial competencies, while risk management assumes a supportive yet secondary role. Moreover, the placement of the sustainability-related strategy coded SUS03, “Agile and Environmentally Friendly Production,” in the second rank constitutes a finding that directly supports the aim of this study.

Key Words: Agile Production; Industry 4.0; Sustainability, Unmanned Surface Vehicle; Multi-criteria Decision Making Methods

TEŞEKKÜR

Doktora sürecimde bilgi birikimi, rehberliği ve çözüm odaklı yaklaşımıyla her adımda yanımda olan, beni benden daha fazla düşünen danışmanım Sayın Prof. Dr. Can Deniz KÖKSAL'a şükranlarımı sunarım. Tez İzleme Komitesi'nde yer alarak yapıcı katkıları ve yönlendirmeleriyle yolumu aydınlatan değerli hocalarım Prof. Dr. Gökhan AKYÜZ ve Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Serhan SEKRETER'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Düştüğüm her an elimden tutan ve hiç bırakmayan Dr. Öğr. Üyesi Müzeyyen Çiğdem AKBAŞ'a ve uzaklığın sadece fiziksel bir şey olduğunu hep yanı başımdaymış gibi hissettirerek bana öğreten Dr. Öğr. Üyesi Bülent ÇEKİÇ'e hayatımdaki varlıkları için çok teşekkür ederim. Her koşulda, her yerde ve her derdimde yanımda olduklarına şükrettiğim, bugün olduğum kişi olmam için sayısız fedakârlık yapan annem Sevdije EKŞİ ve babam Arif EKŞİ'ye çalışmalarım boyunca gösterdikleri sabır ve destek için çok teşekkür ederim. Bu zorlu süreçte derdimi dinleyen, yardım eden ve bana sosyal destek sağlayan isimlerini saymakla bitiremeyeceğim bütün dostlarıma sonsuz minnetlerimi sunarım. Akıl sağlığını korumama yardımcı olan tiyatro eserlerine, yoga pratiklerine, caz müziğine, sokak hayvanlarına ve örgü yumaklarına ayrıca teşekkür ederim. Son olarak; bu yolculuğa neşe, güç ve sınırsız sevgi katan müstakbel eşim Doğan AKDENİZ'e sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

GİRİŞ

İş dünyası, sanayileşmenin yeni başladığı dönemlere kıyasla çok daha çetin bir rekabet ortamına dönüşmüş ve işletmelerin yürütmeleri gereken faaliyetler her geçen gün daha karmaşık ve belirsiz hale gelmiştir. Özellikle Endüstri 4.0'ın etkileriyle gelişim hızı son yıllarda fazlasıyla artan teknolojiler işletmelerin uyum sağlama çabalarını daha da zorlaştırmıştır. İşletmelerin bir yandan bu değişime kucak açmak için gerekli özelliklere sahip olması bir yandan da hızlı hareket etmeyi öğrenmesi gerekmektedir. Bu gereklilikler, kısaca çevik üretim ile ifade edilebilir. Çok yönlü gereklilikleri bünyesinde barındıran çevik üretim işletmeler tarafından gerçekleştirilmeye çalışılırken göz ardı edilmemesi gereken bir diğer kavram da sürdürülebilirliktir. Çevik olmak, teknolojiye ve değişen rekabet ortamına uyum sağlamak ve bu sayede ayakta kalmak günümüzde nasıl her işletme için elzem ise, sürdürülebilirlik ve çevre konusunda harekete geçmek de gezegendeki bütün insanlar için aynı önemi taşımaktadır. Son yıllardaki çevre raporları ve içinde bulunduğumuz iklim krizi çevre ile ilgili olumsuz sinyalleri çok güçlü bir şekilde verirken özellikle bu olumsuzluklara neden olan endüstriyel üretimcilerin sürdürülebilirlik konusunda somut adımlar atmaları gerekmektedir.

Çevik üretim kavramının doksanlı yıllarda öne çıkmaya başlaması, operasyonel olarak çevikliğe olan ihtiyacı gösterirken, yetersiz teknolojiler ve dayanaksız kavramsal çerçeveler nedeniyle çevik üretim sistemlerinin etkili bir şekilde uygulanamadığı söylenebilir. Ayrıca çevik üretim, aşırı tüketimi tetikleyebilmesi nedeniyle sürdürülebilirliğin önem arz ettiği günümüzde ağır eleştirilere maruz kalabilmektedir. Bu nedenle sürdürülebilirlik, çevik üretim söz konusu olduğunda göz ardı edilmemesi gereken önemli faktörlerden biridir. Günümüzde sürdürülebilirlik, artık teorik bir kavram olmaktan çıkmış; iklim krizinin getirdiği gözle görülür zararlar bu konuda acilen harekete geçilmesi gerektiğini göstermiştir. Copernicus İklim Değişikliği Servisi (C3S) tarafından 2025 yılının Ocak ayında yayınlanan rapora göre, 2024 yılının küresel olarak kayıtlara geçen en sıcak yıl ve ortalama küresel sıcaklığın sanayi öncesi seviyesinin 1,5°C üzerine çıktığı ilk takvim yılı olduğu belirlenmiştir. İnsan kaynaklı iklim değişikliği, hava ve deniz yüzeyi sıcaklıklarının artışının başlıca nedeni olmaya devam ederken; Pasifik Okyanusu'nda meydana gelen ve küresel hava koşullarını etkileyen doğal iklim döngüsü El Niño Güney Salınımı (ENSO) gibi diğer faktörler de yıl boyunca gözlemlenen olağandışı sıcaklıklara yol açmıştır. 2024 yılında yaşanan bu olağanüstü koşullara dikkat çekmek için Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi (ECMWF), Amerikan Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA), Amerikan Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesi (NOAA), Birleşik Krallık Meteoroloji Kurumu, Berkeley Earth ve Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO)

gibi birçok kuruluş ortak çaba göstermiştir. Tüm dünyanın farklı şekillerde gündeme aldığı bu durumun üretim yönetimi söz konusu olduğunda da dikkate alınması zorunluluk arz etmektedir.

Üretim süreçleri düşünüldüğünde Endüstri 4.0 uygulamalarının 2011'den bu yana kat ettiği yolun, sistemlerin sürdürülebilir niteliğe kavuşmasındaki en önemli faktörlerden biri olduğu düşünülebilir. Bu gelişme çevik üretim perspektifinden değerlendirildiğinde sürdürülebilirlik anlamında benzer kazanımların elde edildiği söylenebilir. Dolayısıyla bu kazanımlar literatüre de etki etmiş; son yıllardaki yayın içerikleri dikkate alındığında kayda değer değişimlerin yaşandığı görülmüştür. Buradan hareketle bu çalışmada çevik üretim kavramı temel alınarak ve Endüstri 4.0 ve sürdürülebilirlik bakış açıları göz önünde bulundurularak bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Buna göre, Endüstri 4.0'ın üretim sistemlerini dijitalleştirilmesiyle üretim süreçlerinin otomasyonu artabilmekte, bu da hataları minimize ederken üretim taleplerindeki hızlı değişimlere proaktif bir şekilde karşılık vermenin önünü açmaktadır. Bu şekilde işletmeler çevik üretim stratejileri uygulayabilmekte, bunu yaparken özellikle israfı ve zararlı atıkları minimize ederek sürdürülebilirlik perspektifiyle hareket edebilmektedir. Dolayısıyla süreç hem müşteri dostu hem kullanıcı dostu hem de çevre dostu bir niteliğe kavuşmaktadır. Ancak burada unutulmaması gereken nokta, her sektörün her zaman çevik olmaya ihtiyaç duyup duymadığıdır. Örneğin, normal şartlarda faaliyetlerini sürdüren bazı işletmeler, pandemide çevik yeteneklerden yoksun ve olası krizlere hazırlıksız oldukları için varlıklarını sürdürememiştir. Özellikle 2020 yılının ilk aylarında kişisel koruyucu ekipmanı ve maske talebinde patlama yaşanmış, bu ürünlerin üretiminde ve tedarikinde ciddi sorunlar yaşanmıştır. Bu durum hem sağlık kuruluşlarını hem de üreticileri şimdiye kadar hiç karşılaşmadıkları bir biçimde zorlamıştır. Örneğin, 3M firması, N95 maske üretimini ayda 20 milyondan 95 milyona çıkarmış, ancak bu miktar da talebi karşılamaya yetmemiştir (3M Company, 2020). Ayrıca, birçok ülkenin kullandığı ve %70'inden fazlasının Çin'de üretildiği sağlık ekipmanlarının üretimi pandemi nedeniyle azalmış ve bu da ihracat kısıtlamalarına ve tedarik zincirinde hayati aksamalara neden olmuştur (Bown, 2022: 14; Ye vd.: 2022, 6). Alter'e göre (2020) arz konusunda çaba sarf eden bazı küçük ve orta ölçekli işletmelerin (KOBİ), üretim sistemlerini maske yapımına göre düzenlemelerine rağmen tıbbi standartlar konusunda hazırlıklı olmamaları, gerekli hammaddelere ulaşmakta zorlanmaları ve koordinasyon eksikliği yaşamaları nedeniyle bu çabalarının etkisinin sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu ve benzeri örnekler, yaşanan zorlukların çok boyutlu olduğunu, yerel ve küresel tedarik zincirlerinin ve üretim kapasitelerinin dikkatle düzenlenmesi gerektiğini göstermiştir. Normal şartlardan çok daha fazla kar elde edebilme potansiyeli mevcutken, yeterli reaksiyonu gösteremeyen üreticiler nedeniyle kuruluşlar hayatta kalma konusunda önemli bir sınav vermiştir. Öte yandan özellikle

dijitalleşmeyi bütün departmanlarında belirli bir ölçüde sağlayan ve bu sayede çevik bir şekilde hareket ederek pandemi sürecini olabilecek en az zararla atlatan işletmeler, yeni gelişmelere uyumlanmakta çok zorlanmamış, olağanüstü koşullara kısa sürede adapte olmuştur. Örneğin Amazon, artan talebi karşılamak için tedarik zincirini hızla yeniden yapılandırmış ve operasyonel verimliliğini artırmıştır. Pandemi sırasında doğal olarak artan çevrimiçi talebi karşılamak amacıyla sipariş tahmini, stok yönetimi ve rota optimizasyonu için yapay zekâ (AI) ve büyük veri kullanmaya başlamıştır. Otomatikleşen stok yenileme sistemi ve temassız teslimat altyapısıyla pandemiye oldukça çevik bir yanıt veren Amazon, tedarik zincirinde yaşanan gecikmeleri en aza indirmiş ve tedarik zinciri verimliliğinde de başarı sağlamıştır (Ajaegbu, 2022: 367). Benzer bir şekilde Alibaba da dijital ticaret faaliyetlerini optimize etmiş ve çevrimiçi talepleri karşılamıştır. Alibaba, pandemi başladıktan sonra dijital platformlarını hızlıca maske ve eldiven gibi sağlık ürünlerinin tedarikine açmıştır. “Green Channel” isimli özel lojistik hatlarını kurmuş, dijital panellerle tedarikçilerine dijital eşleştirme yapmış ve arz-talep dengesini sağlayarak öncelikli ürünlerin teslimatlarının hızlanmasını sağlamıştır. Ek olarak AI desteğiyle sahte ürünlerin tespit edilmesini sağlamış; stok yönetimi ve talep tahmini gibi konularda iyileştirmeler gerçekleştirmiştir. Alibaba ayrıca KOBİ’lerin dijital ticaret ortamına geçişini çevrimiçi eğitimler ve teknik destek ile kolaylaştırmıştır (Zhang ve Ma, 2022: 372). Her iki örnek de dijitalleşen ve teknolojik altyapısı belirli bir seviyede olan işletmelerin olağanüstü durumlarda çevik, yenilikçi ve veriye dayalı alternatif yöntemlerle bu süreci görece başarılı bir şekilde yönetmeleri üretim yönetimi literatürü için oldukça çarpıcıdır.

Sonuç olarak, çeviklikle ilgili aşama kat edilmesinde pandeminin büyük ölçüde itici bir unsur olduğu görülse de 2011’den beri hayatımızda olan Endüstri 4.0 gelişmelerinin olgunlaşmasının süreci hızlandığı unutulmamalıdır. Robotikteki gelişmeler, insansız fabrikalar, siber fiziksel sistemler (CPS), nesnelerin interneti (IoT), büyük veri ve diğer bütün Endüstri 4.0 aktörleri, üretim süreçlerinin minimum hatayla, çevreci bir perspektifle ve bir insandan daha hızlı olacak şekilde tamamlanmasını sağlamış, böylece üretimin çevikleşmesi konusunda ciddi bir aşama kat edilmiştir. Literatürde geline bu noktadan ilhamla çevik üretimin Endüstri 4.0’ın etkisiyle daha sürdürülebilir bir şekilde uygulanabilirliği üzerine bir araştırma yapılmasına karar verilmiştir. Bu amacı derinleştirilebilmek adına bu çalışma aşağıdaki sorulara yanıt aramıştır:

- Endüstri 4.0 uygulamaları çevik üretimi sürdürülebilir niteliğe getirebilir mi?
- Çevik Üretim ile Endüstri 4.0 arasında nasıl bir ilişki vardır?
- Çevik Üretim ile Sürdürülebilirlik arasında nasıl bir ilişki vardır?
- Sürdürülebilirlik ile Endüstri 4.0 arasında nasıl bir ilişki vardır?

- Çevik üretimin, talepkâr müşterinin değişen isteklerine yanıt vererek hızlı tüketimi artırıcı özelliği Endüstri 4.0 uygulamaları sayesinde sürdürülebilir bir yapıya evrilebilir mi?

Çeviklik konusunda en büyük yanılgılardan biri, her kurumun aynı ölçüde ve şekilde çevik olması gerektiğidir. Elbette bir kuruluşun kendi ekosistemindeki her paydaşının ortak fayda sağlayacak derecede çevik olması beklenir ve sistemin çevikleşmesi için bu gereklidir ancak her sektör ve her kuruluş kendi özelliklerine göre çeviklik stratejisini belirlemelidir. Örneğin, teknoloji odaklı kuruluşların yüksek seviyede çevikliğe sahip olması, rekabet edebilirlikleri açısından oldukça önemliyken, gıda üzerine faaliyet gösteren kuruluşların bu seviye bir çevikliğe sahip olması o kadar önemli olmayabilir. Dolayısıyla çeviklik, işletmelerin kendilerini, çevrelerini, ihtiyaçlarını ve hedef kitlelerini iyi analiz ederek gerçekleştirmesi gereken bir olgudur. Buradan hareketle yukarıda belirtilen araştırma soruları ışığında bu araştırmanın ampirik kısmı için; teknoloji odaklı çalışan, çevik olma zorunluluğu bulunan ve son yıllarda önemi artmış sektörlerden İDA üretimi üzerine bir analiz yapılması kararlaştırılmıştır. Strandhagen ve diğerleri 2022 yılında yayınlanan çalışmalarında gemi inşa endüstrisinin ciddi bir ekonomik baskı altında olduğunu, operasyonlarını güvence altına almak için daha verimli çözümlere ihtiyaç duyduğunu ve toplumsal dinamiklere uyumlanarak yeşil denizcilik uygulamalarına geçilmesi gerektiğini belirtmiş; denizcilik endüstrisinin sürdürülebilirliğin üç boyutunda da baskı altında olduğunu vurgulamıştır. Hem sektörün çevik ve sürdürülebilir olmaya yönelik ihtiyacı ve gayreti, hem İDA ile ilgili özellikle işletme literatüründe olan boşluk hem de araştırmacının konumu dolayısıyla İDA üretimi yapan işletmelere yakınlığından dolayı bu araştırmanın İDA üretimi üzerinde gerçekleştirilmesi düşünülmüştür.

Literatür incelendiğinde, özellikle askeri anlamda bugün sahip olunan denizcilik ile ilgili taktik ve teknolojik yeteneklerinin çoğunun İkinci Dünya Savaşı'nda edinilen deneyimlere dayandığı; savaşın, hala geçerliliğini koruyan yaklaşım ve öğretilerin çıkış noktası olduğu söylenebilir (Fırat, 2024: 8). Bu deneyimlerin çıktıları, barış dönemlerinde teknolojik ilerlemelerle belli bir olgunluğa gelmekte, öte yandan karşı tedbir çalışmalarıyla da alandaki ilerlemeleri sürdürebilmektedir. Artık teknoloji öngörülmesi giderek zorlaşan bir hızla ilerlemektedir. Bu durum, teknolojik gelişmelere uyum sağlama zorunluluğunun kısa vadede gerçekleştirilmesi gereken bir yetenek olmasını, hatta mevcut düzenlemelerin güncel teknolojik gelişmelerle uyumlanmasını gerektirmektedir. Önceleri sistemlerin ihtiyaçları teknolojik gelişmelere yön verirken artık teknolojiler sistemlerin oluşumunda rol oynamaktadır. İDA'ların da aslında benzer bir şekilde ortaya çıktığı düşünüldüğünde, bu çalışma kapsamında değerlendirmeye alınmaları oldukça makuldur.

Araştırma kapsamında olan kavramları içeren 58 farklı anahtar kelime grubuyla detaylı bir literatür taraması yapılmış; erişilebildiği kadarıyla “Çevik Üretim”, “Endüstri 4.0” ve “Sürdürülebilirlik” kavramlarının hepsine bünyesinde yer veren ender çalışmalardan biri olan Agarwal ve diğerlerinin 2023 tarihli “Role of Industry 4.0 in agile manufacturing to achieve sustainable development” isimli makalesi bu araştırma için bir yol gösterici olarak değerlendirilmiş, araştırmanın özellikle ampirik kısmında bu çalışmadan ilham alınmıştır. Tarama sonucunda ulaşılan yayınlardan elde edilen bulgularla yol gösterici çalışmada kullanılan soru formu güncellenmiştir. Oluşturulan soru formuyla İDA üretiminde aktif görev alan sektör uzmanlarına iki aşamalı karma bir metodoloji uygulanmıştır. Soru formunun iki bölümünü oluşturan “çeviklik yetenek ve göstergeleri” (ÇYG) ile “çeviklik stratejileri” (ÇS) ifadeleri belirlenmiş; bu ifadelere üretim yönetimi alanında çalışan akademisyen ve İDA sektör uzmanlarının görüşleri dikkate alınarak son hali verilmiştir. Oluşturulan soru formu ile farklı işletmelerden 17 sektör uzmanından yüz yüze ve online olarak veri toplanmıştır. Toplanan veriler önce Bulanık Delphi (BDELPHI) yaklaşımı kullanılarak, önem derecelerine göre değerlendirilmiş olup; sektör uzmanlarınca görece önemsiz bulunan ve istenmeyen yetenekler, göstergeler ve stratejiler soru formundan çıkarılmıştır. Ardından, kalan ifadelerle yeniden düzenlenen soru formu, tekrar sektör uzmanlarına sunulmuş ve veri toplama sürecinin ikinci aşaması tamamlanmıştır. İkinci aşamada toplanan veriler Bulanık TOPSIS (BTOPSIS) yöntemi ile analiz edilmiş; görece önemli bulunan ve ulaşılmak istenen stratejilerin ve bu stratejilerin gerçekleştirilmesinde önemli ölçüde katkıları bulunan yetenek ve göstergelerin belirlenmesi sağlanmıştır. Metodolojilerin bulanıklaştırılması, karar verme sürecine belirsizlik ve muğlaklığın dahil edilmesine yardımcı olurken, farklı sektörler için gerçekleştirilmesi planlanan uygulamalarda sektör özelinde yetenek, gösterge ve stratejilerin önceliklendirilmesine katkıda bulunmaktadır (Agarwal vd., 2023: 3671). Elde edilen sonuçlar, özellikle işletmelerin dahil olduğu ekosistemlerdeki tüm paydaşların kaynak değerlendirme, dayanıklılık, sürdürülebilirlik, dijitalleşme ve çeviklik gibi birçok kavram arasında bağlantı kurmalarına katkıda bulunacak ÇS’lerin belirlenmesine yardımcı olmuştur. Bu sayede karar vericiler, politika yapıcılar ve yöneticiler kendilerine göre en önemli stratejilere odaklanabilecek, üretim süreçlerini buna göre düzenleyebilecektir. Analiz sonuçlarına göre uygulayıcılar, çalışmada önerilen ÇYG’leri edinmeye; bu edinimin katkılarıyla ÇS’lerini uygulamaya çalıştıkları takdirde kendi çalışma sistemlerinde esnekliği sağlayabilir, muhtemel değişimlere hazırlıklı olabilir, dinamik bir yapıya kavuşurken çevreci bir tutumla faaliyetlerini yürütebilir.

Bu kapsamda gerçekleştirilen çalışma  bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde evik retim, Endüstri 4.0 ve Sürdürülebilirlik konusunda kavramsal bilgiler verilmiş; ikinci bölümde evik retim kavramı temel alınarak bu üç kavramın İDA retimi literatüründe nasıl bir gelişim gösterdiği incelenmiş; üçüncü bölümde literatür taramasından ilhamla ampirik çalışma gerçekleştirilmiş; son olarak Sonuç, Kaynakça ve Ekler ile çalışma sonlandırılmıştır.



BİRİNCİ BÖLÜM

ÇEVİK ÜRETİM, ENDÜSTRİ 4.0 VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK KAVRAMLARININ TEMEL ÖZELLİKLERİ

1.1. Çeviklik ve Çevik Üretim

Sanayi devrimi sonrasında şekillenmeye başlayan yönetim anlayışları, zamanının taleplerine yanıt verse de günümüzde geçerliliğini büyük ölçüde yitirmiştir. Teknolojide geleneksel yönetim biçimlerinin dijitalleşme, çevikleşme ve yanıt verebilirlik anlamında yeniden ele alınmasını gerektirmektedir. Günümüz şartlarına uyum sağlayamayıp zamanla yok olmak istemeyen işletmeler hayatta kalmak, rekabet etmek ve müşteri taleplerini doğru ve hızlı karşılamak için çevik olmak zorundadır (Denning, 2023).

Çeviklik kavramı, literatür taraması bölümünde detayları verildiği üzere birçok farklı şekilde tanımlanabilmektedir. Sektörel farklılıklar, teknolojiyle elde edilen gelişmeler, siyasi ve jeopolitik değişkenler, ekonomik krizler başta olmak üzere iklim krizi ve pandemi gibi küresel pek çok etken kavramın tanımlamalarını ve kavramla ilgili terimlerin kavramsallaştırılmasını etkilemiştir. Çeviklik ve çevik üretim ile ilgili literatürdeki önemli yayınlara bakıldığında da bu farklılıklar göze çarpmaktadır. Örneğin, konu hakkındaki en köklü kaynaklardan biri olan Yusuf ve diğerlerine göre (1999:33) çeviklik; bir işletmenin, örgütün ya da tedarik zincirinin beklenmedik, öngörülemeyen çevresel değişimlere hızla uyum sağlama ve rekabet avantajı elde etme yeteneği olarak tanımlanır. Bu tanım örgüt yapısı ve paydaşlarıyla ilişkili olarak değerlendirilebilir. Öte yandan yine alandaki önemli kaynaklardan biri olan Sharifi ve Zhang (1999: 23), çevikliği “değişen pazarlara ve müşteri taleplerine hızlı, esnek ve etkili bir şekilde yanıt verebilme” olarak ifade ederler. Bu tanımın ise daha rekabet ve pazarlama odaklı olduğu düşünülebilir. Lee de (2004: 102) benzer bir şekilde talepteki beklenmedik değişimlere atıfta bulunurken çevikliği tedarik zinciri üzerinden ele almıştır. Bunlar ve bunlar gibi literatürde yer alan tanımlamaların çeşitliliği, aslında çeviklik kavramının bütünsel ve çok yönlü özelliğinden kaynaklanmaktadır. Çünkü çeviklik işletmenin sadece kendisi ya da herhangi bir paydaşı veya faaliyeti ile ilgili değildir; çeviklik, işletmenin içsel süreçlerini ve dışsal koşullarını hızlı ve olabilecek en uyumlu şekilde düzenleyebilmesiyle müşteri talebini karşılayabilmesi ve bunu yaparken değer sağlayabilmesidir.

Gerçekleştirilen literatür taramasında tıpkı çevikliğin tanımında olduğu gibi çeviklikle bağlantılı terimlerde de dikkate alınması gereken birçok farklı sınıflandırmanın olduğu görülmüştür. Üretim yönetimi literatüründeki birçok kavram gibi bu kavramların gelişiminde de fikir birliğinin sağlanamadığı görülebilir. Üretim yönetiminin hem mühendislikten hem

yönetim disiplinlerinden beslendiği ve çok yönlü olduğu düşünüldüğünde alandaki kavramların tek bir tanımlamayla belirtilememesi olağandır. Bu nedenle çeviklik ile ilgili kavramlarda da çeviklik göstergeleri, unsurları, yetenekleri, sürücüleri, firmaları çevikliğe iten güçler vb. birçok sınıflandırma, benzer ya da aynı kavramların farklı şekillerde dile getirilmesine ve kavramsal belirsizliklere neden olmuştur (Walter, 2021: 345). Bu durum nedeniyle, bu terimlerin tanımları net bir şekilde oluşturulamamakta; terimlerle ilgili ölçüm ve karşılaştırma yapılması güç hale gelmektedir. Dolayısıyla çeviklik ve çeviklikle ilgili terimler çok boyutlu bir yapı olarak ele alınmalıdır (Asghar vd., 2025: 1). Buradan hareketle bahsi geçen kavramların değerlendirilmesi konusunda bir paradoksun olduğu görülebilir. Öyle ki, çevikliğin kendi yapısının bütünlük ve çok yönlü olduğu bilinmekte, dolayısıyla kendisi ile ilgili terimlerde ve tanımlamalarda fikir birliği sağlanamamakta, sonuç olarak bu terimlerin değerlendirilmesinde çok boyutlu düşünülmesi gerekmektedir. Bu nedenle bu çalışmada çeviklik terimlerinin sınıflandırması mümkün oldukça kapsamlı bir şekilde gerçekleştirilmeye çalışılmış, başta Agarwal ve diğerlerinin bu çalışma için temel alınan makalesi dikkate alınarak sınıflandırma aşamasında birçok kaynaktan faydalanılmıştır. Agarwal ve diğerleri kuruluşların çevik olmak için sahip olması gereken belli başlı özellikleri “çeviklik göstergeleri” olarak, çevik olma yolunda oluşturulan amaç ve hedefleri “çeviklik stratejileri” olarak adlandırmıştır. Bu çalışmada çevik olmak için sahip olunması gereken özelliklerin kapsamını biraz daha genişletmek adına sınıflandırma “çeviklik yetenekleri ve göstergeleri” (ÇYG) olarak ele alınmış, stratejiler (ÇS) için sınıflandırma aynı şekilde kullanılmıştır. Belirtilen sınıflandırmalarda yer alan alt kategoriler (Teknoloji ve Endüstri 4.0, Sürdürülebilirlik, Tedarik Zinciri, Müşteri Talebi, Stratejik ve Operasyonel, Diğer) literatürdeki çok sayıda kaynağa dayandırılarak geliştirilmiştir. Bir kategorinin altındaki bir ifade, o ifadenin sadece o kategoriyle ilişkili olduğu anlamına gelmemektedir. Mümkün oldukça kapsamlı bir şekilde gerçekleştirilen literatür taraması dikkate alınarak kategorize edilen ifadeler Çeviklik, Endüstri 4.0 ve Sürdürülebilirlik kavramları başta olmak üzere birçok olguyla bağlantı halindedir. Ancak bu ifadelerin bulundukları alt kategoriyle daha yakın bir ilişki içerisinde olduğu söylenebilir. İlerleyen bölümlerde bu kategorilerin ve ifadelerin detayları hakkında bilgi verilecektir.

1.1.1. Çeviklik Yetenekleri ve Göstergeleri

Çeviklik ve çevik üretim kavramında olduğu gibi ÇYG’lerin kavramsal olarak ne olduğu konusunda da literatürde farklılıklar bulunmaktadır. Bu alanda ortaya konulan ilk çalışmaların genellikle Sharifi ve Zhang’ın (1999) “çevik üretim” modelinden ilham alınarak oluşturulduğu görülmektedir. Bu model, döneminin en detaylı kavramsal çerçevelerinden biri

olarak nitelendirilebilir. Modele göre çeviklik, bir işletmenin kendi organizasyonel süreçlerinde ve dış çevresinde meydana gelen değişimlere verdiği tepkilerin hız, esneklik ve müşteri odaklılık boyutlarına sahip olması anlamına gelmektedir. Dolayısıyla her bir boyut için hem ölçülebilir göstergeler hem de bu göstergelerin elde edilmesini sağlayan yetenekler belirlenmiştir. Söz konusu kavramsal çerçeve, sonraki çalışmalara rehberlik edecek nitelikte ortaya çıkmış ve üretim yönetimi literatürünün başlıca kaynaklarından biri haline gelmiştir.

ÇYG'ler literatürde ayrı ayrı incelendiğinde, bu kavramların ne denli iç içe geçtiği açıkça ortaya çıkar; o kadar ki, bunlardan birini tanımlarken ötekisinden söz etmemek neredeyse imkânsızdır. Örneğin Sharifi ve Zhang (1999:9) çeviklik yeteneklerinin işletmenin çeviklik göstergelerini fiilen gerçekleştirebilmesi için sahip olması gereken özellikler, yetkinlikler ve kabiliyetler olduğunu; dolayısıyla bu iki kavramın birbirini tamamlayan iki boyut olduğunu belirtir. Bahsedilen özellikler, yetkinlikler ve kabiliyetler teknoloji, tedarik zinciri bileşenleri, insan kaynağı gibi birçok bileşeni bünyesinde barındırır ve bu bileşenler farklı çalışmalarda farklı şekillerle kategorize edilebilir. Sharifi ve Zhang (1999:10), yetenekleri dört ana faktör (Responsiveness/Tepki Verme Yeteneği, Competency/Yeterlik ve Uzmanlık, Flexibility/Esneklik, Speed/Hız) üzerinden sınıflandırırken; Overby ve diğerleri (2006) ise yetenekleri iki ana başlık altında toplamıştır (Sensing/Algılama, Responding/Tepki Verme). Literatürdeki örnekler elbette çoğaltılabilir, bu durum yeteneklerin sınıflandırılması konusunda genel bir kanı oluşmadığının göstergesidir. Yetenek tanımlamalarının “genel-geçer” olmaktan ziyade, işletmenin sektörü, ölçeği ve stratejik hedefleri doğrultusunda özelleştirilmesi gerekmektedir (Tallon ve Pinsonneault, 2011: 474). Bu nedenle stratejik, operasyonel ve iş gücü çevikliği gibi yetenekler başta olmak üzere birden fazla yetenek işletme koşullarının dinamizmi göz önünde bulundurularak belirlenmelidir (Asghar vd., 2025: 1).

Literatürde çeviklik göstergelerine ilişkin çalışmalar incelendiğinde, tıpkı çevikliğin kendisi ve çeviklik yeteneklerine dair tanımlamalarda olduğu gibi, göstergelerin tanımlanmasında da ortak bir görüşe ulaşılamadığı görülmektedir. Çoğu çalışma çeviklik göstergelerini “izlenebilir” ya da “ölçülebilir” olarak tanımlar. Örneğin Nudurupati ve diğerleri (2011: 243) çeviklik göstergelerinin işletmenin çevik davranışının “sayısal” olarak tanımlanmasını sağlayan metrikler olduğunu ifade eder. Christopher ve Towill (2001: 239) ise çeviklik göstergelerinin aslında kritik performans göstergeleri olduğunu belirtirken; bu göstergelerin sektörel farklılıklara sahip olduğunu ve bu nedenle göstergelerin standartlaştırılmasının zor olduğunu vurgular. Bu nedenle, her endüstride farklı sınıflandırmalar ve alt göstergeler öne çıkabilir.

ÇYG'lerin aralarındaki ilişkiyi genellemek gerekirse, bir işletmenin literatürde farklı şekillerde sınıflandırılan ve tanımlanan çeviklik göstergelerini elde edebilmeleri için sahip olması gereken ve işletme koşullarına göre değişiklik gösterebilen temel davranışlar ve teknik unsurlar çeviklik yetenekleri olarak adlandırılabilir. Başka bir deyişle, çeviklik göstergeleri işletmenin ne kadar çevik davrandığını sayısal olarak ölçen performans metrikleri olarak kabul edilirken; çeviklik yetenekleri bu metrikleri iyileştirmeye ve sürdürmeye olanak sağlayan organizasyonel, teknolojik ve kültürel altyapı unsurları olarak ifade edilebilir. Yani bu iki kavramı birbirinden ayrı düşünmek elde edilmesi hedeflenen sonuçlar açısından gerçekçi olmayacaktır. Gösterge-yetenek ilişkisinin sağlam temeller üzerine kurulması, işletmelerin zayıf noktalarını tespit ederek stratejik yatırım kararları almasını kolaylaştırır (Sharifi ve Zhang, 1999: 10; Nudurupati vd., 2011: 247). Her iki bileşenin de eş zamanlı olarak geliştirilmesi, bir firmanın veya tedarik zincirinin gerçek anlamda “çevik” bir yapıya kavuşabilmesi için zorunludur.

Daha önce de belirtildiği gibi, çeviklik ve çevik üretim ile ilgili kavramlar farklı disiplinlerden yayınlarda çok farklı şekillerde dile getirilip farklı şekillerde sınıflandırmalar yapılmıştır. Ancak görüldüğü üzere bu yayınların bir kısmı güncelliğini ve geçerliliğini yitirmiştir. Ayrıca halihazırda bir fikir birliği de bulunmadığı için doğrudan bu çalışmaların öne sürdüğü sınıflandırmaları kullanmak doğru olmayacaktır. Bu nedenle, erişilebildiği kadarıyla literatürde çevik üretim, endüstri 4.0 ve sürdürülebilirlik kavramlarını bünyesinde barındıran tek çalışma olan Agarwal ve diğerlerinin (2023) sınıflandırması temel alınarak ve gerçekleştirilen literatür taramasından faydalanılarak ÇYG'ler belirlenmiştir. Bu çalışma İDA'lar kapsamında gerçekleştirileceği için maddeler oluşturulurken bu durum göz önünde bulundurulmuş, sektör farklılıklarının ÇYG'ye olan yansımaları dikkate alınmıştır. ÇYG'ler belirlenirken Agarwal ve diğerlerinin çalışmasında yer alan ancak güncel tarihli referanslara sahip olmayan ifadeler bu araştırmanın kapsamından çıkarılmış, güncel tarihli ifadeler araştırmaya dahil edilmiş ve ayrıca gerçekleştirilen literatür taramasından faydalanılarak yeni ifadeler eklenmiştir. Yeni eklenen ifadelerin kaynakları aşağıdaki listelerde belirtilmiş olup, kaynak bilgisi bulunmayan ifadeler yazar tarafından oluşturulmuştur. Altı kategoride (Teknoloji ve Endüstri 4.0, Sürdürülebilirlik, Tedarik Zinciri, Müşteri Talebi, Stratejik ve Operasyonel, Diğer) toplam 39 ÇYG belirlenmiş; bu kategoriler ve ifadelere Üretim Yönetimi ve Sayısal Yöntemler alanlarında çalışmalar yapan akademisyenlerin katkılarıyla son hali verilmiştir. Veri toplama sürecinde uzman görüşleri doğrultusunda değerlendirilmek üzere burada gösterildiği gibi düzenlenen ifadeler aşağıda kategorileriyle birlikte listelenmiştir.

1.1.1.1. Teknoloji ve Endüstri 4.0 Kategorisindeki ÇYG'ler

Çevik üretim, literatürde ilk kez öne çıktığı dönemlerde donanım yetersizlikleri ve teknik sınırlılıklar nedeniyle uygulamada zorluklar barındırmaktaydı. Ancak Endüstri 4.0'ın da etkisi dahilinde teknolojik gelişmelerin hız kazanmasıyla birlikte bu yenilikler, çevikliğin hayata geçirilmesinde belirleyici bir rol üstlenmiştir. Endüstri 4.0 ile hayatımıza giren AI, bulut sistemleri, büyük veri, IoT, artırılmış gerçeklik (AR), dijital ikiz ve diğer teknolojik gelişmeler, işletmelerin müşterilerle etkili etkileşim kurma ve doğru zamanda doğru şekilde kaliteli hizmet sunma gibi özellikler kazanmalarını sağlarken üretim biçimlerini yeniden şekillendirmelerine yardımcı olmuştur (Dutta vd., 2021: 1680). Özellikle denizcilik sektörü gibi teslimat sürelerinin uzun seyrettiği üretim faaliyetlerinde, teknolojinin sistemlere entegre edilmesi; işletmelerin çevik üretim kapsamındaki iyileştirme süreçlerinde önceliklendirmesi gereken temel adımlardan biridir. Aksi takdirde, zorlu pazar koşullarında rekabet gücünü sürdürebilmek mümkün olmayacaktır. Bu bağlamda, Endüstri 4.0'ın etkisiyle tersanelerde üretim ortamlarının otomasyon, akıllı planlama sistemleri ve akıllı fabrika modeline yönlendirilmesi amacıyla üretim sistemleri çeşitli ileri üretim teknolojileriyle bütünleştirilmeye başlanmıştır (Lee vd., 2020: 626). Bu durum birçok sektörde farklı şekillerde öne çıkarak işletmelerin üretim sistemlerini teknoloji odaklı hale getirmelerine neden olmuştur. Bu bağlamda, aşağıdaki ifadeler “Teknoloji ve Endüstri 4.0” kategorisi kapsamındaki ÇYG'ler olarak belirlenmiştir:

- Teknolojik yeniliklerin takip edilmesi, erken benimsenmesi ve uygulanması (Mittal vd., 2017).
- Değişikliklere yanıt verebilirliği en üst düzeye çıkarmak için süreç planlamasında yeni teknolojilerin kullanılması (Ilmudeen, 2021).
- Tüm departmanlarda işlevlerin ve bilgilerin tek bir sistemde birleştirilmesi (Ilmudeen, 2021).
- Ekipman ve makinelerin bakımının kontrol edilmesi (Ilmudeen, 2021).
- Modern yazılım ve bilgisayar kontrollü makinelerin kullanılması (Ilmudeen, 2021).
- Hızlı prototipleme için yeni teknolojilerin kullanılması (Gunasekaran vd., 2019).
- Otomatik güdümlü araç, otomatik depolama ve geri alma sistemleri gibi otonom teknolojilerden faydalanılması (Nassar ve El-Khalil, 2020).
- Akıllı fabrika bölümü, eklemeli üretim, İnsanların İnterneti (IoP), Hizmetlerin İnterneti (IoS) ve robotik gibi Endüstri 4.0 teknolojilerinin üretim süreçlerini dijitalleştirilmesi (Ghobakhloo vd., 2025).
- Üretim süreçlerinde yapay zekâ (Belhadi vd., 2021; Modgil vd., 2021a; Modgil vd., 2021b; Naz vd. 2022), blok zinciri (Dubey vd., 2020; Lohmer vd., 2020), büyük veri analitiği

(Dennehy vd., 2021), makine öğrenimi veya gerçek zamanlı iletişim yeteneği gibi özelliklere sahip olunması.

- Otonom, çevik ve proaktif hiper-bağlantılı bir üretim ekosistemi geliştirmek için eklemeli üretim, artırılmış gerçeklik, siber fiziksel sistemler, bilişsel/otonom robotlar, dijital ikiz, gömülü IoT, uç bilişim ve akıllı sensörlerin kullanılması (Ghobakhloo vd., 2025).
- 3D (üç boyutlu) yazıcı gibi teknoloji temelli alternatif parça üretimi yöntemleri kullanılması (Chervenkova ve Ivanov, 2023).
- İDA'ların; istihbarat, gözetleme, keşif devriyesi ve kıyı limanı savunma gibi görevlerini yerine getirmek için aktif bir veri/iletişim bağlantısına sahip olması (Veit vd., 2022).
- Denizcilik projelerinde birçok farklı işlevsel ürünün benzersiz ve yenilikçi bir konfigürasyonda bir araya getirilmesi (Sanderson ve Cox, 2008).

Mümkün oldukça farklı çalışmalardan derlenen ve farklı etkileşimler göz önünde bulundurularak belirlenen yukarıdaki ifadeler, teknoloji ve Endüstri 4.0'ın aslında sadece dijital bir bağlamda incelenmediğinin göstergesi olarak görülebilir. Teknolojik gelişmeler ve Endüstri 4.0 ile hayatımıza giren uygulamalar üretim süreçlerinde çevikliği artırırken arka planda sağladığı verimlilikle sürdürülebilirlik hedeflerinin gerçekleştirilmesine de katkıda bulunur. Bu bağlamda bir diğer önemli kategori olan Sürdürülebilirlik, işletmelerin çevre kirliliğini en aza indirme, kaynakları verimli kullanma ve uzun vadeli değer yaratma gibi yaklaşımları bütünsel olarak ele alan bir kategori olarak bu çalışmada yer almaktadır.

1.1.1.2. Sürdürülebilirlik Kategorisindeki ÇYG'ler

Literatürde öne çıktığı ilk yıllardan itibaren çevik üretim, sürdürülebilirlik ve çevre üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle birçok eleştiriye maruz kalmıştır. Örneğin Womack ve diğerleri (2007: 140) çevik olabilmek adına hızlı yanıt verebilme amacıyla üretim hatlarını esnek hale getiren ve sık ürün değişimlerine imkân tanıyan işletmelerin bu faaliyetlerinin enerji tüketimlerini ve fazladan malzeme taşınmasından kaynaklanan atık miktarlarını artırdıklarını, dolayısıyla çevresel anlamda olumsuz etkilere sahip olduklarını vurgulamıştır. Benzer şekilde Yusuf ve diğerleri (1999: 38) ve Carvalho ve diğerleri (2011: 160) de çabuk tepki verme odaklı üretim sistemlerinde ayırık kapasite blokları ve düşük doluluk oranlarının malzeme kullanımını ve enerji tüketimini artırarak çevresel sürdürülebilirliği tehlikeye atabileceğini belirtmiştir. Ayrıca üretim kurgularını müşteri taleplerine anlık yanıt verebilecek şekilde tasarlayan işletmeler, artan mal akışıyla tedarik zinciri lojistiklerindeki hareketliliğin artmasından dolayı karbon salınımlarını artırabilmektedir (Naylor vd., 1999: 114). Dolayısıyla işletmelerin çevik olma çabaları esnasında çevresel sürdürülebilirliği göz önünde bulundurmaması ciddi tehlikeler

yaratacaktır. Hem çeviklik hem de sürdürülebilirlik kavramlarının bütünleşik yapıları düşünüldüğünde bu olguları birbirlerinden ayrı düşünmek ve uygulamak etkin bir sonuç vermeyecektir. Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları'nda belirtildiği gibi, işletmeler, özellikle de büyük ve çok uluslu işletmeler çevikliği benimsemeye ve sürdürülebilirliği operasyonlarına entegre etmeye zorlanmalıdır (Agarwal vd., 2023: 3672). Buradan hareketle aşağıdaki ifadeler “Sürdürülebilirlik” kategorisi kapsamındaki ÇYG’ler olarak belirlenmiştir:

- Üretim süreçlerinde temiz yakıt ve filtre sistemlerinin kullanılması (Yazar tarafından oluşturulmuştur (YTO)).
- Geri dönüştürülmüş ve/veya dönüştürülebilir hammaddelerin kullanılması (YTO).
- Çalışanların çevre koruma ve sürdürülebilirlik gibi konularda eğitilmesi (YTO).
- Karbon ayak izi hesaplaması gibi denetimlerin gerçekleştirilmesi (YTO).
- ISO 14001 Çevre yönetim sistemi sertifikası gibi bütüncül çevreci yapıların üretim süreçlerine dahil edilmesi (YTO).
- Tüm paydaşların sürdürülebilirlikle ilgili karar alma süreçlerinde önyargılardan uzak ve açık fikirli yatırım tutumları sergilemesi (Guandalini, 2022; Cegarra-Navarro vd., 2019; Del Giudice vd., 2017; Orlando vd., 2020).
- Tüm paydaşların sürdürülebilirlik için ortak değer yaratma sürecine katılımı (Chaurasia vd., 2020).

Literatür teorik olarak teknolojik gelişmelerle üretim sistemlerinin çevikleştiğini, kaynak verimliliğinin arttığını, üretim süreçlerinin çevreye olan zararlarının minimize edildiğini ve dolayısıyla teknolojik yeniliklerin sürdürülebilirlik üzerinde olumlu etkisi olduğunu gösterse de bu durumun ÇYG’ler üzerinden incelendiğinde yukarıda yer alan ifadelerden görülebileceği üzere çeviklik kapsamında çok fazla dikkate alınmadığı söylenebilir. Sürdürülebilirlik ile ilgili yetenek, gösterge ve özellik gibi olguların doğrudan ÇYG olduğunu belirten sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Dolayısıyla yazar tarafından sürdürülebilirlik, çeviklik ve Endüstri 4.0 bağlantılı ifadelerin oluşturulmasına, bu ifadelerin uzmanlar tarafından değerlendirilmesine göre sürdürülebilirliğin çeviklikle olan etkileşimi üzerine yorumlar yapılmasına karar verilmiştir. Sürdürülebilirlik kapsamında ele alınan ÇYG’ler, işletmelerin çevresel sorumluluklarını yerine getirirken aynı zamanda dinamik koşullara uyum sağlamalarına yardımcı olur. Ancak bu yeteneklerin üretim sistemleri dışındaki yansımalarını anlamak için tedarik zinciri süreçlerinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu doğrultuda bir sonraki kategori olan Tedarik Zinciri, özellikle malzeme akışı, iş birliği ve kaynak yönetimi gibi alanlarda çevikliğin hangi yetenekler ve göstergeler aracılığıyla sağlandığını irdelemektedir.

1.1.1.3. Tedarik Zinciri Kategorisindeki ÇYG'ler

Üretim yönetimi tarihi düşünüldüğünde, özellikle son 30 yıllık süreç göz önünde bulundurulduğunda, tedarik zinciri performansını iyileştirmek için bu boyutta bir teknoloji kullanımının hiçbir dönemde gerçekleşmediği söylenebilir. Son müşteriye ulaşılan noktalarda müşterilerin talep ve tepkilerinin doğrudan temin edilip kısa sürede tedarik zinciri boyunca iletilebilmesi işletmelerin müşterinin isteklerini anlamasını ve ona göre organize olmasını sağlamaktadır (Fisher, 1997: 106). Bu noktada dijitalleşme, veri transferi, otomatik depolama, hızlı lojistik gibi ilerlemeler, tedarik zincirinin tüm halkalarını hem müşteri istekleri doğrultusunda bilgilendirir hem gereksiz transfer ve malzeme masraflarından kurtarır hem atık oluşumunu engeller hem de zamanın daha verimli kullanılmasını sağlar. Özellikle gemi inşa endüstrisi gibi tasarım, inşa ve kurulum gibi süreçleri kapsayan karmaşık bir değer zinciri için bu tarz gelişmeler işletmeler için birçok avantaj sağlayacaktır. Standart gemi inşa süreçlerine kıyasla İDA'ların üretim süreçleri daha az karmaşık olsa da makroskopik bir perspektiften bakıldığında, gemi inşa süreçlerinde bu teknolojilerle yeni üretim sistemlerinin geliştirilmesi ve bu sistemlerin yönetilmesi tersanelerdeki verimliliği artırmaktadır (Lee vd., 2020: 626). Buradan hareketle aşağıdaki ifadeler “Tedarik Zinciri” kategorisi kapsamındaki ÇYG'ler olarak belirlenmiştir:

- Verimli ve esnek tedarikçi ilişkileri (Ben-Zion vd., 2014).
- Tedarik zincirinin dikey yatay entegrasyon, gerçek zamanlı yetenek, ademi merkeziyetçilik ve sanallaştırma gibi değerli tasarım ilkelerine sahip olması (Ghobakhloo vd., 2025).
- Endüstri 4.0 teknolojileri sayesinde tedarikçiler, üreticiler, lojistik kanallar, distribütörler ve hatta müşteriler dahil olmak üzere sistemdeki tüm aktörlerin dijitalleştirilmesi (Kazancoglu vd., 2023).
- Tedarik zinciri paydaşlarının iş birliği, yenilikçilik, bilgi güvenliği, farkındalık, esneklik ve otomasyon gibi özelliklere sahip olması (Belhadi vd., 2021; Dennehy vd., 2021; Lohmer vd., 2020).

Tedarik zinciri süreçlerine ilişkin çeviklik yetenekleri; esnek planlama, tedarikçi iş birliği ve kaynak kullanımında optimizasyon gibi göstergelerle değerlendirilebilmektedir. Ancak bu yeteneklerin etkinliği, çoğu zaman nihai müşterinin değişen taleplerine ne ölçüde hızlı ve doğru yanıt verilebildiğiyle doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle bir sonraki kategori olan Müşteri Talebi, pazardaki belirsizlik ve dalgalanmalara karşı işletmenin çevik tepkiler geliştirmesini sağlayan yetenek ve göstergeleri incelemektedir.

1.1.1.4. Müşteri Talebi Kategorisindeki ÇYG'ler

Müşteri talebi ve bu talebe olan duyarlılık, ÇYG'ler içerisindeki en önemlilerinden biridir. Çünkü işletmelerin üretim hacmini talebe göre hızla ayarlama becerisi, teslimat zaman ve lokasyonlarını değiştirme hızı ve pazar trendlerine anlık yanıt verme yeteneği doğrudan müşteri memnuniyetini ve rekabet avantajını belirlemektedir (Goldman vd., 1995: 47; Swafford vd., 2006: 702; Overby vd., 2006: 127). İşletmelerin müşteri talebini algılamadaki hassasiyeti, sipariş karşılama çevrim süresi ve talep tahminlerinin doğruluğu gibi göstergelerle ölçülerek, müşteri taleplerindeki değişimlere hızla uyum sağlanabildiğini somut verilerle ortaya koyulabilmektedir (Overby vd., 2006: 124). Bu anlamda müşteri talebi çevikliğin operasyonel performansının somut göstergelerini vurgulayan bir odak noktasını oluşturmaktadır. Özellikle gemi inşa endüstrisi gibi uzun vadeli teslimat sürelerine sahip endüstrilerde üretim faaliyet programının doğrulanabilmesi için diğer endüstrilere kıyasla çok daha fazla ihtiyaç bulunmaktadır. Bu nedenle, üretim planlarının müşteri talebine göre mümkün oldukça eş zamanlı iyileştirilmesine yönelik herhangi bir girişimin sonuçlarının incelenmesinde sınırlamalar bulunmaktadır (Lee vd., 2020: 626). Ancak İDA'lar için süreç alışılacılığı gemi üretim süreçlerine kıyasla çok daha kısa sürdüğü için, "Müşteri Talebi" bu çalışmada ÇYG kategorilerinden biri olarak yer almış ve bu kategoride yer alan ifadeler aşağıda listelenmiştir:

- Daha sofistike ürünler yaratmak için üretim kapasitelerinin ölçeklenebilir olması ve çalışanların adaptasyonunun sağlanması (Chervenkova ve Ivanov, 2023).
- Çalışanlara, değişimlere hızlı adapte olmalarını sağlayacak esnek ve uyarlanabilir çalışma mantığının kazandırılması (YTO).
- Değişikliklere hızlı yanıt vermek için ölçülebilir hedeflere dayalı günlük kararların planlanması (Ismail vd., 2019).
- Gelecekteki pazar satışlarının ve ihtiyaçlarının tahmin edilmesi (Agarwal vd., 2023).
- Deniz aracı siparişi veren kurumsal ya da bireysel müşterilerin zamanla güncellenen ve özelleşen gereksinimlerine (teslim tarihi, ürün kalitesi vb.) hızlı yanıt verilebilmesi (Woo ve Song, 2014).

Müşteri taleplerine yönelik çeviklik yetenekleri; hızlı yanıt verme, ürün/hizmet çeşitliliği sağlama ve müşteri beklentilerine uyum gibi göstergeler üzerinden değerlendirilirken, bu yeteneklerin kurumsal düzeyde sürdürülebilir şekilde uygulanabilmesi stratejik ve operasyonel karar süreçlerine bağlıdır. Bu nedenle bir sonraki kategori olan Stratejik ve Operasyonel ÇYG'ler, çevik üretim anlayışının karar alma mekanizmalarına nasıl yansıdığını ve bu bağlamda hangi yetenek ve göstergelerin ön plana çıktığını ele almaktadır.

1.1.1.5. Stratejik ve Operasyonel Kategorisindeki ÇYG'ler

Stratejik ve operasyonel ÇYG'ler işletmelerin mal ve hizmetlerini pazar koşullarına uygun olarak şekillendirmelerini, spesifik müşteri ihtiyaçlarına yönelik çözümleri hızlıca sunarak rekabet avantajı elde etmeyi mümkün kılabilir (Teece vd., 1997: 515; Christopher ve Towill, 2001: 310). Edinilen yetenek ve göstergeler işletmelerin sahadaki etkinliğini sağlayıp üretim hacmini düzenleyerek kaynak verimliliğini koruyabilmektedir (Swafford vd., 2006: 702). Günümüzde bu durum teknoloji ve dijitalleşmeyle farklı bir boyuta ulaşmaktadır. Özellikle gemi inşa gibi rekabetin yüksek olduğu sektörler Endüstri 4.0 ile dijital bir dönüşümden geçmektedir (Wang vd., 2024: 123). Bu nedenle işletmeler stratejik ve operasyonel yetenek ve göstergeleri edinme yolunda çok boyutlu düşünmek durumundadır. Bu bağlamda belirlenen “Stratejik ve Operasyonel” ÇYG'leri aşağıdaki gibidir:

- Çalışanların anlık takibi için kısa vadeli hedeflerin belirlenmesi (Maamari ve Saheb, 2018).
- Maliyet hedef ve amaçlarının belirlenmesi, kesinleştirilmesi ve bunlara ulaşılması (Dagher vd., 2015).
- Ürün geliştirme ve üretim süreçlerine farklı aktörlerin dahil edilmesi, stratejik ortaklıkların kurulması (Karkoulia vd., 2019; Potdar vd., 2017).
- Liderin duyarlılığı (Voolaid ve Ehrlich, 2017).
- Sürekli öğrenme ve eğitim (Ghodratı ve Zargarzadeh, 2013).
- Çalışanların iş birliği (Suresh vd., 2019).
- Açık, şeffaf iletişim ve bilgi paylaşımı (Suresh vd., 2019; Di Vaio vd. 2021).
- Değişimlere hızla adapte olabilmek için süreç bilgisi ve ileri dijital teknolojiler gibi temel operasyonlarda geliştirilen kurum içi kaynakların varlığı (Chervenкова ve Ivanov, 2023).

Stratejik ve operasyonel düzeyde sahip olunan ÇYG'ler, işletmelerin içsel süreçlerini yapılandırmasına olanak tanırken; bu ÇYG'lerin gerçek anlamda sınındığı durumlar, çoğu zaman işletmenin kontrolü dışında gelişen olağanüstü koşullarda ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda bir sonraki kategori olan Diğer Koşullar, pandemi, ekonomik dalgalanmalar ve iklim krizi gibi küresel ölçekli, belirsizlik seviyesi yüksek dış çevresel etmenler karşısında işletmelerin çevik yanıt kapasitesini şekillendiren yetenek ve göstergeleri incelemektedir.

1.1.1.6. Diğer Koşullar Altındaki ÇYG'ler

Pandemi, devlet düzenlemeleri veya ekonomik dalgalanmalar gibi olağan dışı durumlarda işletmeler operasyonlarını olası tehditlere karşı güçlendirmeli ve mümkün oldukça bu süreçlere çeviklikle yanıt vermelidir. Bu gibi durumlarda işletmeler yedek kapasiteler, alternatif tedarik kanalları ve hammadde kaynakları, getirilen düzenlemelere ve kurallara uyum,

işbirlikçi ağları genişletme gibi kabiliyetlere sahip olmak durumundadır (Pettit vd., 2010: 8; Ivanov ve Das, 2020: 94). Bu kabiliyetler aynı zamanda işletmeler için stratejik ve operasyonel etkilere de sahip olup, somut verilerle yönetilebilir hale getirilmelidir. Unutulmamalıdır ki, tıpkı çeviklik kavramının kendisi gibi ÇYG’ler de birbirlerini etkileyen ve bütünleşik bir yapıdadır. Dolayısıyla olağanüstü koşullarda işletmelerin nasıl hareket edeceği konusunda tüm boyutlarıyla hazırlıklı olması gerekmektedir. Burada örneklendirilen “Diğer Koşullar” düşünüldüğünde bu çalışmada aşağıdaki yetenek ve göstergelere yer verilmiştir:

- Teşvik paketlerinin ve kriz kurtarma planlarının etkilerini en üst düzeye çıkarmak için hükümetlerle iş birliği yapılması (Liu vd., 2020).
- Siyasi istikrarsızlık, ekonomik dalgalanma, yakın coğrafyamızdaki savaşlar, göçmen krizleri, iklim değişikliği kaynaklı doğal afetler, yoksulluk, su ve gıda kıtlığı gibi küresel ve toplumsal zorluklarla daha iyi mücadele etmek için iş modellerini dönüştürebilmek amacıyla yeni teknolojiler edinilmesi (Di Vaio vd., 2021; Ferreira vd., 2019; George vd., 2021).

Farklı kategoriler altında ele alınan ÇYG’ler, işletmelerin değişken çevre koşullarına karşı nasıl tepki verdiğini ve hangi kapasitelere dayanarak bu uyumu sağladığını ortaya koymaktadır. Ancak bu yeteneklerin sürdürülebilir ve bütüncül bir yapı içinde anlam kazanabilmesi, onları yönlendiren stratejik çerçevenin varlığına bağlıdır. Bu doğrultuda bir sonraki bölüm olan Çeviklik Stratejileri (ÇS), söz konusu yetenek ve göstergelerin arkasında yatan karar yapısını ve işletmelerin çevikliği kurumsal düzeyde nasıl yapılandırıldığını irdelemektedir.

1.1.2. Çeviklik Stratejileri

ÇS’ler literatürde birçok farklı tanımla ve sınıflandırma ile karşımıza çıkmaktadır. Örneğin bu alandaki temel çalışmalara imza atan Sharifi ve Zhang (1999: 10) ÇS için “pazar hassasiyeti” ile “süreç esnekliği” arasındaki uyumun öne çıktığı bir olgu ifadesini kullanmaktadır. ÇS’nin geliştirilme sürecinde, bu iki boyutu bütünleştirmenin zorunlu olduğu belirtilmektedir. Bu da işletmelerin hız, esneklik ve müşteri odaklılık gibi ÇYG’lerin eş zamanlı olarak tüm operasyonlarına entegre etmesi ile oluşturulabilir. Bir diğer deyişle çevik üretim stratejileri, kurumsal karar alanları (örneğin müşteri ilişkileri yönetimi, tedarikçi yönetimi, süreç tasarımı, teknoloji kullanımı, insan kaynağı yönetimi vb.) üzerine inşa edilen bütünsel birer plan” olarak tanımlanır. Christopher ve Towill (2001: 237) ÇS’yi, müşteri taleplerine minimum süreyle cevap verebilmek amacıyla, üretim ve dağıtım süreçlerini yeniden yapılandırma olarak tanımlamıştır. Bunlar ve benzeri birçok tanımlama göz önünde

bulundurulduğunda ÇS'lerin başarıyla hayata geçirilebilmesi için stratejik beceri ve yetenek önceliklendirme sağlanarak işletme kaynaklarının optimal düzeyde kullanılması gerekmektedir (Zhang ve Sharifi, 2000: 500).

ÇS literatürde farklı kaynaklarda farklı biçimlerde sınıflandırılmıştır. Bu konudaki en eski kaynaklardan biri olan Sharifi ve Zhang'ın 1999 tarihli çalışmasında çevik üretim stratejilerini 10 ana karar alanı altında kategorize etmiştir. Bu alanlar arasında “müşteri odaklılık”, “tedarikçi ortaklığı”, “esnek üretim süreçleri”, “bilgi teknolojisi kullanımı” ve “insan kaynağı yetkinlikleri” başlıkları öne çıkmıştır. Bu çalışmaya göre stratejik çeviklik oluşturmak için işletmeler, her bir karar alanında çevik yeteneklerini tanımlamalı, uygulama planları geliştirerek (örneğin tedarikçi esnekliği için çoklu tedarikçi ilişkisi veya müşteri talep yönetimi için bütünsel müşteri iletişimi yönetimi sistemleri vb.) strateji yörüngesini belirlemelidir. Örneğin Christopher ve Towill (2001: 238) ÇS'leri iki tür altında açıklamıştır. Birincisi ertelenmiş üretim/dağıtım (Postponement) olarak adlandırılan strateji hem stok seviyelerini düşük tutmaya hem de müşteri taleplerine lokal bazda esnek yanıt verebilmeye odaklıdır. İkincisi ise çevikliği yalınlıkla birleştiren ve Leagility ismini alan ÇS'dir. Bu stratejiye göre ise yalın (lean) süreçlerle maliyet avantajı sağlanıp, kritiklik noktalarından itibaren çevik yaklaşıma (agility) geçerek müşteri taleplerine hızlı ve ekonomik yanıt verilmesi amaçlanır. Overby ve diğerleri ise (2006: 122), ÇS'lerin bilgi teknolojileriyle şekillendirilmesi gerektiğini öne sürmüştür. Bu şekilde gerçek zamanlı veri analitiği, IoT altyapısı ve bulut tabanlı sistemlerle, organizasyonun hem iç süreçlerde hem de tedarik zincirinde görünürlüğünü ve karar alma hızını artıran yaklaşımlar ortaya çıkmıştır. Bilgi teknolojilerinin kullanımı ve dijitalleşme yatırımları ile işletmelerin farklı pazarlara hızla girebilme ve süreçleri anlık olarak yeniden yapılandırabilme esnekliği ortaya çıkmıştır. Böylece pazar belirsizlikleri yüksek olduğunda işletmeler riske karşı erken uyarı mekanizmaları geliştirebilmekte ve tedarik zinciri ortaklarıyla hızlı koordinasyon sağlayabilmektedir. Bir başka örnek olarak Zhang ve Sharifi (2007: 354), yürüttükleri taksonomik çalışmada ÇS türlerini “Quick Players” (Hızlı Oyuncular), “Responsive Players” (Tepkisel Oyuncular) ve “Proactive Players” (Proaktif Oyuncular) olarak üç boyutta tanımlamaktadır. Bu örnekler terimsel anlamda birbirlerinden farklılaşsa da temel noktalarının benzer olduğu söylenebilir. ÇS'ler, bir işletmenin hangi ÇYG'lere, becerilere, süreçlere ve teknolojik altyapıya yatırım yapacağına ilişkin bütünsel bir yaklaşımla organize edilen planlı yol haritaları olarak değerlendirilmelidir.

ÇS'ler belirlenirken tıpkı ÇYG'lerin belirlenme sürecinde olduğu gibi Agarwal ve diğerlerinin çalışmasında yer alan ancak güncel tarihli referanslara sahip olmayan ifadeler bu araştırmanın kapsamından çıkarılmış, güncel tarihli ifadeler araştırmaya dahil edilmiş ve ayrıca

gerçekleştirilen literatür taramasından faydalanılarak yeni ifadeler eklenmiştir. Yine ÇYG ile aynı 6 kategoride toplam 29 ÇS belirlenmiş; bu ifadeler de veri toplama aşamasında uzman görüşleri doğrultusunda değerlendirilmek üzere aynı şekilde kullanılmıştır. Bu ifadeler ilerleyen bölümlerde açıklanmaktadır.

1.1.2.1. Teknoloji ve Endüstri 4.0 Kategorisindeki ÇS'ler

Teknoloji, özellikle Endüstri 4.0'ın getirdikleriyle firmalar için bambaşka bir değişim aktörü olarak etkisini artırmaktadır. Öyle ki, bir firma dijital teknolojiler edinerek ya da bu teknolojilerin kullanım şeklini değiştirerek yeni bir iş modeli geliştirebilmekte ve firma için daha fazla değer yaratılmasını sağlayabilmektedir (Verhoef vd., 2021: 889). Etki alanı sadece teknoloji ya da çeviklik odaklı bir çerçeveye sıkıştırılamayacak derecede yüksek olan bu yaklaşımlar firmaların vizyonlarını şekillendirirken göz önünde bulundurmaları gereken olgulardır. Dolayısıyla dijital dönüşüm, dijital teknolojilerin uygulanması sonucunda iş modelinde yapılan stratejik değişikliklerle doğrudan bağlantılıdır (Sebastian vd., 2020: 197). Dijitalleşmenin ve teknolojinin bu denli büyük bir etkiye sahip olması çok disiplinli bir tartışma ortamında ele alınmasını gerektirmektedir. Bu bağlamda, farklı yönlerden değerlendirilerek ele alınan aşağıdaki ifadeler “Teknoloji ve Endüstri 4.0” kategorisi kapsamındaki ÇS'ler olarak belirlenmiştir:

- Dijital Dönüşüm ve Dijitalleşme: Endüstri 4.0'ı mümkün kılan karmaşık teknoloji trendlerini benimsemek (Tomomitsu ve Moraes, 2021).
- Finansal Güç ve Teknolojik Yetenekler: Güçlü bir teknolojik altyapı ile verilerin analiz edilebilmesi ve böylece faydalı içgörülerini paydaşlarla paylaşarak daha iyi, akıllı ve hızlı kararlar alınabilmesi için yeterli finansal güce sahip olmak (Miceli vd., 2021).
- Bilgi Paylaşımı: Kuruluşun tüm birimlerinde gerekli yetki ve donanımı sağlayarak (CPS - Cyber Physical Systems, IIoT - Industrial internet of things, bulut veriler vb.) veri kaynaklarına daha yakın olmak; bu sayede bağımsız ancak daha bilinçli kararlar alınmasını sağlamak (Ma vd., 2020).
- Teknoloji Edinimi: Pazara sunma süresini kısaltma ve kalitesizlik maliyetini düşürme ihtiyacıyla yeni teknolojileri keşfetmek ve/veya dışarıdan tedarik etmek (Ellingsen ve Aasland, 2019).

Teknoloji ve Endüstri 4.0 ekseninde geliştirilen ÇS'ler, dijital altyapıların güçlendirilmesi, veri temelli ve AI tabanlı karar alma süreçlerinin yaygınlaştırılması ve üretim esnekliğinin artırılması gibi yönleriyle işletmelerin dinamik ortamlara uyum kabiliyetini desteklemektedir. Ancak dijital dönüşümün yalnızca verimlilik değil, aynı zamanda çevresel ve

toplumsal sorumluluk boyutunu da içermesi beklenmektedir. Bu nedenle bir sonraki bölüm olan Sürdürülebilirlik kategorisinde yer alan ÇS'ler, çevik üretim anlayışının uzun vadeli çevresel hedeflerle nasıl uyumlandırıldığını ve stratejik düzeyde sürdürülebilirlik ilkeleriyle nasıl bütünleştirildiğini ele almaktadır.

1.1.2.2. Sürdürülebilirlik Kategorisindeki ÇS'ler

İşletmeler, iklim krizi gerçeği gözler önündeyken bile hala sürdürülebilirlik temelli strateji geliştirmek konusunda yeterli aşama kat etmemiştir. Çalışmanın önceki bölümlerinde örnekleri verildiği üzere birçok uluslararası rapor ve gösterge, iklim krizinin endüstriyel kaynaklı olduğunu göstermelidir. Dolayısıyla bireysel olarak toplum bilinciyle gerçekleştirilen çabalar iklim krizi için yeterli olmamakta, özellikle dünya ekonomisinde söz sahibi işletmeleyn bu konuda somut adımlar atmaları gerekmektedir. Özellikle görece eski işletmeler, sürdürülebilirlik için hayata geçirmeleri gereken faaliyet ve düzenlemeleri ek bir maliyet olarak görerek bu konuda adım atmazken; bazı işletmeler iste bu faaliyet ve düzenlemeleri sadece pazarlama kampanyası gibi kullanarak göstermelik çabalar sarf etmektedir (Delmas ve Burbano, 2011: 67). Halbuki SDA'lar doğrultusunda oluşturulan ÇS'ler, işletmelere sadece belirsizlikler karşısında hızlı yanıt verebilme yeteneği kazandırmakla kalmaz, aynı zamanda çevresel, sosyal ve ekonomik dengeyi koruyacak şekilde kaynakların etkin kullanımını teşvik eder. Böylece özellikle tedarik zinciri boyunca enerji tüketiminin azaltılması, atıkların minimize edilmesi ve yeniden kullanım gibi çevresel sürdürülebilirlik unsurları hayata geçirilebilmektedir (Dangelico ve Pujari, 2010: 472). Bunların yanı sıra işletmeler bu çerçeve kapsamında strateji oluştururken sosyal sorumluluk, etik tedarik ve döngüsel ekonomi gibi alanlarda da rekabet avantajı yaratabilmektedir. Ancak bunun için bu kavramların bütünsel bir şekilde ele alınarak hayata geçirilmesi gerekmektedir. Çünkü bu kavramlar zaten kendi içlerinde bütünsel ve çok yönlü olmalarından dolayı bir işletmenin tek bir departmanı ya da pazarlama kampanyası ile işletmede yer alması etkili sonuçlar elde edilememesine neden olacaktır. Dolayısıyla ÇS'ler, sürdürülebilirlik uygulamalarıyla bütünleştğinde hem piyasa taleplerine uyum hem de çevresel farkındalık açısından stratejik bir kaldıraç işlevi görecektir (Blome vd., 2014: 466). Bu bilgiler çerçevesinde literatürde yer alan görüşlerden yola çıkarak aşağıdaki ifadeler “Sürdürülebilirlik” kategorisindeki ÇS'ler olarak belirlenmiştir:

- Çevik ve Çevreci Üretim: Teknolojik yeniliklerle ve dijital dönüşümle üretim sistemini hem çevikleştirmek hem de sürdürülebilir hale getirmek (Guandalini, 2022).
- Kirlilik Minimizasyonu: Çevreci üretim süreçlerini sisteme dahil ederek; hava, su ve toprak kirliliklerini önleme teknolojilerindeki inovasyon seviyesini yükselterek çevre sorunlarına

neden olan faaliyetlerin zararını azaltmak ve çevresel sürdürülebilirlik uygulamalarında maliyet avantajı sağlamak (YTO).

- Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA): Dijitalleşmeyle yeni veri kaynaklarına erişim, analitik kapasitelerin geliştirilmesi ve dijital ekosistemler arasında iş birliği sayesinde SKA'ları gerçekleştirmek (Castro vd., 2021).

Sürdürülebilirlik odaklı ÇS'lerin ÇYG'lerde olduğu gibi literatürde yeterli sayıda ele alınmadığı görülmüştür. Halbuki sürdürülebilirlik kapsamındaki ÇS'ler, çevresel etkilerin azaltılması, kaynakların verimli kullanımı ve uzun vadeli değer üretimi gibi hedefleri esas alarak işletmelerin yalnızca bugününü değil, geleceğini de güvence altına almalarını amaçlamaktadır. Şüphesiz bu stratejilerin bütüncül bir etki yaratabilmesi, yalnızca üretim süreçleriyle sınırlı kalmayıp tedarik zinciri boyunca da sürdürülebilirlik ilkeleriyle uyumlu bir çeviklik anlayışının benimsenmesini gerektirir. Bu doğrultuda bir sonraki bölüm olan Tedarik Zinciri ÇS'leri, malzeme tedarikinden dağıtıma kadar uzanan ağ içinde çevikliğin nasıl sağlandığını ve bu süreçte hangi stratejik yaklaşımların ön plana çıktığını ele almaktadır.

1.1.2.3. Tedarik Zinciri Kategorisindeki ÇS'ler

Tedarik zinciri ağ tasarımı, süreç entegrasyonu ve risk yönetimi başta olmak üzere işletmeler için yapısal ve kurumsal tasarım kararlarında dikkate alınması gereken en önemli etmenlerden biridir. Tedarik zincirinin büyüklüğü ya da yapısı sektör ve üretim biçimlerine göre değişkenlik gösterebilmektedir. Örneğin yalın ve çevik yaklaşımlarda malzeme akışları, stok düzeyleri ve yanıt süresi kararları tedarik zincirinin yapısında görece daha belirleyicidir (Christopher ve Towill, 2000: 206). Çağımızın gereği olarak teknolojinin tedarik zinciri yapısındaki görece önemli etkisi ise sensörler ve veri analitiği sayesinde uçtan uca görünürlük sağlayarak arz-talep dalgalanmalarına hızlı uyumu mümkün kılmasıdır (Ivanov vd., 2019: 829). Ek olarak, çevresel ve toplumsal kriterler göz önünde bulundurulduğunda ise tedarikçi seçimi, lojistik yöntemleri gibi kararlar öne çıkmaktadır (Seuring ve Müller, 2008: 1700). Her ne kadar bahsedilen kriterlerden tedarik zincirlerinin farklılaşabileceği anlamı çıksa da aslında tedarik zinciri işlevlerinin ve elemanlarının tamamı birbirleriyle sıkı bir şekilde bağlantılıdır. Önemli olan bu işlev ve elemanların stratejik anlamda firma ihtiyaçlarıyla uyumlu hale getirilmesidir (Ghobakhloo vd., 2025: 61). Dolayısıyla tedarik zinciri ortaklarının stratejik hamleler ve yenilikçilik yetenekleri konusunda gelişen teknoloji ve trendleri takip ederek daha etkili iş birlikleri yapmaları gerekmektedir. Buradan hareketle aşağıdaki ifadeler “Tedarik Zinciri” kategorisi kapsamındaki ÇS'ler olarak belirlenmiştir:

- Tedarik Zinciri: Klasik tedarik zinciri modellerini modüler, ölçeklenebilir, dinamik, hiper bağlantılı ve veri odaklı Dijital Tedarik Ağlarına (DSN) dönüştürmek (Ghobakhloo vd., 2025).
- Hammadde Temini: Hayati önem taşıyan malzemelerin eksikliği durumunda operasyonları yeni bir üretim türüne adapte edebilmek (Chervenkova ve Ivanov, 2023).
- Tasarım Değişiklikleri: Şirketin yeni bir modifiye tasarım geliştirmesi veya mevcut bir tasarımın üretimini artırması gerektiğinde, ihtiyaçlara göre tedarik zincirini yeniden tasarlayabilmek (Chervenkova ve Ivanov, 2023).

Tedarik zinciri odaklı ÇS'er, tedarikçilerle iş birliği, esnek lojistik çözümleri ve talep değişimlerine karşı hızlı yeniden yapılanma kapasitesi gibi unsurlar üzerinden şekillenmektedir. Ancak bu stratejilerin etkinliği, doğrudan müşteriden gelen sinyallerin ne ölçüde doğru okunabildiği ve bu sinyallere ne kadar hızlı yanıt verilebildiğiyle yakından ilişkilidir. Bu nedenle bir sonraki bölüm olan Müşteri Talebi ÇS'leri, belirsiz ve hızla değişen piyasa koşullarında müşteri ihtiyaçlarına çevik biçimde yanıt verebilmeyi mümkün kılan stratejik yaklaşımları incelemektedir.

1.1.2.4. Müşteri Talebi Kategorisindeki ÇS'ler

Çeviklik kavramının belki de çıkış noktası olarak düşünülebilecek müşteri talebi, ÇS tercihlerinde işletmeler için dikkate almaları gereken en önemli olgulardan biri olabilir. Müşteri talebi göz önünde bulundurularak oluşturulacak herhangi bir yapı ya da strateji işletmenin kurumsal satış yapması ya da son kullanıcıya ulaşan perakendeci olması fark etmeksizin müşterilerde değer algısını ve memnuniyetini doğrudan artırabilmektedir (Gligor vd., 2020: 725). Böylece müşterilerle kurulan ilişkilerde güven inşası da sağlanmış olur (Mirando ve Herath, 2024: 1). Müşteri talebine verilen yanıt işletme tarafından tek taraflı bir çaba olarak görülebilse de aslında müşteri sadakati sağlayarak işletmeye daha fazla katkıda bulunmakta; özellikle yeni müşteri kazanımında kritik bir rol oynamaktadır (Gligor vd., 2020: 725). Dolayısıyla, müşteri odaklı çeviklik uygulamaları, belirsiz talep ortamlarında rekabetçi avantaj sağlamakla kalmaz, aynı zamanda işletmenin pazar uyum kabiliyetini sistematik olarak güçlendirir. Bu bilgiler ışığında “Müşteri Talebi” bu çalışmada ÇS kategorilerinden biri olarak yer almış ve bu kategoride yer alan ifadeler aşağıda listelenmiştir:

- Müşteri Odaklı Yenilikçilik: Müşterilerin ihtiyaçlarını karşılama kapasitesini ve beklenmedik değişikliklerden hızla kurtulma yeteneğini içeren stratejik planlamalar oluşturmak (Fahed-Sreih ve El-Kassar, 2017).

- Firenin Azaltılması: Müşterilerin ihtiyaçlarındaki değişikliklere karşı yüksek hassasiyet gösterirken zaman ve fireyi en aza indirmeye çalışan bir strateji oluşturmak (Gunasekaran vd., 2019).
- Müşteri Memnuniyeti: Üretim ve teslimat süresini kısaltmak, ürün geliştirme döngüsünü azaltmak, sipariş doğruluğunu artırmak ve müşteri iletişimini ve memnuniyetini iyileştirmek için dahili ve iş birliğine dayalı operasyonlarını yeniden düzenleme yeteneğine sahip olmak (Dubey vd., 2021).
- Talep Değişimleri: Üretim sürecinde müşteriden gelen değişiklik taleplerini doğru zamanda minimum maliyetle gerçekleştirmek (YTO).

Müşteri talebine yönelik ÇS'ler, değişen ihtiyaç ve beklentilere hızlı, esnek ve kişiselleştirilmiş yanıtlar üretebilme kapasitesine dayanmakta; bu stratejiler, pazardaki belirsizliklerle başa çıkmada işletmelere önemli bir avantaj sunmaktadır. Ancak bu avantajın sürdürülebilir hâle gelebilmesi, yalnızca ön saflardaki yanıtlarla değil, aynı zamanda işletme genelinde stratejik ve operasyonel düzeyde alınan kararlarla da doğrudan ilişkilidir. Bu doğrultuda bir sonraki bölüm olan Stratejik ve Operasyonel ÇS'ler, çevikliğin kurumsal planlama, kaynak tahsisi ve süreç yönetimi gibi temel alanlara nasıl entegre edildiğini ortaya koymaktadır.

1.1.2.5. Stratejik ve Operasyonel Kategorisindeki ÇS'ler

Müşteri taleplerindeki hızlı değişkenlik, işletmeleri sadece üretim kapasitesini değil, aynı zamanda stratejik ve operasyonel çevikliğini de etkin şekilde yeniden yapılandırmaya zorlamaktadır. Bu nedenle işletme yöneticileri ve politika yapıcıları, farklı koşullara uygun stratejiler ve politika önlemleri geliştirme ihtiyacıyla karşı karşıya kalmaktadır. Bu bağlamda özellikle küresel ekonomideki çeşitli endüstrilerin, aktörlerin ve pazarların birbirine bağımlı olduğunu ve dolayısıyla ülkeler arasındaki etkileşimin zamanla ve birbirini takip eden biçimde yayılabileceğini göz önünde bulundurmaları gerekmektedir (Liu vd., 2020: 285). Bu yüksek belirsizlik içeren ortamlarda işletmeler kaynaklarını daha etkin kullanabilmek, üretkenliğini artırabilmek ve daha hızlı reaksiyon verebilmek için operasyonel süreçlerini ÇS'ler ile kurgulamalıdır (Panigrahi vd., 2023: 7). Çünkü çeviklik, operasyonel performansa doğrudan olumlu etki ederken, bu etki maliyet verimliliği yoluyla dolaylı biçimde de güçlenmektedir. Şüphesiz ki operasyonel performans sadece kavramsal olarak çeviklikten beslenemez ancak işletmenin bütün paydaşlarıyla ve yapılarıyla özümsemiği noktada hem stok seviyelerinin daha iyi yönetilmesini hem de müşteri memnuniyetini artıracak biçimde hizmet esnekliği sağlayabildiği düşünülmektedir. Bu bağlamda, operasyonel ve stratejik çeviklik yaklaşımları

yalnızca esneklik sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda süreçlerin yeniden yapılandırılmasına olanak tanıyarak rekabet avantajı yaratabilmektedir. Bu bağlamda belirlenen “Stratejik ve Operasyonel” ÇS’leri aşağıdaki gibidir:

- Çalışan Yetkinliği: Değer yaratmak ve rekabet avantajı oluşturmak için yeni süreçleri öğrenme, uyarlama, uygulama ve rol ve sorumlulukları genişletme becerilerine sahip insan kaynağı oluşturmak (Ananthram ve Nankervis, 2013).
- Etkili Eğitim Ortamı: Başarısızlığa karşı toleranslı bir kültür geliştirmek, işletmenin varlığını sürdürebilmesi için çalışanlara gerekli becerileri ve gerektiğinde risk almayı öğretmeyi destekleyen bir ortam yaratmak (Agarwal vd., 2021).
- Paydaş Değeri: Endüstri 4.0 teknolojileriyle müşteri memnuniyeti, mevzuata uygunluk, gelir artışı veya marka duyarlılığı gibi önemli fırsatlar elde ederek paydaş değerini en üst düzeye çıkarmak (Fatorachian ve Kazemi, 2021).
- Üretim Süreçleri: Çevik üretim sistemleri kurarak ürün kalitesi, süreç çevikliği ve daha düşük operasyonel maliyetler elde etmek (Ghobakhloo vd., 2025).
- Rekabet Avantajı: Endüstri 4.0 uygulamaları sayesinde üretim sistemlerini geliştirerek maliyet liderliği elde etmek ve rekabet avantajı kazanmak (Baştuğ vd., 2020).
- Risk Yönetimi: Tüketici talebi tahminlerinde artan belirsizlik, paydaşlar arası bilgi aktarımındaki gecikmeler ve çarpıklıklar gibi beklenmedik risklere yanıt veren uygun bir üretim sistemi oluşturmak (Jeong vd., 2020).
- İnsansız Sistemler: Gemi mürettebatının ve çalışanların sayısını azaltarak ya da tamamen insansız uygulamalara geçerek işletme maliyetlerini ve insan hatalarını azaltmak (Chen vd., 2023).

Stratejik ve operasyonel düzeyde geliştirilen ÇS’ler, işletmelerin iç süreçlerinde hızlı karar alma, kaynakları etkin kullanma ve organizasyonel uyum sağlama gibi yetenekleri sistematik bir yapıya kavuşturmayı amaçlamaktadır. Ancak işletmeler, yalnızca içsel dinamiklerle değil, aynı zamanda kontrol alanlarının dışında gelişen beklenmedik ve yıkıcı dış koşullarla da karşı karşıya kalabilmektedir. Bu nedenle bir sonraki bölüm olan Diğer Koşullar, pandemi, ekonomik krizler ve iklim krizi gibi olağanüstü durumlar karşısında işletmelerin çevikliğini koruyabilmesini mümkün kılan ÇS yaklaşımlarını ele almaktadır.

1.1.2.6. Diğer Koşullar Altındaki ÇS’ler

İçeriği ve dayanağı her ne olursa olsun benzeri görülmemiş bir küresel kriz veya büyük ölçekli şok meydana geldiğinde, bu durum sistemdeki bütün aktörleri etkiler ve bu noktada dayanıklılık ve çeviklik büyük önem kazanır (Liu vd., 2020: 278). Bireylerin, örgütlerin ve

toplumların şok anıyla ve bunun yol açtığı ekonomik ve toplumsal sarsıntılarla mücadelede hayatta kalabilmesi ve reaksiyon gösterebilmesi için dayanıklı, esnek ve çevik olması gerekmektedir. Bu noktada dayanıklılık, esneklik ve çeviklik yalnızca psikolojik hazırlığı değil, aynı zamanda örgütsel desteği ve sistem düzeyinde hazırlığı da gerektirmektedir. Bu da ancak ilgili aktöre yönelik çevik bir bakış açısıyla düzenlenen stratejilerle mümkün olabilir. Araştırmalar, mesleki bağlamların hem bireylerin hem de örgütlerin bu özellikleri geliştirmesine ve etkili baş etme stratejileri oluşturmaya önemli ölçüde katkı sağlayabileceğini göstermiştir (Liu vd., 2019: 1228). Örneğin, pandemi sürecinde sağlık çalışanlarının maruz kaldığı stres düzeyi olağanüstü boyutlara ulaşmıştır ve bu bireylerin, hasta etkileşimlerinde karşılaşılabilecekleri olası sorunlara karşı dayanıklı ve çevik yanıtlar verebilecek şekilde hazırlıklı olmaları kritik bir gereklilik haline gelmiştir. Ayrıca, bireylerde, örgütlerde ve toplum genelinde dayanıklılık oluşturmaya amaçlayan müdahalelerin tasarımında kültürel farklılıkların dikkate alınması ve bu farklılıkların tasarıma dahil edilmesi gerekmektedir (Liu, 2020: 415). Bu nedenle olağanüstü koşullara karşı kurgulanması planlanan stratejilerin mümkün oldukça çok yönlü, bütün aktörleri gözetken ve geniş kapsamlı olması gerekmektedir. Bunun için yukarıda açıklamaları verilen bütün strateji kategorilerinin bütünleşik olarak değerlendirilip işletmenin özellik ve ihtiyaçlarına göre bir yol haritasının oluşturulması gerekmektedir. Bu yol haritasının sahip olması gereken en önemli özelliklerden biri çevikliğini sağlayabilmesi ve duruma göre değişkenlik gösterebilmesidir. Bunun için örneğin farklı coğrafi konumlarda farklı tesisler açmak ya da daha büyük kapasiteli tesisler kurmak bir bölgede olağanüstü bir durum yaşandığında bütün üretim operasyonlarının diğer tesislere kaydırılabilmesi imkanını tanıyabilmektedir. Bu yöntem görece ek maliyetlere sebep olsa da katlanılan maliyet üretim kapasitesinin daha iyi ayarlanabilmesine olanak tanıyabilir ve tedarik zinciri kesintisine karşı bir koruma görevi görebilir (Fahimnia vd., 2018: 143). Örneklendirilen koşullar ve çözüm yolları düşünüldüğünde bu çalışmada “Diğer Koşullar” kategorisinde yer alan ÇS ifadeleri aşağıdaki gibidir:

- Dayanıklılık: Organizasyona ve çalışanlara belirsizliklerle başa çıkma ve bu belirsizliklerden kurtulma konusunda çeşitli beceriler kazandırmak (Miceli vd., 2021).
- Ekonomik Etkililik: Ekonomik gerileme dönemlerinde iş gücünü yavaşlatmadan firma harcamaları üzerinde mutlak kontrol ve görünürlük sağlamak (Kumar vd., 2022).
- Düşük Gecikme Süresi: Herhangi bir üretim yapılandırmasında gecikmeleri ve bu gecikmelerden kaynaklı iş yükünü minimize etmek (Zhang, 2011).
- Üretim Sistemi: Çevik bir üretim sistemi kurarak, sosyo-politik değişimlerden doğal afetlere veya ekonomik krizlere kadar çeşitli nedenlerden kaynaklanan olası kesintilerden

tamamen kaçınmak için çevreyi sürekli izlemek (Modgil vd., 2021b); bu kesintilerin olası etkilerinden derhal kurtulmak için kendini en uygun şekilde yeniden yapılandırabilmek (Lohmer vd., 2020); kesinti yaşandıktan sonra optimum operasyonel performansı hızlı bir şekilde sağlamak (Modgil vd., 2021a); böylece kesintilerin etkisini proaktif olarak en aza indirebilmek.

- Üretim Planlaması: Türbülans veya kesinti senaryoları altında etkileri ve alternatifleri hızlı bir şekilde değerlendirmek için what-if senaryo planlaması veya eşzamanlı planlama gibi modern planlama sistemlerini kendi üretim planlama süreçlerine dahil etmek (Abdirad ve Krishnan, 2021).
- Kapasite Planlaması: Uzun vadeli perspektifte topluma ve pazarlara mal ve hizmet sağlanmasını güvence altına almak için sürdürülebilir gelişmeler doğrultusunda iç ve dış değişikliklere yanıt olarak kapasite kullanımını ve bunların taleplere tahsisini ayarlayarak küresel kesinti zamanlarında hayatta kalabilen dinamik bir yapı kurmak (Ivanov ve Das, 2020).
- Tesis Kapasitesi: Yaşanabilecek kesintiler sırasında üretim kapasitesini stabil tutabilmek için dağınık konumlarda çok sayıda veya daha büyük tesisler kurmak (Fahimnia vd., 2018).
- İş birliği: İşletme yeni bir ürün türüyle ilgili deneyim sahibi olmadığında diğer kuruluşlarla iş birliği yapabilmek (Ivanov, 2023).

Bu çalışmada ele alınan ÇYG ile ÇS'ler aracılığıyla, işletmelerin hem içsel süreçlerde hem de dışsal belirsizlikler karşısında nasıl çevik kalabileceklerine dair çok boyutlu bir çerçeve ortaya koyulmaya çalışılmıştır. Yukarıda detayları paylaşılan ifadelerin uzman görüşlerine göre gerçekleştirilen analizi ilerleyen bölümlerde irdelenecektir. Ancak öncelikle bu çok boyutlu çerçevenin Çevik Üretim ile birlikte temelini oluşturan iki ana eksen olarak Endüstri 4.0 ve Sürdürülebilirlik kavramlarına ilişkin açıklamalara ve ilgili literatürün kısa bir değerlendirmesine yer verilmiştir. Çevik üretimin, günümüz koşullarında sürdürülebilir biçimde uygulanabilmesi, büyük ölçüde dijital teknolojilerle desteklenen yapısal dönüşümlere bağlıdır. Bu doğrultuda bir sonraki bölüm olan Endüstri 4.0, çevikliğin dijitalleşme ile nasıl yeniden biçimlendiğini ve teknolojik gelişmelerin bu süreçte nasıl katkı sağladığını incelemektedir.

1.2. Endüstri 4.0

Zaman içinde teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, modern organizasyonlarda teknolojinin rolünü anlamak her geçen gün daha büyük bir önem ve odak kazanırken; farklı disiplinlerdeki araştırma gündemlerinin birbirine yaklaştığı söylenebilir (Crick ve Chew, 2017:

631). Her disiplin, kendi özelliklerini bu gündemlere empoze eder ve böylece çok çeşitli kavramsallaştırmalar ve tanımlamalar ortaya çıkar. Bu kavramsallaştırmaları ve tanımlamaları ayırtırmak yerine sentezlemenin faydalı olacağı düşünülebilir çünkü bu yapılar transdisipliner bir yaklaşım gerektirmektedir. Dolayısıyla, Endüstri 4.0 kavramı ele alınırken onunla ilişkili pek çok kavram göz önünde bulundurulmalıdır. Bu çalışma özelinde, özellikle çevik üretim ve sürdürülebilirlik kavramlarına odaklanılmıştır.

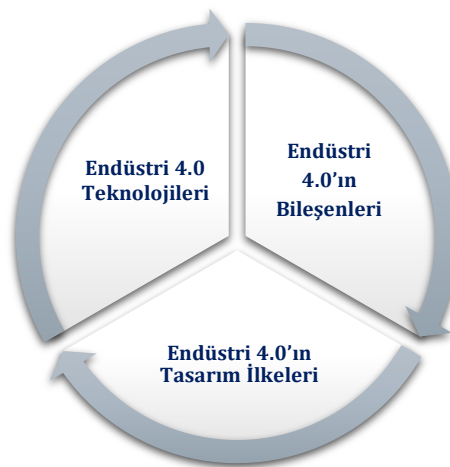
Modern kuruluşlar hem boyut hem de karmaşıklık açısından sürekli gelişen bir teknoloji uygulamaları portföyüyle karşı karşıyadır ve bu durum kurumsal çeviklik için sorunlar yaratabilmektedir (Rettig, 2007). Pazara sunma süresini kısaltma ve kalitesizlik maliyetini düşürme ihtiyacı, gelişmiş endüstrilerde faaliyet gösteren kuruluşları teknolojiyi keşfetmeye veya gerekirse dışarıdan tedarik etmeye yönlendirmektedir (Ellingsen ve Aasland, 2019: 12). Müşteri talebindeki çeşitlilik ve artan rekabet ortamı düşünüldüğünde bu durumun kaçınılmaz olduğu görülebilir. Bu nedenle hem kuruluşlar hem de ülkeler bu konuda önlemler almak durumunda kalmıştır. Bu önlemlerden biri olarak Alman Federal Hükümeti tarafından, High-Tech Strategy kapsamında geliştirilen bir girişim olan Endüstri 4.0 ilk kez 2011 yılında Almanya'nın en önemli sanayi fuarı Hannover Fuarı'nda geniş kitlelere sunulmuştur (Deutschland.de, 2014). Reuters'ta yer alan O'Donnell ve Waldersee imzalı habere göre (2016) Angela Merkel'in koalisyon hükümeti, Çin gibi düşük maliyetli üretim yapan ülkelerle rekabet edebilmek ve Almanya'nın endüstriyel liderliğini koruyabilmek için Endüstri 4.0'ı ekonomik geleceğin ana stratejisi haline getirmiştir. Bu kökeni nedeniyle Endüstri 4.0 kavramı yalnızca teknolojik bir gelişme olarak değil, aynı zamanda Almanya'nın "imalat mühendisliği endüstrisinde lider konumunu" destekleme hedefiyle güçlü bir politik anlam da taşımaktadır (Beier vd., 2020: 2). Kavram özellikle üretim sektöründe geniş kapsamlı etkiler yaratmış ve uluslararası düzeyde büyük ilgi görmüştür. Bu sayede önemli teknolojik ve operasyonel gelişmelerin gerçekleşmesini mümkün kılarken hem akademik çevrede hem de özel sektörde öne çıkan bir konu haline gelmiştir. Ortaya çıktığı dönemden itibaren Endüstri 4.0 literatürü, kavramın kapsamını, özelliklerini ve etkilerini araştıran sayısız çalışmayla doludur. Buna rağmen, politik hedeflerle teknolojik gelişmeleri bir araya getiren Endüstri 4.0 kavramının net bir tanımdan yoksun olması birçok araştırmacı tarafından eleştirilmektedir (Heng, 2014: 1; Lasi vd., 2014: 239; Oesterreich ve Teuteberg, 2016: 125; Ghobakhloo vd., 2025: 62). Endüstri 4.0 ilk olarak firma düzeyinde üretim süreçlerinin dijitalleşmesi olarak tanıtılsa da sonraları gerçekleştirilen araştırmalarda üretim değer zincirlerinin de dijital dönüşümü içerdiği savunulmuştur (Kazancoglu vd., 2023: 903). Bu da kavramın tıpkı Çevik Üretim ve Sürdürülebilirlik gibi bütünselik bir yapıda olduğunun göstergesidir. Bu bütünselik yapı

dönüşümünün ve dijital devrimin, tek bir sektör için değil inşaat, enerji ve sağlık gibi birçok sektörde gerçekleşmekte olduğu görülmektedir. (Lekan vd., 2022: 2648). Bu da Endüstri 4.0 tanımını dijitalleşme ya da yeni teknolojik gelişmeler çerçevesinden çıkarıp endüstriyel değer zincirlerinde sistem, şirket, tedarik zinciri ve değer ağı düzeylerinde değer yaratma ve sunma süreçlerinin dijitalleşmesini içeren değişim hareketi haline getirmektedir.

Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP), endüstriyel üretimin dönüşümünü “yeni bir ekonomik paradigma” olarak değerlendirirken bu paradigmanın, maddi refahın artan çevresel riskler, ekolojik kısıtlılar ve sosyal eşitsizlikler pahasına sağlanmak zorunda olmadığını belirtmektedir (UNEP, 2011: 1). Tam tersine Endüstri 4.0, sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin sanayideki dijital dönüşümle uyumlu hâle getirilmesi açısından büyük bir fırsat sunabilir. Bu süreçte sürdürülebilirlik hedefleri göz ardı edilirse, söz konusu dijital dönüşüm aynı zamanda bir tehdit hâline de gelebilir (Beier vd., 2020: 2). Benzer kaygının çevik üretimin gelişiminde de yaşandığı göz önünde bulundurulduğunda hem çeviklik hem Endüstri 4.0 hem de sürdürülebilirlik konusunda bütünleşik bir yaklaşım geliştirilmediği müddetçe amaçlanan kazanımların elde edilmesi bir diğer boyuta zarar vermeden mümkün görünmemektedir. Her ne kadar küreselleşmeyle daha da rekabetçi hale gelen iş dünyasında talepleri yükselerek artan müşterilerin tatmin edilmesi öncelikli bir görev olarak algılansa da bu durum sürdürülebilirliğin çevresel boyutundan ayırık düşünülmemelidir. Teknolojik ilerlemeler ve giderek daha değişken bir toplumla birlikte, endüstrilerin tüketici beklentilerine hızlı ve iddialı bir şekilde yanıt verebilecek çevik üretim süreçleri sağlaması zorunludur. Ancak Endüstri 4.0’ın getirdiği teknolojik yenilikler ve bakış açıları sayesinde bu zorunluluk daha yapıcı bir forma kavuşmakta; şirketler daha esnek, çevik ve yeşil süreçlere sahip olabilmektedir (Yumina ve Ramos, 2022: 176).

Endüstri 4.0 literatürünün görece olgunlaşmasının ardından birçok araştırmacının gerçekleştirdiği literatür taramaları ve kavramsal çerçeve belirleme çalışmaları sonucunda kavramın hala temel özelliklerinin belirlenmesinin zor olduğu görülmektedir. Beier ve diğerlerine (2020: 11) göre Endüstri 4.0 keskin bir şekilde tanımlanmış, homojen bir gelişme değil, farklı gelişmelerin kolektif bir terimi olarak ele alınmalıdır. Endüstri 4.0 kavramının tam olarak bilimsel bir altyapıya sahip olmaması, birçok özelliğinin birden fazla kategori ve sistem düzeyi ile ilişkili olması, sadece teknik yönleri indirgenmemesi gereken sosyoteknik bir gelişme olması gibi nedenlerle net bir tanıma sahip olamayacağı düşünülmektedir. Buna rağmen literatürdeki birçok çalışmada kavram hakkında çeşitli tanımlamalar ve sınıflandırmalar yapılmaya çalışılmıştır. Pek çok araştırmacı arasında, sanayi devrimlerinin uzun bir gelişim süreci gerektirdiği ve geleceğin üretim vizyonları olarak kabul edilen dört temel boyutu

(fabrika, işletme, ürünler ve müşteriler) kapsadığı konusunda genel bir görüş birliği bulunmaktadır (Qin vd., 2016: 174). Örneğin Endüstri 4.0 kavramının akademik alanda ilk detaylı analizlerinden biri olan Lasi ve diğerlerinin (2014: 239) çalışmasına göre Endüstri 4.0, yalnızca teknolojik bir gelişme değil, aynı zamanda değişen toplumsal, ekonomik ve siyasi koşulların yarattığı dönüşüm ihtiyacına bir yanıt olarak ortaya çıkmıştır. Bu bağlamda kavram, dış çevrenin baskısıyla şekillenen ve işletmeleri yeni uygulamalara yönelten bir gelecek projesi olarak tanımlanmıştır. Xu ve diğerleri (2018: 2945), Endüstri 4.0'ın “Akıllı Üretim” ve “Bilişsel Üretim” terimleriyle de ifade edilebileceğini belirtmiş; kavramı, üretim işletmelerinin tasarım, üretim, tedarik ve envanter verilerini analiz ederek modernleşme vizyonlarını hayata geçirmelerine olanak tanıyan yeni bir yöntem ve fırsat olarak tanımlamışlardır. Bir başka örnek olarak Beier ve diğerleri (2020: 4) literatür taramasıyla belirledikleri Endüstri 4.0 ile ilgili on temel özelliği insan, teknoloji ve organizasyon kategorileri olmak üzere üç başlık altında toplamıştır. Ghobakhloo ve diğerlerine göre (2025: 63) Endüstri 4.0'ın anlaşılması zor doğası göz önünde bulundurulduğunda, bu olguyu tasarım ilkeleri ve teknoloji trendleri olarak bilinen temel yapı taşlarına dayanarak tanımlamak gerekmektedir. Marcucci ve diğerlerine göre ise (2022: 1422) Endüstri 4.0'ın teknoloji trendleri, dijital devrimi yönlendiren AI, eklemeli üretim ve Siber-Fiziksel Sistemler (CPS) gibi gelişmiş dijital, bilgi ve operasyon teknolojilerini içermektedir. İncelenen tanımlar ve sınıflandırmalar göz önünde bulundurulduğunda, ele alınan çalışmalarda teknolojinin ortak bir özellik olarak öne çıktığı söylenebilir. Artık erişilebilir hale gelen bu teknolojilerin varlığının işletmelerin dönüşüm süreçlerini tasarlamaları açısından zorunlu olduğu söylenebilir (Hermann vd., 2016: 3934). Dolayısıyla Endüstri 4.0'ın teknoloji temelli bir kavramsal çerçeveye sahip olmasının doğal olduğu düşünülmektedir.



Şekil 1.1 Endüstri 4.0'ın Temel Koşulları

Kaynak: Şekil, yazar tarafından oluşturulmuştur.

Özetlemek gerekirse, Endüstri 4.0'ın genel anlamda birçok karmaşık bileşeni içermekte olup, çok sayıda sektörde geniş bir uygulama alanına sahip olduğu söylenebilir (Xu vd., 2018: 2943). Bu nedenle kavramı algılamak ve uygulamak çok boyutlu düşünmek gerekmektedir. Tıpkı çevik üretim ve sürdürülebilirlik kavramları gibi geniş bir kapsama sahip olan Endüstri 4.0 da bütünlük olarak ele alınıp uygulamaları buna göre tasarlanmalıdır. Bu noktadan ilhamla, literatürde en geniş çapta oluşturulan modellerden biri olan Ghobakhloo ve diğerlerinin (2025: 63) çalışmasındaki “Endüstri 4.0 Arketipi”nden yararlanılarak kavramsal bir özet sunan Şekil 1.1 oluşturulmuş ve Endüstri 4.0 kavramının yapısı bu görsel aracılığıyla ifade edilmeye çalışılmıştır. Buna göre Endüstri 4.0'ın gerçekleştirilebilmesi için üç ana koşuldan söz edilebilir. Bunlar: Endüstri 4.0 Teknolojileri, Endüstri 4.0 Bileşenleri ve Endüstri 4.0 Tasarım İlkeleri'dir. Şekil 1.1 ile vurgulanmak istenen nokta, Endüstri 4.0'ın nasıl bir sınıflandırma veya tanımlamaya dayanırsa dayansın, döngüsel bir yapı şeklinde var olduğudur. Bu döngüsel yapının herhangi bir faktöründe başarıya kavuşmak için diğer faktörleri de bütünlük olarak sisteme dahil etmek gerekir. Bu nedenle her bir faktör aslında bir diğerinin koşuludur ve dolayısıyla birlikte ele alınması gereklidir.

Kuruluşlar Endüstri 4.0 ile ilgili yalnızca uygulama mimarisini içeren teknik zorluklarla yüzleşmek durumunda kalmamakta; aynı zamanda yeni veya değiştirilmiş yetenekleri sağlamak için teknolojinin iş süreçlerinde operasyonel olarak nasıl kullanıldığının özüne inen sosyo-teknik sorunlarla da karşı karşıya kalmaktadır (Crick ve Chew, 2017: 631). Kuruluşların bu katmanlı yapıda değişiklik yapmalarının ne kadar kolay olup olmadığı önemli bir problemdir. Dolayısıyla ilerleyen bölümlerde Endüstri 4.0'ı mümkün oldukça kapsamlı ve çok yönlü ele alan başlıklara yer verilecek, Şekil 1.1'de yer alan Endüstri 4.0'ın temel koşulları hakkındaki bilgilere değinilecektir.

1.2.1. Endüstri 4.0 Teknolojileri

Endüstri 4.0, çoğu zaman yalnızca teknolojik gelişmelerle özdeşleştirilse de aslında bundan çok daha fazlasını içeren bütünsel bir dönüşüm sürecidir. Yaygın kanının aksine, Endüstri 4.0 yalnızca sanal gerçeklik (VR), dijital ikiz, AI veya IoT gibi teknolojilere indirgenemez; aynı zamanda organizasyonel yapıları, üretim süreçlerini, karar alma mekanizmalarını, tedarik zincirlerini, paydaş ilişkilerini ve daha birçok etmeni kapsayan katmanlı bir değişimini ifade eder. Bu nedenle, Endüstri 4.0'ı yalnızca teknolojik bir yenilik olarak görmek yerine; süreç, sistem, insan kaynağı ve değer yaratma modelleriyle bütünlük bir dönüşüm olarak değerlendirmek gerekmektedir (Dutta vd., 2021: 1681). Öte yandan teknolojik gelişmelerin Endüstri 4.0'ın vaat ettiği gelişmelerin sağlanabilmesi açısından

oldukça önemli olduğu unutulmamalıdır. Örneğin, karar destekleyici nitelikteki AI ve büyük veri gibi teknolojilerin işletmelere daha esnek, hızlı ve etkili stratejiler geliştirme olanağı sunduğu görülmektedir (Strandhagen vd., 2022: 999). Ayrıca, IIoT ve IoS gibi yapılar, hizmet odaklı mimariler ve CPS entegrasyonları sayesinde üretim sistemleri daha otonom, özelleştirilebilir ve sürdürülebilir hale gelmektedir (Beier vd., 2020: 10). Bu teknolojik çerçeve, işletmeler ve ekonomiler için rekabet gücünü artırmanın yanı sıra çeviklik ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşma noktasında da kritik bir rol üstlenmektedir (Mani vd., 2016: 48; Su vd., 2021: 1). Literatürde dijitalleşmenin sürdürülebilirliğe katkısı konusunda artan bir uzlaşma bulunmakta (Rai vd., 2006: 225; Gebler vd., 2014: 166; Saberi vd., 2019: 2117; Di Vaio vd., 2020: 309); bilgi teknolojilerinin ve IoT'nin şeffaflık, izlenebilirlik ve değerlendirme becerilerini artırarak kurumsal sürdürülebilirliğe önemli katkılar sunduğu belirtilmektedir (Castro vd., 2021: 15; Paiola vd., 2021: 508). Buna ek olarak, sürdürülebilirliğe ulaşmak isteyen işletmeler için teknoloji ve inovasyonun, bütünüyle vazgeçilmez ve merkezi bir araç olduğunu kabul eden çalışmalar da vardır (Smith vd., 2010: 438). Öte yandan bazı çalışmalar teknolojinin çevresel etkilerine odaklanmamış; müşteri talebi ve rekabet gibi işletmelerin hayatta kalmaları konusunda hayati öneme sahip konulara yönelmiştir. Örneğin Sony ve Naik (2020: 807), müşteri taleplerini en iyi şekilde karşılayabilmek ve rekabet avantajı yaratabilmek adına Endüstri 4.0 teknolojilerini kritik koşullar altında esnek operasyonlar ve optimum yapılanmalar sağlayan bir yaklaşım olarak görmüştür. Bu bakış açısıyla üreticilerin talebe göre ürünlerinin bir versiyonundan diğerine kolayca geçiş yapabildiğini ya da çeşitli optimizasyonlarla yeni bir ürüne dönüştürebildiğini belirtmiştir. Bu şekilde Endüstri 4.0 teknolojilerinin, üretim sistemlerinin daha otonom ve esnek hale gelmesine izin vermesi ve böylece nispeten daha az çabayla özelleştirilmiş ürünler üretmesine olanak sağlaması beklenmektedir (Beier vd., 2020: 10).

Sonuç olarak Endüstri 4.0 her ne kadar sadece teknoloji ve inovasyon odaklı düşünülmemesi gereken bir kavram olsa da öne sürdüğü yapıların gerçekleştirilmesi için bu teknolojilerin varlığı zorunluluktur. İşletmeden işletmeye tasarım ve uygulamalar değişse de bu teknolojilerinin ne oldukları ve varlıklarıyla işletmelerde neleri sağladıkları konusunda bir uzlaşının olduğu söylenebilir. İlerleyen bölümlerde literatürde öne çıkan ve araştırmacılarca fikir birliğine sahip olan Endüstri 4.0 Teknolojileri hakkında bilgiler verilecektir.

1.2.1.1. Eklemeli/Katmanlı Üretim

Eklemeli/Katmanlı üretim (additive manufacturing) ya da diğer bir ifadeyle 3D yazıcı teknolojisi, düşük hacimli, özelleştirilmiş ve yüksek katma değerli üretim zincirlerine sahip

pazarlarda (örneğin havacılık ve medikal bileşen üretimi) üretim girdilerini ve çıktıları maliyet etkin bir şekilde azaltmayı sağlayan bir Endüstri 4.0 teknolojisidir. Özellikle müşteri talebi özelleştirilmiş ürünlerde maliyet etkin üretim sunması nedeniyle 3D teknolojisi modern üretim anlayışında kayda değer bir yer edinmiştir. Ayrıca işgücü yapılarında değişime ve tedarik zincirinde dijitalleşmelere yol açabildiği görülmektedir (Gebler vd., 2014: 158).

Geleneksel üretim faaliyetleri düşünüldüğünde süreçlerde oldukça fazla farklılaşma yaratma potansiyeli olan 3D teknolojisi birçok avantajı da beraberinde getirmektedir. Heng'e (2014: 7) göre bu teknolojilerin sunduğu en büyük avantajlardan biri, üretimin bireysel gereksinimlere göre uyarlanabilmesidir. Oesterreich ve Teuteberg (2016: 123) ise, bu özelleştirme kapasitesinin yalnızca müşteri memnuniyetini artırmadığını, aynı zamanda iç operasyonel maliyetleri de azalttığını vurgular. Sonuç olarak eklemeli üretim ile yüksek kaliteli ve müşteri tatminli ürünler daha düşük maliyetle ve daha yüksek verimlilikle elde edilebilmektedir (Rüßmann vd., 2015: 58; Liu ve Xu, 2017: 5; Beier vd. 2020: 7). Gabriel ve Pessl'e (2016: 136) göre bu durum, özellikle yüksek esneklik gerektiren pazarlarda faaliyet gösteren işletmeler için kritik bir başarı faktörüdür.

İşletmeler eklemeli üretim teknolojilerini çoğunlukla prototipleme ya da bireysel taleplerin üretimi amacıyla kullanmaktadır (Rüßmann vd., 2015: 58). Örneğin, havacılık şirketleri halihazırda uçak ağırlığını azaltan yeni tasarımları uygulamak için eklemeli üretim teknolojilerinden faydalanmaktadır. Bu sayede titanyum gibi pahalı hammadde tüketimlerini düşürerek maliyet avantajı elde etmektedirler. Bir diğer avantaj ise Schmidt ve diğerlerinin (2015: 24) öne sürdüğü ürün iade oranlarının düşmesidir. Bunun nedeni, eklemeli üretim sayesinde özelleştirilmiş ürünlerin kullanıcı ihtiyaçlarını daha iyi karşılamasıdır. Ayrıca 3D teknolojisiyle gerçekleştirilen üretim hata payı görece düşük olan, yüksek performanslı ve merkeziyetsiz bir üretim olabilmesinden dolayı hem taşıma mesafelerini hem de stok miktarını azaltarak yaşam döngüsü maliyetlerinde, enerji tüketiminde ve karbondioksit emisyonlarında düşüş yaratabilmektedir (Gebler vd., 2014: 158).

3D teknolojileri, üretim süreçlerinde sürdürülebilirliği artırma potansiyeline sahipken aynı zamanda dijital dönüşümün temel yapı taşlarından birisi olduğu söylenebilir. Bu dönüşüm, yalnızca fiziksel üretimle sınırlı kalmayıp, üretim süreçlerinin tasarlanması, yürütülmesi ve güncellenmesi gibi konularda da dijital çözümlere olan ihtiyacı beraberinde getirmektedir. Bu noktada, AR ve VR gibi teknolojiler, bilgiye erişimi kolaylaştıran ve insan-makine etkileşimini yeniden tanımlayan yenilikçi araçlar olarak öne çıkmaktadır. Bu doğrultuda, bir sonraki bölümde artırılmış ve sanal gerçeklik teknolojilerine dair temel bilgiler ve bu teknolojilerin üretim süreçlerine katkıları ele alınacaktır.

1.2.1.2. Artırılmış ve Sanal Gerçeklik

Teknolojik gelişmelerin geldiği nokta ve toplumun dünya görüşünün değişimi, insanlığı her geçen gün gerçek dünyaya paralel yeni oluşumların arayışına sürüklemektedir. Bu arayışın somut çıktılarından biri, fiziksel dünyanın dijital biçimlerle yeniden üretildiği artırılmış ve sanal gerçeklik teknolojileridir. Gerçek ile sanal arasındaki çizgiyi bulanıklaştıran bu yeni oluşumlar günlük yaşamın ve endüstriyel süreçlerin bir parçası haline gelmektedir.

Artırılmış gerçeklik (AR) terimi, 1992 yılında Boeing araştırmacısı Thomas Preston Caudell tarafından ortaya atılmıştır. Caudell, endüstriyel kullanım amacıyla bazı montaj diyagramlarını görüntülemeye yönelik bir AR uygulaması geliştirmiştir (Arena vd., 2022: 1). Genel anlamda, fiziksel dünya ortamının doğrudan ya da dolaylı olarak gerçek zamanlı görüntüsünün, bilgisayar tarafından üretilen sanal bilgiler eklenerek zenginleştirilmesi yoluyla oluşturulan bir deneyim olarak tanımlanan AR hem üç boyutlu hem de etkileşimli olarak hizalanmış bir yapıya sahiptir ve gerçek ile sanal nesneleri bir arada sunmaktadır (Carmigniani vd., 2011: 342). AR'a dair farklı bağlamlarda farklı tanımlamalar mevcuttur. Ancak Milgram ve Kishino'nun (1994: 1321) tamamen gerçek ortamlarla tamamen sanal ortamlar arasında uzanan "sanal sürekliliği" (virtuality continuum) kavramı üzerinde bir yerde konumlandığı Karma Gerçeklik (Mixed Reality / MR) sistemlerinin bu bağlamdaki en kapsamlı tanımlamalardan biri olduğu söylenebilir. Bu iki araştırmacı, farklı gerçeklik türlerinin varlığını öne sürerek, gerçek dünyadan başlayıp tamamen sanal bir ortama uzanan bir süreklilik kavramsallaştırmışlardır. Bu sürekliliği bir ucu negatife bir ucu pozitifeye giden bir sayı doğrusuna benzetmek mümkündür; araştırmacılar bu skala üzerindeki farklı gerçeklik algılarını şu şekilde ayırtmıştır (Arena vd., 2022: 2):

- Gerçek Ortam (RE – Real Environment): İçinde yaşadığımız ve fizik kurallarıyla yönetilen fiziksel dünyadır.
- Artırılmış Gerçeklik (AR): Katılımcıların fiziksel gerçekliği deneyimlediği, ancak aynı zamanda sanal öğeleri de gördüğü bir ortamdır.
- Artırılmış Sanallık (AV): Katılımcıların sanal bir gerçeklik içinde bulunduğu, ancak bu ortamda gerçek unsurların da yer aldığı bir deneyimdir.
- Sanal Gerçeklik (VR): Katılımcının tamamen yapay, bilgisayar tarafından oluşturulmuş bir dünyaya daldığı sentetik bir ortamdır.

Burada MR, gerçek ile sanal dünyaların belirli bir noktada birleşimini ifade etmektedir. Burada "gerçek" ve "sanal" terimleri arasındaki görünürdeki açık ayrımın, aslında birden fazla boyuta sahip olduğu vurgulanmaktadır. Bu fark, nesnelerin mi yoksa görüntülerin mi gerçek ya

da sanal olduğu, bu ögelerin doğrudan mı yoksa dolaylı mı görüntülendiğı gibi faktörlere bağılı olarak değışiklik göstermektedir (Milgram ve Kishino, 1994: 1321).

AR, yalnızca kullanıcının fiziksel çevresine değıl, canlı video akışı gibi gerçek dünyanın dolaylı görünümüne de sanal bilgiler entegre ederek hem algıyı hem de etkileşimi geliştirmeyi ve böylece kullanıcı deneyimini kolaylaştırmayı amaçlamaktadır. Ek olarak, gerçek zamanlı olarak sanal nesne ve ipuçlarını gerçek dünya üzerine bindirerek gerçeklik hissini artırır. VR teknolojisi ise kullanıcıyı tamamen yapay bir dünyaya daldırarak gerçek dünya ile olan görsel teması ortadan kaldırmaktadır (Carmigniani vd., 2011: 342).

AR ve VR, Endüstri 4.0 kapsamında dijitalleşmenin üretim süreçlerine entegrasyonunu hızlandıran temel teknolojiler arasında yer almaktadır. Bu teknolojiler, özellikle iş gücünün çevikliğini artırma potansiyeliyle öne çıkmakta; doğru bilgiyi doğru zamanda erişilebilir kılarak karar alma süreçlerini hızlandırmakta ve iş uygulamalarını daha verimli hale getirmektedir. Akıllı giyilebilir cihazlarla birlikte kullanıldığında, AR ve VR uygulamaları çalışanların sahadaki performansını artırmakta ve operasyonel hataları en aza indirmektedir (Mishra vd., 2022: 1347).

AR ve VR teknolojilerinin mevcut endüstriyel uygulamaları arasında, depo içi parça seçimi, bakım-onarım süreçleri ve mobil cihazlar üzerinden talimat iletimi gibi hizmetler yer almaktadır (Rüßmann vd., 2015: 58). Bu sistemler gerçek zamanlı bilgi sağlama kabiliyetleri sayesinde çalışanların görevleri daha hızlı ve doğru bir şekilde yerine getirmesine olanak tanımaktadır. Örneğin, bir teknisyenin tamir edilmesi gereken bir sisteme bakarken AR gözlükleri gibi bir cihaz aracılığıyla gerekli parçaya ilişkin talimatları doğrudan görüş alanında görmesi mümkündür. Buna ek olarak, AR ve VR teknolojileri eğitim süreçlerinde de etkin biçimde kullanılmaktadır. Örneğin, Siemens'in Comos yazılımı ile geliştirdiğı sanal operatör eğitim modülü, gerçek verilerle oluşturulmuş üç boyutlu bir sanal ortam sunarak çalışanların olası acil durumlara karşı hazırlıklı olmalarını sağlamaktadır. Bu sayede kullanıcılar, makinelerin siber temsilleriyle etkileşime geçebilmekte, parametreleri değıştirebilmekte ve sistemle ilgili operasyonel ya da bakım bilgilerine erişebilmektedir.

Son olarak, AR ve VR teknolojileri, yalnızca üretim sahasında değıl, aynı zamanda kurumsal iş birliğinin dijitalleşmesinde de stratejik bir rol oynamaktadır. Diğere teknolojilerle entegre edildiklerinde, merkezi iş birliğı platformları aracılığıyla tüm sistem düzeylerinde iletişimi ve koordinasyonu güçlendirmektedir (Oesterreich ve Teuteberg, 2016: 130). Böylelikle, Endüstri 4.0'ın sunduğı dijital altyapı, yalnızca verimliliğı değıl, aynı zamanda çevikliğı ve öğrenen organizasyon yapısını da desteklemektedir. Gerçek ve sanal dünyanın bütünleştiğı bu teknolojik zemin, üretim hattında daha ileri otomasyon uygulamalarının ve

akıllı robotların entegrasyonuna olanak tanımaktadır. Bir sonraki bölümde otomasyon ve endüstriyel robotlar hakkında bilgi verilecektir.

1.2.1.3. Otomasyon ve Endüstriyel Robotlar

Otomasyon, Endüstri 4.0 kapsamında sıklıkla süreç düzeyiyle ilişkilendirilen bir kavram olup, üretim süreçlerinde dijital dönüşüme imkân tanıyan kritik etkenlerden biri olduğu düşünülmektedir. Heng'e (2015: 2) göre Endüstri 4.0'ın temel fikri, "akılcı otomasyon yoluyla verimliliğin artırılması"dır. Otomasyon kavramı çoğu zaman üretimin dijitalleştirilmesi, optimize edilmesi ve özelleştirilmesi gibi özellikleriyle sadece üretim süreçleriyle özdeşleştirilse de aslında kapsamı bunun ötesine uzanmakta; otomatik ve katma değerli hizmet sunumu (Lasi vd., 2014: 240; Schlechtendahl vd., 2015: 147), eş zamanlı dijital iletişim sistemleri (Shrouf vd., 2014: 698), veri alışverişi ve insan-makine etkileşimi (Lu, 2017: 1), araçların yönetimi (Li vd., 2017: 35) ve tedarik zinciri aktörlerine geri bildirim sağlanması (Sanders vd., 2016: 818) gibi alanlara da temas ederek çok yönlü bir etki sağlayabilmektedir. Bu çeşitlilik, otomasyonun sadece üretim odaklı değil, aynı zamanda bilgi ve hizmet akışı düzeyinde de ele alınması gerektiğine dikkat çekmektedir.

Otomasyonun bu çok boyutlu gelişiminde temel teknolojik kolaylaştırıcılar olarak CPS ile IoT teknolojilerinin yeri gözardı edilmemelidir (Li, 2018; Wollschlaeger vd., 2017; Xu vd., 2018). Söz konusu teknolojilerin entegrasyonu sayesinde, bazı üretim ağlarının neredeyse tamamen otomatikleştiği ve bu durumun değer zincirinin genel yapısını yeniden tanımlayabilecek potansiyele sahip olduğu öne sürülmektedir (Rüßmann vd., 2015: 56). Örneğin, üretim verilerinin çalışanlar için daha anlamlı hâle getirilmesini mümkün kılan otomatik geri bildirim sistemleri ve bu verilerin bilişsel olarak işlenmesini kolaylaştıran ön işlemlerden geçirilmesi değer zincirinin yapısındaki potansiyel değişimlerden biri olarak ele alınabilir. Ayrıca otomasyon, çalışanların ve özellikle operatörlerin üzerindeki yükü azaltabilecek; lojistik gibi süreçlerde insan müdahalesini minimize edebilecek özelliklere sahiptir (Hofmann ve Rüsch; 2017: 31; Li, 2018: 73). Bu yorumlar, otomasyonun insan-merkezli iş gücünü tamamen ortadan kaldırmaktan ziyade, onun iş yükünü yeniden yapılandırmaya ve iş tanımlarını güncellemeye yönelik bir dönüşüm olarak da değerlendirilebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, otomasyonun çevresel etkilerine doğrudan değinilmediği, buna karşın sosyal ve ekonomik etkilerin daha fazla ele alındığı gözlemlenmiştir.

Otomasyonla yakından ilişkili bir diğer teknolojik olgu ise endüstriyel robot teknolojileridir. Robotlar sanayide uzun süredir kullanılmakla birlikte, Endüstri 4.0 sonrasında

otonomluk, esneklik ve insanlarla iş birliği kapasitesi açısından evrim geçirdiği söylenebilir. Yeni nesil robot sistemlerinin yalnızca birbirleriyle değil, insanlarla da güvenli ve uyumlu bir biçimde çalışabilecek şekilde geliştirildiği; hatta bazı örneklerde, bu robotların üretim süreçlerine dair bağlamsal bilgileri öğrenme ve eylemlerini buna göre uyarlama yetenekleri kazandığı bildirilmektedir (Rüßmann vd., 2015: 56). Örneğin, Avrupa merkezli robotik ekipman üreticisi Kuka tarafından geliştirilen bağlı robot sistemlerinin, üretim hattındaki değişikliklere göre kendi eylem planlarını otomatik biçimde yeniden düzenleyebildikleri aktarılmaktadır. Benzer şekilde, elektrifikasyon ve otomasyon alanında küresel teknoloji liderlerinden biri olan ABB tarafından 2015'te geliştirilen dünyanın ilk gerçek işbirlikçi robotu olan YuMi adlı iki kollu robot, insanlarla birlikte tüketici elektroniği montajı gibi ince motor beceriler gerektiren görevlerde çalışmak üzere tasarlanmış olup, yumuşak yüzey kaplamaları ve görsel tanıma sistemleri sayesinde güvenli bir etkileşim ortamı sunmaktadır. Bu tür örnekler, endüstriyel robotların yalnızca üretim verimliliğini artırmaya değil, aynı zamanda insan-robot etkileşimini daha ergonomik ve sürdürülebilir hâle getirmeye yönelik bir evrim geçirmekte olduğunu düşündürmektedir. Bu sadece daha sürdürülebilir ve kaynak açısından verimli bir gelecek sağlamak mümkün olabilir. Sadece otomasyon ile bu seviyeye ulaşmak mümkün değilken otonom üretim ağlarının çevresel değişikliklere etkin biçimde yanıt verebildiği ve stratejik hedefleri izleyebildiği değerlendirilmektedir (Erol vd., 2016: 14). Sonuç olarak bütün süreçlerin otonom olarak gerçekleştirilmesinin ve karar mekanizmalarının otomatikleşmesinin insan kaynaklı hataları azaltırken kaynak verimliliği, israfın minimizasyonu, zamanın ve ham maddenin verimli kullanılması gibi hem çevresel hem ekonomik hem de sosyal anlamda olumlu sonuçlar elde edilmesini sağlayabileceği düşünülmektedir (Beier vd., 2020: 6).

Otomasyon, endüstriyel robotlar ve otonom sistemler üretim süreçlerinde kayda değer bir dönüşüm sağlamış olsa da bu sistemlerin çevresel değişkenlere uyum sağlaması ve karmaşık durumlara yanıt verebilmesi için daha gelişmiş bilişsel yeteneklere ihtiyaç duyduğu görülmektedir. Bu gereksinim, teknolojilerinin üretim ortamlarına entegrasyonunu gündeme getirmekte; veri analitiği, örüntü tanıma ve karar destek mekanizmaları gibi yetilerle üretim süreçlerinin daha akıllı ve öngörülü hâle gelmesine imkân tanıyabilmektedir. Buradan hareketle bir sonraki bölümde AI hakkında bilgi verilecektir.

1.2.1.4. Yapay Zekâ

Endüstri 4.0'ın yarattığı dijital dönüşüm paradigması, bünyesinde barındırdığı teknolojik yeniliklerle birçok sektörde esnek ve verimli üretim süreçlerinin yeniden yapılandırılmasına imkân tanımıştır. Bu dönüşümün merkezinde ise AI, makine öğrenmesi,

sensör ağları, IoT, bulut bilişim, eklemeli üretim ve büyük veri teknolojileri gibi birçok element yer almaktadır. Özellikle AI ve makine öğrenmesi algoritmaları sayesinde, üretim süreçlerinde veri temelli karar alma süreçleri güçlenmiş; sistemlerin kendi kendini optimize etme ve çevresel değişkenlere uyum sağlama kapasiteleri artmıştır (Jan vd., 2023: 1).

Endüstri 4.0 kapsamındaki belki de en önemli yapısal dönüşümlerden biri, merkeziyetçi kontrol sistemlerinden ademi merkeziyetçi ve dağınık yapılarla yönetilen üretim sistemlerine geçişe olanak tanınmasıdır. Bu değişim, yalnızca fiziksel yerleşim biçimlerini değil, aynı zamanda karar alma süreçlerini ve sistem mimarisini de kapsamaktadır (Almada-Lobo, 2015: 18). Geniş bir anlamda ademi merkeziyetçilik; merkezi kontrol sistemlerinin yerini, kendi kendini organize eden, otonom iş birimlerine bırakan, AI sistemleri ile bilgiyi yerinde analiz edebilen ve dağınık birimler arasında otonom karar alma süreçleri yürütebilen bir yapı olarak tanımlanabilir (Shrouf vd., 2014: 698; Lasi vd., 2014: 239; Stock ve Seliger, 2016: 539; Li, 2018: 68). Organizasyonel bağlamda ise; işletme ve süreç düzeyindeki kararların merkezi olmayan bir yapıya kaymasını ifade ederken, bu dönüşüm elle müdahale gerektirmeksizin entegre edilebilen ve uyarlanabilen modüller sistemler (Sanders vd., 2016: 823), bağlantılı ürün ve hammadde (Wollschlaeger vd., 2017: 22), özgün tanımlayıcılar (Xu vd., 2018: 2941) ve hizmet odaklı mimari yapılarla desteklenmektedir (Gabriel ve Pessl, 2016: 132; Lu, 2017: 3). Dolayısıyla bu süreç akışında AI, faaliyetlerin sorunsuz ve etkin biçimde yürütülmesi açısından sistemlere entegre edilmesi zorunluluk arz eden teknolojilerden biri olarak öne çıkmaktadır.

AI ve makine öğrenimi sayesinde üretim süreçlerinde yaşanan hızlı gelişim, işletmeler ve hükümetler arasında artan bir rekabet ortamını beraberinde getirirken (Guandalini, 2022 :456), Di Vaio ve arkadaşları (2020: 295) bu teknolojilerin yetkin kullanımının uluslararası düzeyde stratejik bir avantaj unsuru haline geldiğini ifade etmektedir. Bu bağlamda, AI kullanımı ve dijitalleşme yalnızca bir tercih değil, aynı zamanda kurumsal, ulusal ve uluslararası düzeyde bir zorunluluk olmaya başlamıştır. George ve diğerleri (2021: 1000) tarafından “dijital zorunluluk” kavramı ile tanımlanan bu eğilim, dijital teknolojilere geçişi geciktiren aktörlerin rekabet gücünü kaybetme riskiyle karşı karşıya kaldığını göstermektedir. Dolayısıyla bu zorunluluğun hem kamu politikalarında hem de özel sektör yatırımlarında belirleyici bir unsur olarak değerlendirilmesi önerilmektedir.

AI teknolojileri birçok faydayı beraberinde getirirken aynı zamanda benimsenme, uygulanma ve sistemleştirme faaliyetlerinde sektörel anlamda bazı farklılıklar gösterebilmektedir. Bu farklılıklar yapısal sorunlar ya da ortak fırsatlar olarak ortaya çıkabilmektedir. Örneğin, AI benimseme sürecinin veri toplama, veri işleme, model oluşturma ve sonuçların yorumlanmasını kapsayan bir çerçevede gerçekleştiğini belirten Jan ve

arkadaşları (2023: 1); farklı sektörlerin benzer sorunlarla karşılaşmalarına rağmen geliştirilen çözümlerin genellikle sektörlere özgü olduğunu ve bu çözümlerin diğer sektörlerle doğrudan aktarılmasının zor olabileceğini belirtmektedir. Ayrıca, sektörler arasındaki farklılaşan deneyim düzeyleri ve AI uygulamalarının olgunluk seviyeleri de AI stratejilerinin sektöre göre değişkenlik göstermesine neden olabilmektedir. Bu bağlamdaki spesifik kavramlardan biri olan coğrafi yapay zekâ (GeoAI), yüksek performanslı bilgi işlem alanındaki gelişmelerden yararlanarak, mekânsal büyük veriden anlamlı bilgiler elde etmek amacıyla çeşitli makine öğrenimi tekniklerini (örneğin derin öğrenme, sinir ağları) ve veri madenciliği yöntemlerini uygulayan yeni bir bilim dalı olarak ifade edilmektedir (Merrill vd., 2019: 24). GeoAI, hava kirliliğini tahmin etmek amacıyla kullanılmakta olup, bu yönüyle potansiyel fırsatların ve yatırım risklerinin otomatik olarak hesaplanmasını sağlayabilmektedir. Saha düzeyinde ise balık ya da kahve çekirdeği gibi tarım ve su ürünlerini tespit edip sınıflandırabilmekte; bu sayede sadece sanayide değil, tarım ve balıkçılık gibi alandalarda da sürdürülebilir ve etik uygulamaların izlenmesine imkân tanımaktadır. Buradan hareketle AI'nın bahsi geçen örnekler dahil olmak üzere birçok alanda çevresel faydalar sağlayabileceği düşünülebilir. Özellikle AI ile ademi merkezîyetçi bir yapıya dönüşen işletmeler için bu dağınmık yapıların, çevresel değişikliklere hızlı ve etkili biçimde yanıt verebildiği, organizasyonel stratejiler doğrultusunda dinamik olarak yeniden yapılandırılabilirdiği ve üretim süreçlerinin görece düşük enerjiyle gerçekleştirilebildiği değerlendirilmektedir (Erol vd., 2016: 14; Wollschlaeger vd., 2017: 22).

Sonuç olarak, Endüstri 4.0 çerçevesinde AI teknolojilerinin üretim süreçlerine entegre edilmesi, yalnızca üretim verimliliğini artırmakla kalmamakta, aynı zamanda organizasyonel yapılar, karar alma süreçleri ve dijital rekabet stratejileri üzerinde de derin etkiler yaratmaktadır. Ancak bu teknolojik dönüşümün sürdürülebilirlik bağlamında nasıl değerlendirileceği ve ne tür sosyal, çevresel ya da etik riskler barındırabileceği konusu hâlâ gelişmeye açıktır. Ayrıca, AI temelli sistemlerin karar alma süreçlerinde şeffaflık, güvenilirlik ve izlenebilirlik gibi ilkelere uyumunu sağlamak da giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu noktada, özellikle veriye dayalı kararların güvenli biçimde doğrulanması ve kayıt altına alınmasında blokzincir teknolojisinin sunduğu çözümler, uygulamalarını tamamlayıcı bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Bir sonraki bölümde blokzincir teknolojisi üzerine çeşitli değerlendirmelere yer verilecektir.

1.2.1.5. Blokzincir

Sıklıkla yıkıcı bir teknoloji olarak nitelendirilen Blokzincir teknolojisi, Endüstri 4.0'ın temel yapı taşlarından biri olarak kabul edilmektedir. Bu teknoloji; izlenebilirlik, şeffaflık,

akıllı sözleşme kullanımı, ademi merkeziyetçilik, veri gizliliği ve değişmezliği gibi özellikleriyle, çok paydaşlı ve karmaşık yapılar için oldukça yüksek bir potansiyele sahiptir (Mukherjee vd., 2021: 46). Blokzincir, ağ üzerindeki işlemlerin kronolojik olarak ve değiştirilemez bir şekilde kaydedildiği, merkezi olmayan bir muhasebe defteri niteliğinde bir dijital kayıt sistemi olarak tanımlanmaktadır (Cordon ve Bris, 2019: 2).

Blokzincir sisteminde veriler bloklar hâlinde zincirlenerek ağdaki tüm katılımcıların veritabanlarında saklanır. Böylece, bilgiler herkes tarafından erişilebilir ve doğrulanabilir bir hâl alır (Mukherjee vd., 2021: 47). Ağın herhangi bir bileşeninin çevrimdışı kalması, saldırıya uğraması ya da hatalı çalışması durumunda dahi sistemin genel işleyişi kesintiye uğramadan devam edebilmektedir. Bu durum, blokzincir teknolojisinin yüksek hata toleransına sahip yapısından kaynaklanmaktadır. Verilerin tek bir merkezde değil, tüm ağ bileşenlerine dağıtılmış şekilde saklanması sayesinde, sistem bütünüyle çökmeden çalışabilirliğini sürdürebilmekte; diğer bileşenler aynı veriyi koruyarak ağın bütünlüğünü sağlamaktadır. Bu gibi özellikleri sayesinde blokzincir, sadece finansal işlemler ya da tedarik zincirleri için değil; aynı zamanda dijital varlık yönetimi, kimlik doğrulama, oy verme sistemleri ve fikri mülkiyet koruması gibi pek çok alanda da kullanılabilir bir altyapı sunmaktadır (Treiblmaier ve Umlauff, 2019: 111; Hald ve Kinra, 2019: 378).

Verilerin kriptografi ile yetkisiz erişimden korumak amacıyla şifrelenmesi ve güvence altına alınması sayesinde, blokzincir sistemlerinde "güven" ilişkilere değil, tasarıma dayanır (Wang vd., 2019: 76). Blokzincir ortamında, insanlar ya da sistemler yalnızca belirli bir işlem çerçevesinde geçici olarak bir araya gelir ve iş tamamlandığında bu yapı kendiliğinden dağılıbilir veya yeni yapılara dönüşebilir (Mukherjee vd., 2021: 47). Blokzincirle yeniden inşa edilen güven, özellikle hızlı işleyen dijital ortamlarda ilişkisel yatırım gereksinimini azaltmaktadır.

Blokzincir teknolojisinin sunduğu çok yönlü faydalar, tedarik zincirlerinin geleneksel yapılarında dijitalleşme temelli dönüşümleri etkilemiş ve yeni bir işleyiş oluşmasına zemin hazırlamıştır. Küreselleşmeyle birlikte tedarik zincirlerinin yönetimi eskisinden çok daha zor ve karmaşık hale gelmiştir. Saberi vd. (2019: 2117) tarafından vurgulandığı üzere, blokzincirin şeffaflık ve izlenebilirlik sağlaması, küresel ölçekteki tedarik zinciri yönetimi sorunlarının aşılmasında yadsınamaz katkılar sunmuştur. Örneğin blokzincirin şeffaflık özelliği sayesinde, malların kaynağı, hareketi ve geçmişi izlenebilir; ürünlerin orijinallliği, sürdürülebilirliği ve çevresel ve etik standartlara uygunluğu doğrulanabilir ve sahtecilik ve veri manipülasyonu gibi olumsuzluklar önlenabilir hale gelmektedir. Böylece işletmeler, toplum, devlet ve tüketici baskıları karşısında şeffaf ve güvenilir bir şekilde denetlenebilir bir yapıya dönüşürken;

sürdürülebilirlik taahhütleri somut verilerle ortaya koyulabilmektedir. Zincirdeki hatalı ürünlerin kaynağı hızla tespit edilebilmekte; gıda, ilaç gibi hassas sektörlerde geri çağırma süreçleri daha aktif ve eş zamanlı yürütülebilmektedir. Verilerin kriptografik olarak doğrulanması sayesinde aracı kurumlara duyulan güven ihtiyacı azalmakta, aktörler arasında ilişki kurmaya dayalı güven yerine programlanmış teknik güven geçerli olmaktadır. Ek olarak, gereksiz araçların ortadan kaldırılması sayesinde işlem maliyetleri düşebilmektedir. Sevkiyat ve gümrük süreçlerinde ilgili belgelerin blokzincir ile otomatik olarak doğrulanması ve akıllı sözleşmeler sayesinde süreçlerin hızlanması da blokzincirin maliyeti minimize eden özelliklerindendir. Bu gibi özelliklerden yola çıkarak IBM, daha doğru ve güvenilir yük senetlerinin sağlanmasıyla milyarlarca dolarlık tasarruf sağlanabileceğini belirtmiştir. (Saberî vd., 2019: 2119).

Özetle blokzincir, işletmeler için sadece veri yönetiminde yeni bir sistem olarak değil, aynı zamanda güvenin dijital mimarisi olarak da konumlanmaktadır. Bu yaklaşım, teknolojinin yalnızca operasyonel değil, stratejik bir dönüşüm aracı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, blokzincirin sunduğu güvenli ve merkeziyetsiz veri yapısı, bulut bilişim ve büyük veri analitiği gibi teknolojilerle birleştiğinde, dijitalleşmenin çok katmanlı ve etkileşimli yapısının daha verimli, izlenebilir ve sürdürülebilir bir zemine taşınması hedeflenmektedir. Bu bağlamda, bir sonraki bölümde bulut bilişim ve büyük veri analitiği hakkında detaylı bilgiler paylaşılacaktır.

1.2.1.6. Bulut Bilişim ve Büyük Veri Analitiği

Endüstri 4.0'ın temel yapı taşlarından biri olan bulut bilişim ve büyük veri analitiği hem dijital dönüşümün hızlandırılmasında hem de üretim sistemlerinin çeviklik ve sürdürülebilirlik açısından yeniden yapılandırılmasında kritik roller üstlenmektedir. Büyük veri tabanları giderek “yeni petrol” haline gelmekte; bilgi çağına ve dijital ekonomiye güç veren yeni bir zenginlik biçimi olarak değerlendirilmektedir. Petrol değerini kıtlıktan alırken, veri ise erişilebilirliğinden ve işlenip kullanılabilme konusundaki üstün yeteneğinden değer kazanmaktadır (ElMassah ve Mohieldin, 2020: 2). Dolayısıyla bulut bilişim ve büyük veri analitiğinin, verilerin değerlerine değer katmaları için vazgeçilmez bir teknolojik yenilik olduğu düşünülmektedir.

Bulut bilişim ve büyük veri, Endüstri 4.0'ın temel teknolojilerinden olarak, çok büyük miktarda ham veriyi gerçek zamanlı olarak anlamlı ve kullanılabilir bilgiye dönüştürme kapasitesine sahiptir. Bu sayede yalnızca teknik düzeyde otomasyonu ve otonomasyonu desteklenmekle kalmaz, aynı zamanda karar alma süreçlerinin de hızlanmasını ve doğru

kararlar alınabilmesi için doğru veri analizleri elde edilmesini sağlar (Beier vd., 2020: 6). Bu özellikleriyle bulut bilişim ve büyük veri analitiği; üretim kalitesinin optimizasyonu, ekipman bakım süreçlerinin iyileştirilmesi ve enerji verimliliğinin artırılması gibi birçok amaç çerçevesinde kullanılabilmektedir. Örneğin, yarı iletken üreticisi Infineon Technologies, üretim sürecinin sonundaki test aşamasında elde edilen tekil çip verileri ile sürecin erken safhalarındaki verileri ilişkilendirerek ürün hatalarını erken aşamada tespit etmeyi başarmış; böylece üretim kalitesini artırmıştır (Rüßmann vd., 2015: 3). Bu tür uygulamalar, büyük verinin yalnızca geçmiş analiz eden değil, geleceği öngörerek süreci şekillendiren bir araca dönüştüğünü ortaya koymaktadır.

Bulut bilişim ve büyük veri analitiğinin çevresel konularda da olumlu işlevlere sahip olduğu görülmektedir. Örneğin Wang ve arkadaşları (2016: 159), bu teknolojilerin üretim süreçlerinde yüksek verimliliğe ulaşılmasına ve israfın minimize edilmesine katkı sağlayacağını belirtmektedir. Seele'ye göre (2016: 73) ise bu teknolojiler iletişimi ve şeffaflığı artırarak sistemdeki tüm paydaşların sürdürülebilirlik performanslarının titizlikle gözlemlenmesine, incelenmesine ve karşılaştırılmasına olanak sağlayabilmekte; üretim süreçlerinin çevre dostu bir şekilde gerçekleştirilmesine destek olabilmektedir. Ek olarak bulut bilişim ve büyük verinin, işletmelerin zararlı faaliyetlerinin kontrolünde ve bu faaliyetlere yönelik yaptırım süreçlerinde kullanılması mümkün olsa da bu teknolojiler hakkındaki teorik ve düzenleyici çerçevenin henüz yeterli olmadığı düşünülmektedir (Guandalini, 2022: 463).

Devasa bir veritabanı mantığında olan büyük veri, bulut bilişim teknolojileriyle desteklenerek Endüstri 4.0 sistemlerinin çevikliğini ve esnekliğini artırabilmektedir. Bu iki teknolojik yapının birbirini tamamlayan nitelikte olduğu düşünülebilir. Bulut hizmetleri aracılığıyla bilgi teknolojilerinin etkinleştirilmesi hem sistemlere çeviklik kazandırmakta hem de hizmet sağlayıcılar açısından alternatif fiyatlandırma modellerine geçmek gibi geleneksel pazara açılma stratejilerini yeniden ele alma gerekliliğini doğurmaktadır (Crick ve Chew, 2017: 639). Bu dönüşüm yalnızca veri analizleri ağırlıklı yazılım uygulamalarıyla sınırlı kalmayıp, üretim süreçlerinin doğrudan bulut sistemlerine entegre edilmesine kadar uzanmaktadır.

2020'li yıllara geldiğimizde işletmelerin artık belirli kurumsal analiz uygulamaları için bulut tabanlı çözümler kullanmakta olduğu; üretimle doğrudan ilişkili faaliyetlerin tesisler ve şirketler arasında veri paylaşımını gerektirecek biçimde bulut ortamına taşınmasının kaçınılmaz olduğu görülmektedir. Bu süreçte, bulut teknolojilerinin performansı da gelişmekte ve sistem tepki sürelerinin birkaç milisaniyeye kadar düşmesi beklenmektedir. Sonuç olarak, üretim sistemlerine yönelik daha fazla veri odaklı hizmet sunulabilecek; hatta süreçleri izleyen ve kontrol eden sistemlerin dahi gelecekte tamamen bulut tabanlı hale gelebilecektir (Rüßmann

vd., 2015: 4). Bu dönüşüm, üretim yürütme sistemleri sağlayıcılarının bulut tabanlı çözümler sunmaya başlamasıyla daha da hız kazanmış; böylece üretim süreçlerinde esneklik, erişilebilirlik ve gerçek zamanlı analiz yetenekleri önemli ölçüde gelişmiştir.

Sonuç olarak bulut bilişim ve büyük veri analitiği, yalnızca mevcut durumu değerlendirmekle kalmayan, aynı zamanda geleceğe yönelik tahminler yaparak stratejik karar alma süreçlerini destekleyen bir yapı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu dijital altyapılar sayesinde, üretim süreçleri yalnızca optimize edilmekle kalmaz; aynı zamanda sanal ortamda test edilerek sürekli geliştirilebilir hâle gelir. Bu noktada, bir sonraki bölümde ayrıntılı biçimde ele alınacak olan Simülasyon ve Modelleme teknolojileri devreye girmektedir. Özellikle dijital ikiz uygulamaları çerçevesinde değerlendirildiğinde, bu teknolojiler bulut ve büyük veri altyapılarıyla birlikte çalışarak çevik ve sürdürülebilir üretim stratejilerinin hayata geçirilmesinde önemli roller üstlenmektedir.

1.2.1.7. Simülasyon, Modelleme ve Dijital İkiz

Dijitalleşme üretim süreçlerini dönüştürürken; simülasyon, modelleme ve dijital ikiz gibi teknolojiler, sürdürülebilir ve verimli üretim hedeflerinin gerçekleştirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu kavramlar özellikle Endüstri 4.0 ve sonrasında gelişen siber-fiziksel sistemler bağlamında stratejik önem kazanmıştır (Bechtsis vd., 2018: 65).

Modelleme, fiziksel varlıkların veya sistemlerin işleyişini dijital ortamda soyutlayarak temsil etmeye olanak tanırken; simülasyon, bu modellerin farklı koşullar altındaki davranışlarını analiz etmek için kullanılır. Özellikle Endüstri 4.0 sonrasında ürünlerin, malzemelerin ve üretim süreçlerinin 3 boyutlu simülasyonları mühendislik aşamasında uygulanmaya başlamıştır. Teknolojilerin ve süreç değişikliklerinin sahaya uygulanmadan önce sanal ortamlarda test edilebilmesi, zaman, maliyet ve kaynak tasarrufu sağlamaktadır (Agarwal vd., 2023: 3672). Ancak bu simülasyonların, gerçek zamanlı verilerle desteklenerek operasyonel süreçlerde çok daha kapsamlı biçimde kullanılacağı öngörülmektedir. Bu öngörünün ilk örneklerinden biri olarak Siemens tarafından geliştirilen sanal makine uygulaması, fiziksel kurulum süresini %80'e varan oranda azaltarak kalite ve verimliliği artırmaktadır (Rüßmann vd., 2015: 56). Tek bir kalemde yaratılan bu gelişme, ilgili teknolojilerin bütün sisteme entegre edilmesiyle daha büyük çapta kalite ve verimlilik elde edilmesinin göstergesi olarak düşünülebilir.

Simülasyon ve modelleme temelli dijital dönüşümün en gelişmiş aşamalarından biri dijital ikiz teknolojisidir. Dijital ikiz, fiziksel varlıkların sanal temsillerinin oluşturulması, bu temsillerin gerçek zamanlı verilerle senkronize edilmesi ve bu yolla üretimden bakım

süreçlerine kadar çeşitli aşamalarda karar desteği sağlaması anlamına gelmektedir (Li vd., 2020: 174989). AI destekli dijital ikizler, yalnızca durum tespiti yapmakla kalmamakta; aynı zamanda optimize edilmiş çözümler üreterek insan müdahalesine gerek kalmadan aksiyon alabilmektedir (Samsung, 2020: 15). Ek olarak IoT altyapısının yaygınlaşmasıyla, dijital ikiz uygulamalarının ölçeklenebilirliğinin artış gösterdiği söylenebilir. 2023 yılı sonunda küresel çapta 16,6 milyar aktif IoT cihazı bulunmakta olup, bu sayının 2030 yılına kadar 41,1 milyara ulaşması beklenmektedir (Sinha, 2024). Bu cihazlar sayesinde toplanan veri, dijital ikiz sistemlerinde enerji izleme, su kalitesi takibi, hava kirliliği ölçümü gibi çevresel göstergelere ilişkin otomatik raporlamalar gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır (Allam ve Jones, 2021: 3). Bu yönüyle dijital ikizler, sürdürülebilirlik odaklı yönetim sistemlerinin dijital temeli olarak değerlendirilmektedir (Kaewunruen ve Lian, 2019: 1550). Sürdürülebilir üretim açısından dijital ikizlerin en önemli katkılarından bir diğeri, süreçsel ve sistematik verimliliği artırmasıdır. İş merkezleri özelinde oluşturulan dijital ikizler, dikey entegrasyon ve yatay koordinasyon yoluyla karar verme süreçlerini daha etkili ve isabetli hâle getirmekte; hizmet bileşimi temelli işlevsellikleri destekleyerek enerji verimsizliklerinin önüne geçmektedir (Park vd., 2020: 791). Bu sistemlerin başarısı, yalnızca dijital temsile değil, aynı zamanda bilginin anlamlı hâle getirilerek karar desteği sağlayacak biçimde entegre edilmesine bağlıdır (Kannan ve Arunachalam, 2019: 1). Bu noktada Endüstri 4.0'ın bütünleşik yapısı ortaya çıkmakta; bütün Endüstri 4.0 teknolojilerinin sistemin ihtiyacı dahilinde entegrasyonunu sağlamanın üst düzey verim elde edebilmek için bir ön koşul olduğu görülebilmektedir.

Analitik yaklaşımlar ve veri füzyonu sayesinde dijital ikizler, üretim süreçlerinde karşılaşılabilecek olası sorunları önceden belirleyerek hızla müdahale edilmesini sağlamaktadır (Beier vd., 2020: 8). Aynı zamanda bakım süreçlerinin simülasyonla desteklenmesine, maliyet tahminlerinin hassaslaştırılmasına ve paydaşlar arasında iş birliğinin güçlendirilmesine de olanak tanıyabilmektedir (Kaewunruen ve Lian, 2019: 1538). Bu özellikleriyle, farklı uzmanlık alanlarından gelen paydaşların ortak politika ve çözüm üretmesine imkân sağlayarak sürdürülebilirlik açısından katılımcı ve şeffaf bir yönetim zemini yaratmaktadır. Bu durum, diğer bölümlerde belirtildiği üzere, bu çalışmanın temelini oluşturan 3 ana kavram Çevik Üretim, Sürdürülebilirlik ve Endüstri 4.0'da olduğu gibi, en alt düzeyden en üst düzeye kadar sistemin her bir parçasında bu dönüşümlerin bütünleşik olarak gerçekleştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

İnternet hızı ve küresel anlamda teknolojik altyapı geliştikçe, dijital ikiz teknolojisinin kapsamı daha da genişleyecek; kullanıcıların sanal temsillerle etkileşim kurabildiği, gerçek dünyada fiziksel sonuçlar doğurabilen bir yapı ortaya çıkacaktır (Allam ve Jones, 2021: 6).

Örneğin, bir kullanıcı sanal ortamda bir robotla etkileşime girerek uzaktaki bir fiziksel lokasyonda bir faaliyet gerçekleştirebilecektir (Samsung, 2020: 15). Bu durum, gelecekte dijital ikizlerin yalnızca temsil değil, aynı zamanda eylem üretme kapasitesine sahip olacağını göstermektedir.

Özetle simülasyon, modelleme ve dijital ikiz teknolojileri, fiziksel ve dijital dünyalar arasında çift yönlü bir köprü kurarak hem sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada hem de veri temelli stratejik karar alma süreçlerinin güçlendirilmesinde önemli katkılar sunmaktadır. Bu teknolojiler, yalnızca endüstriyel anlamda kullanılmamakta; şehir planlamasından enerji yönetimine, bakım hizmetlerinden politikaya kadar geniş bir yelpazede dönüştürücü etkiler yaratmaktadır (He vd., 2021: 1; Guandalini, 2022: 463). Milyarlarca fiziksel nesnenin gerçek zamanlı olarak birbirine bağlı olacağı bir gelecek, günümüzden çok da uzak görünmemektedir. Bu nesneler, aralarında iletişim kurarak ihtiyaç duydukları verileri bulut bilişim altyapısı üzerinden iletebilme ve işleyebilme kapasitesine sahip olacaktır. Ancak, bu dönüşüm sürecinde teknik standartlaşma ve güvenlik boyutları açısından yapısal eksiklikler ve belirsizlikler söz konusudur (Alam, 2018: 450). Bu teknolojilerin güvenlik zaafiyeti olmadan gerçek zamanlı veriyle beslenebilmesi, otomasyonla entegre çalışabilmesi ve çok katmanlı etkileşimler kurabilmesi büyük ölçüde gelişmiş bir bağlantı altyapısıyla mümkün olabilir. Bu noktada, yalnızca fiziksel nesneleri değil, insanları ve hizmet süreçlerini de kapsayan bütüncül bir dijital ekosistem olarak Şeylerin İnterneti kavramı öne çıkmaktadır. Bir sonraki bölümde, bu kavram detaylı biçimde ele alınacaktır.

1.2.1.8. Şeylerin İnterneti (Nesneler-İnsanlar-Hizmetler)

Fiziksel dünyadaki nesnelerin, insanlar ve hizmetlerle birlikte dijital ortama entegre edilmesini ifade eden, Endüstri 4.0'ın temel yapı taşlarından biri olarak kabul edilen Nesnelerin İnterneti (Internet of Things-IoT), son yıllarda artan dijitalleşme eğilimiyle birlikte, yalnızca veri toplayan ve ileten sistemler değil, aynı zamanda üretimden lojistiğe kadar birçok alanda çeviklik ve sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlayan stratejik bir teknoloji haline gelmiştir. IoT sistemleri, üretim süreçlerinin yalınlaştırılmasına, tedarik zinciri sürelerinin kısaltılmasına ve dijital ikiz gibi ileri düzey çözümlerle desteklenmiş karar destek sistemlerinin oluşturulmasına olanak tanımaktadır (Abideen vd., 2021: 1).

Endüstri 4.0'ın temelini oluşturan teknik yeniliklerin büyük bir kısmının, IoT & IoS teknolojilerine dayandığı görülmektedir (Beier vd., 2020: 8). Malzeme, sensör, makine, ürün, tedarik zinciri ve müşteri gibi üretimle ilişkili çeşitli unsurlar ve bu unsurların sahip olduğu dijital teknolojiler, IoT ve CPS aracılığıyla birbirine bağlanabilmekte ve bu bağlantı sayesinde

söz konusu birimler otonom biçimde veri alışverişi gerçekleştirebilmekte, kontrol mekanizmalarını birbirlerine bağlı biçimde çalıştırabilmektedir (Qin vd., 2016: 174). Böylelikle üretim sistemleri, yalnızca daha verimli değil; aynı zamanda daha esnek, özelleştirilebilir ve öngörülebilir hâle gelmektedir. Bu dönüşüm, çevik üretim sistemlerinin dijital altyapısını güçlendirerek, değişen talep koşullarına uyum sağlama kapasitesini artırmaktadır.

Teknolojik açıdan değerlendirildiğinde, IoT; Radyo Frekansı ile Tanımlama (RFID), Yakın Alan İletişimi (NFC), Endüstriyel Kablosuz Ağlar (IWN) ve 5G gibi mobil iletişim ağlarını kapsayan bir sensör tabanlı iletişim mimarisine dayanmaktadır. Kablosuz Sensör Ağları (Wireless Sensor Networks – WSN) üzerinden inşa edilen bu dijital altyapı, üretim ortamlarında gerçek zamanlı veri akışını mümkün kılmakta; süreçlerin sürekli izlenmesini, optimize edilmesini ve gerektiğinde otomatik olarak yeniden yapılandırılmasını sağlamaktadır (Beier vd., 2020: 8).

Sanayi bağlamında, IoT kavramı sıklıkla IIoT olarak da anılmaktadır. IIoT, gelişmiş bilişim teknolojileri, sensör sistemleri ve yüksek bant genişliğine sahip iletişim altyapıları sayesinde üretim sistemlerinde yeni bir devrimin temelini oluşturmaktadır (Thames ve Schaefer, 2016: 13). Zhong ve diğerleri (2017: 618) ise bu yapıyı, makinelerin birbirlerini algıladığı, bağlandığı ve etkileşime geçtiği; üretim mantıklarının ise otomatik ve uyarlanabilir biçimde yürütüldüğü bir sistem olarak tanımlamaktadır. Bu yaklaşım, üretim süreçlerinin çevikliğini artırırken aynı zamanda insan-makine etkileşimini yeniden biçimlendirmekte, üretim ortamlarında daha yüksek entegrasyon düzeyine sahip hibrit sistemlerin gelişimine olanak tanımaktadır.

IoT'nin insan faktörüne etkisi de giderek daha görünür hale gelmektedir. Beier ve diğerleri (2020: 8), IoT'yi insan-makine etkileşimini kolaylaştıran bir ara yüz olarak değerlendirmekte; Zhong ve diğerleri (2017: 618) ise bu sistemleri “yüksek düzeyde entegre edilmiş bir insan-makine üretim sistemi” olarak tanımlamaktadır. Her ne kadar insanın üretim süreçlerindeki rolü bu sistemlerde yeniden tanımlansa da mevcut literatürün bu etkileşimin sosyo-teknik boyutlarını inceleme konusunda yetersiz kaldığı söylenebilir.

Geleneksel üretim sistemlerinde, sensörler ve makineler gömülü bilişim teknolojileri aracılığıyla genellikle dikey bir otomasyon piramidi şeklinde yapılandırılmıştır. Ancak IIoT'nin sunduğu olanaklar sayesinde, üretim sistemlerinin merkezi yapısı parçalanmış, karar alma süreçleri sahaya dağılmış ve cihazlar birbirleriyle doğrudan iletişim kurabilir hâle gelmiştir. Örneğin, Bosch Rexroth tarafından geliştirilen yarı otomatik ve merkeziyetsiz üretim sistemlerinde, ürünler RFID teknolojisiyle tanımlanmaktadır (Rüßmann vd., 2015: 4). Her iş istasyonu ilgili ürüne uygun üretim adımını belirleyerek süreci kendiliğinden

gerçekleştirebilmektedir. Bu yapı, yalnızca üretim hızını değil, aynı zamanda sistemlerin özelleştirilebilirliğini ve sürdürülebilirliğini de artırmaktadır.

Sonuç olarak, nesnelerin, insanların ve hizmetlerin interneti, diğer bir ifadeyle her şeyin interneti (IoE) (Chatzigiannakis ve Tselios, 2021: 21), Endüstri 4.0'ın çevik ve sürdürülebilir üretim anlayışıyla bütünleşerek üretim sistemlerinde köklü bir dönüşüm yaratmaktadır. Otonom karar alma, gerçek zamanlı veri paylaşımı ve insan-makine etkileşimindeki gelişmeler, sadece verimliliği artırmakla kalmayıp, aynı zamanda daha esnek, çevik ve çevresel açıdan duyarlı üretim sistemlerinin gelişmesinde oldukça etkilidir. Teknoloji odaklı gelişmeler ve entegrasyon süreçlerinin tamamlanmasıyla, söz konusu üretim sistemlerinin yalnızca duyarlı yapılar olarak değerlendirilmesei yetersiz kalacak; dönüşüme uğrayan bu yapı “Siber Fiziksel Sistemler (CPS)” olarak adlandırılan yeni bir paradigma içerisinde yeniden tanımlanacaktır. Bir sonraki bölümde, CPS'lere ilişkin temel özellikler ayrıntılı biçimde ele alınacaktır.

1.2.1.9. Siber Fiziksel Sistemler

Siber-Fiziksel Sistemler (Cyber-Physical Systems – CPS), Endüstri 4.0'ın temel teknolojik yapı taşlarından biri olarak üretim dünyasında merkezi bir konuma sahiptir. Bu sistemler, fiziksel dünya ile dijital dünya arasındaki etkileşimi gerçek zamanlı veri paylaşımı yoluyla mümkün kılarak, üretim süreçlerinde çeviklik ve sürdürülebilirliği destekler niteliktedir. CPS ile başta makineler olmak üzere, sistemin her bir elementi merkezsiz kontrol sistemleri aracılığıyla birbirleriyle iletişim kurabilmektedir. Bu sistemler, yalnızca bağlantı ve işlem gücünü değil, aynı zamanda gömülü sensörler ve sensörlerden gelen verilere göre fiziksel dünyada gerçekleştirdikleri eylemler sayesinde kendi durumlarını, kapasitelerini ve yapılandırma seçeneklerini algılayabilme yeteneğine sahiptir. Bu özellikleri ile CPS'ye sahip işletmeler üretim verimliliklerini artırabilmektedir (Beier vd., 2020: 8).

CPS'ler kendiliğinden yapılandırma, kendi kendini izleme, onarma ve merkezsiz organizasyon gibi özerk yetkinliklere sahiptir. Bu yetkinlikler üretim sistemlerini daha esnek, dayanıklı ve akıllı kılmaktadır. Kalite kontrolden lojistiğe, mühendislikten operasyonel faaliyetlere kadar birçok sürecin koordinasyonu CPS ile mümkün olabilmektedir. Yüksek düzeyde entegre edilmiş fiziksel ve yazılımsal bileşenleriyle bağlama duyarlı ve esnek bir yapıya sahip olan CPS'ler bu yönleriyle geleneksel gömülü sistemlerin ötesine geçmektedir (Xu vd., 2018: 2947).

Endüstri 4.0 vizyonuna göre, CPS'lerin bilgi ve iletişim teknolojileriyle bütünleşerek IIoT'yi yaygınlaştırması öngörülmektedir. Bunun için Endüstri 4.0'a dayalı üretim sistemleri; fiziksel bileşenler, yazılım modülleri ve insanlardan oluşan iletişim hâlindeki çeşitli birimlerin

iş birliği içinde çalıştığı yapılar olarak kurgulanmalıdır. Böylece teknik olarak iş süreçlerinin bütünleşmesi sağlanabilecektir. Bu sayede yeni bir sanayi çağının kapıları aralanacak, akıllı fabrikaların temeli oluşturulacak, kaynak verimliliği ve üretkenliği artarken, daha esnek çalışma modellerinin uygulanması mümkün olabilecektir (Xu vd., 2018: 2948). Bu tarz üretim ortamları, değişken taleplere gerçek zamanlı yanıt verme, maliyet avantajı yaratma ve esnek üretim hatları geliştirme gibi çevik üretim için kritik olan unsurları bünyesinde barındırabilecektir.

CPS'ler, yalnızca üretim verimliliğini artırmakla kalmayıp, sürdürülebilirliğe de katkı sunmaktadır. Sürekli veri alışverişi ve analitiğe dayalı karar destek mekanizmaları sayesinde, enerji tüketimi azaltılabilir, atık miktarı kontrol altına alınabilir ve kaynaklar daha etkin biçimde kullanılabilir. Bu durum geleneksel üretim sistemlerine kıyasla çok daha çevreci bir alternatifin sunulmasını sağlamaktadır. Shahin ve arkadaşları (2024: 3193), CPS'lerin veri toplama ve bilgiye dayalı karar verme süreçlerini geliştirerek daha isabetli kararların alınmasına olanak tanıdığını; makineler ile fabrika sistemleri arasında kurulan etkin bağlantının ise süreçlerin optimizasyonu ve genel verimlilik üzerinde belirleyici bir rol oynadığını vurgulamaktadır. Bu sayede CPS'lerin sadece operasyonel fayda sağlamakla kalmadığı, aynı zamanda sosyal ve çevresel anlamda iyileştirmeler yaratabildiği söylenebilir.

CPS temelli sistemlerin uygulama düzeyinde üretim performansına olan katkıları somut olarak gözlemlenebilmektedir. Örneğin, otomotiv sektöründe bilişsel üretim çözümleri sayesinde görsel denetim süresi %80 oranında azaltılmış ve üretim kusurları %7 ila %10 oranında düşürülmüştür (IBM, 2017). Bu tür uygulamalar, üretim süreçlerinin hem hız hem kalite açısından daha çevik ve verimli hâle gelmesini sağlamaktadır. CPS'lerin bu işlevi, çevik üretim stratejilerinin sahada somut çıktılar üretebilmesini mümkün kılmaktadır.

Sonuç olarak, CPS'ler Endüstri 4.0 ekosisteminin temel bileşenlerinden biri olarak, üretim sistemlerini hem çevik hem de sürdürülebilir kılmak için kritik bir rol üstlenmektedir. Gerçek zamanlı veri akışı, sistemler arası etkileşim ve merkeziyetsiz kontrol gibi unsurlar, yalnızca verimliliği değil; aynı zamanda çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliği de desteklemektedir. Ancak diğer bütün Endüstri 4.0 teknolojilerinde olduğu gibi, sistemin doğru ve düzenli bir şekilde işleyebilmesi için CPS'te de güvenliğin yüksek ölçüde sağlanabiliyor olması gerekmektedir. Bu anlamda Siber Güvenlik, yeni çağın hassas konuları arasında öne çıkmakta olup; bir sonraki bölümde bu konu hakkında detaylı bilgi verilecektir.

1.2.1.10. Siber Güvenlik

Endüstri 4.0, üretim sistemlerinin dijitalleşmesi, makineler arası bağlantının artması ve siber-fiziksel sistemlerin entegrasyonu ile şekillenen bir dönüşüm sürecidir. Bu dönüşüm, üretim süreçlerinde verimlilik, esneklik ve çeviklik gibi önemli avantajlar sağlarken; aynı zamanda yeni ve karmaşık siber güvenlik tehditlerini de bünyesinde barındırmaktadır. Bir işletme için siber güvenlik, yalnızca kendi sistemlerini değil, tüm değer zincirini kapsayan bir kurumsal güvenlik ağı olarak ele alınmalı hem teknik altyapıya hem de yönetim süreçlerine entegre edilmelidir.

Lezzi ve arkadaşlarına göre (2018: 97), siber güvenlik sorunları Endüstri 4.0'a geçiş yapan tüm işletmeler için karmaşık ve çok boyutlu bir zorluk oluşturmakta olup; bu zorlukların Endüstri 4.0 bağlamında nasıl tanımlandığına ve uygulamaya nasıl yansıdığına yönelik literatür tartışmaları gün geçtikçe artış göstermektedir. Endüstri 4.0 teknolojilerinin yeni ortaya çıktığı dönemlerde işletmelerin birçoğu kapalı ve birbirine bağlı olmayan sistemler kullansa da Endüstri 4.0 ile artan bağlantılılık düzeyi zaman içinde sistemlerin dönüşmesini sağlamıştır (Rüßmann vd., 2015: 4). Bu sayede gelişmiş kimlik doğrulama, erişim yönetimi ve güvenli iletişim altyapıları gibi konular büyük önem kazanmaya başlamıştır.

Siber güvenlik, Endüstri 4.0 bağlamında ele alındığında çeşitli temel bileşenler üzerinden analiz edilmektedir. Bu bileşenler arasında siber saldırıya maruz kalan varlıklar (örneğin makineler, üretim hatları, veri merkezleri), sistem açıkları, siber tehdit türleri, riskler ve karşı önlemler yer almaktadır (Lezzi vd., 2018: 99). Bilgi sistemlerine ilişkin güvenlik riskleri, bilgilerin veya bilgi sistemlerinin gizliliğinin, bütünlüğünün ya da erişilebilirliğinin kaybına bağlıdır (Jansen, 2017: 5157). Özellikle fiziksel sistemlerin internete bağlandığı ve siber sisteme dahil olduğu üretim ortamlarında, bahsi geçen bileşenler birbirini tetikleyebilen karmaşık etkileşimler yaratabilmektedir. Bu nedenle siber güvenlik sadece teknik bir konu olmaktan çıkmakta; organizasyonel karar verme, kaynak planlaması ve operasyonel süreklilik açısından stratejik bir gereklilik hâline gelmektedir. Çünkü özellikle bir CPS'in başka bir sistemle etkileşime girmesi, fiziksel ya da siber sistemler arasında iletişim kurulması ve bu süreçlerde güvenliğin sağlanması CPS'in tasarım aşamasından itibaren düşünülmesi gereken olgulardır. Buradaki güvenlik faaliyetleri fiziksel nesnelerden siber nesnelere doğru izleme güvenliği ve siber nesnelerden fiziksel nesnelere doğru kontrol güvenliği olarak tanımlanmaktadır (Hu vd., 2016: 449).

Beier ve arkadaşlarına göre (2020: 9), Endüstri 4.0 veri yoğun bir yapıya sahiptir ve bu yapı; veri çeşitliliği, hacmi ve işlem hızında ciddi artışlar yaratmaktadır. Bu artış, karar alma süreçlerini destekleyen akıllı sistemlerin gelişimini mümkün kılsa da ham verinin heterojenliği

nedeniyle veri entegrasyonu önemli bir zorluk olarak ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda, güvenli ve geçerli veriye erişim, dijital üretim sistemlerinin sürdürülebilir şekilde işlemesi açısından kritik hâle gelmektedir. Öte yandan, tıpkı diğer Endüstri 4.0 teknolojilerinde olduğu gibi, siber güvenlik uygulamalarında da sektör bazında değişkenlikler söz konusu olabilir. Sektöre göre güvenlik öncelikleri değişebilmekte ve her sektörün kendi yapısına uygun çözümler geliştirmesi gerekmektedir. Bununla birlikte, sektörel uygulamaların çoğunda güvenliğin hâlâ reaktif önlemler düzeyinde kaldığı, proaktif güvenlik tasarımlarının sınırlı düzeyde olduğu söylenebilir (Lezzi vd., 2018: 102). Bu durum, Endüstri 4.0'ın vaat ettiği çevik ve esnek üretim yapılarının sürdürülebilirliğini tehdit eden önemli bir zafiyettir. Bu zafiyetin giderilmesi konusunda güvenlik politikalarının belirlenmesi, farkındalık eğitimleri, güvenlik odaklı sistem mimarilerinin geliştirilmesi ve otomatik tehdit algılama sistemlerinin devreye alınması gibi stratejiler temel alınabilir. Sonuç olarak siber güvenliğin sistemlerdeki önemi, sadece veri koruma ile sınırlı değildir. Aynı zamanda, üretim süreçlerinin çevikliği ve sürdürülebilirliği ile dijital dönüşümün kalıcı ve dengeli bir şekilde yönetilmesi için bir ön koşul niteliğindedir.

İşletmelerin, hızla değişen müşteri taleplerine etkin biçimde yanıt verebilmeleri için yukarıda detayları paylaşılan Endüstri 4.0 teknolojilerinden yararlanarak daha esnek, merkeziyetsiz ve otonom yapılara evrilmeleri gerekmektedir. Bu dönüşümün temelinde, birbirine bağlı, yeniden yapılandırılabilir ve modüler sistemler ile üretici-tüketici etkileşimini güçlendiren etkili iletişim ağları yer almaktadır. Teknolojilerin kurumsal düzeyde yaygınlaşmasıyla birlikte, iş süreçlerinin dijital sistemlere entegre edilmesi ve bu süreçlerin yalnızca verimlilik temelli değil, aynı zamanda hizmet odaklı bir yapıya kavuşması kaçınılmaz hâle gelmektedir. Bu çerçevede, Endüstri 4.0'ın sunduğu dönüşüm yalnızca teknolojik boyutlarla sınırlı kalmamakta; aynı zamanda mimari bileşenlerin ve tasarım ilkelerinin yeniden tanımlanmasını da zorunlu kılmaktadır. İlerleyen bölümlerde, bu dönüşümün temel yapı taşlarını oluşturan Endüstri 4.0 bileşenleri ve tasarım ilkeleri ayrıntılı biçimde ele alınacaktır.

1.2.2. Endüstri 4.0'ın Bileşenleri

Yarattığı etkinin büyüklüğü dikkate alındığında, Endüstri 4.0'a ilişkin tanım, sınıflandırma ve kavramsallaştırmaların, dönüşümün kendi kapsam ve derinliğiyle orantılı bir gelişmişlik düzeyine henüz ulaşamadığı ileri sürülebilir. Bu nedenle önceki bölümlerde belirtildiği üzere, erişilebildiği kadarıyla en güncel ve en kapsamlı kaynak olan Ghobakhloo ve diğerlerinin (2025) çalışmalarında yer alan Endüstri 4.0 Arketipi'nden yola çıkılarak bu çalışmanın Endüstri 4.0 bölümü tasarlanmıştır. Önceki bölümde yer alan Endüstri 4.0 teknolojileri, birçok kişi için Endüstri 4.0 denildiğinde ilk akla gelen olgular olabilir. Bu algı

nispeten haklı bulunabilir çünkü Endüstri 4.0, akıllı ürünlere, prosedürlere ve süreçlere, yani akıllı üretime odaklanmaktadır. Bunun için Endüstri 4.0'ın temel unsurlarından biri gelişmiş teknolojilerle donatılmış akıllı fabrikalardır ve bu yapı hızla artan karmaşıklığı kontrol ederken aynı zamanda üretim verimliliğini artırır (Heng, 2014: 5). Akıllı fabrikada insan, makine ve kaynaklar arasında doğrudan iletişim vardır. Akıllı ürünler, üretim süreçlerini ve gelecekteki kullanım alanlarını bilir. Bu bilgiyle üretim sürecini ve dokümantasyonu aktif şekilde desteklerler. Bu bölümde bu teknolojik yapının varlığıyla meydana gelen Endüstri 4.0 Bileşenleri incelenecektir.

Endüstri 4.0, yalnızca üretim sistemlerinde değil, aynı zamanda tüm değer zincirinde dijital dönüşümü teşvik eden çok katmanlı bir yapıya sahiptir. Bu dönüşümün tamamlanmasında aktif rol oynayan bileşenler, paydaşlar arası etkileşimi güçlendirmekte, veri odaklı karar alma süreçlerini gerçekleştirmekte ve üretimden tüketime kadar olan tüm süreci yeniden yapılandırmaktadır. Bu çerçevede, Endüstri 4.0'ın temel bileşenleri beş ana grupta toplanmaktadır (Ghobakhloo vd., 2025: 63):

- Akıllı paydaşlar
- Akıllı tedarikçiler
- Akıllı lojistik
- Akıllı müşteriler
- Akıllı ürünler

Bu bileşenler aracılığıyla üretim süreçlerinde değer yaratma biçimlerinin kökten değiştiği söylenebilir. Endüstri 4.0 bileşenleri, DSN ve üretim verimliliğini artırma hedefleriyle birlikte çalıştığında, üretim süreçlerinde bazı somut ve ölçülebilir faydalar sağlanabilir. Örneğin: bakım maliyetleri azalabilir, üretim daha iyi planlanabilir, kaliteyle ilgili hataların maliyeti düşebilir ve ürünün pazara ulaşma süresi kısalabilir. Öte yandan bu bileşenler; akıllı makineler, akıllı üretim süreçleri, akıllı mühendislik, akıllı hareketlilik, akıllı şebekeler ve akıllı binalar gibi farklı bileşenlerle zenginleştirilebilir ve farklı faydalar da elde edilebilir (Shrouf vd. 2014: 698; Heng, 2014: 4). Ancak diğer bölümlerde benzer bilgilere yer verildiği için burada sadece Ghobakhloo ve diğerlerinin (2025) gruplandırmasından faydalanılacaktır. Bu bilgiler göz önünde bulundurularak, ilerleyen paragraflarda her bir bileşen hakkında değerlendirmeler yapılacaktır.

Akıllı paydaşlar, etkili iletişim, kurumsal sosyal sorumluluk stratejileri geliştirme ve ilişki inşası yoluyla sürdürülebilir ve şeffaf yönetim modellerini desteklemektedir. Özellikle DSN sayesinde paydaş değerini en üst düzeye çıkarmaya yönelik önemli fırsatlar ortaya çıkmaktadır. Örneğin müşteri memnuniyeti, yasal düzenlemelere uyum, gelir artışı ve markanın

çevikliğinin artırılması gibi fırsatlar hem operasyonel hedefler hem de verimlilik düşünüldüğünde işletmeler için önemli avantajlar yaratmaktadır (Fatorachian ve Kazemi, 2021: 73).

Bağlılık, Endüstri 4.0 odaklı işletmelerin örgüt yapısı düşünüldüğünde çoğunlukla süreçlerdeki nesnelerin, insanların ve sistemlerin oluşturduğu bir ağ olarak düşünülür ve bu ağın işletmedeki birimler arasındaki bilgi alışverişini ve iletişimi sağladığı varsayılır (Zhong vd., 2017: 624; Beier vd., 2020: 7). Ancak işletmenin dış paydaşları zaman zaman göz ardı edilebilmektedir. Oysa bir işletmenin dijital dönüşümünü tamamlayabilmesi, çevreci ve sürdürülebilir faaliyetler yürütebilmesi ve çevik olabilmesi, sadece kendisinin sahip olduğu yetkinliklerle gerçekleştirilememektedir. Tüm paydaşların dahil olduğu “ağ temelli, hızlı yanıt verebilir ve çevik bir değer zinciri” (Schumacher vd., 2016: 161) her ne kadar bugün ütopyik bir olasılık gibi görünse de hayata geçirilmesi imkânsız değildir.

Listedeki bir sonraki sırada yer alan bileşen Akıllı Tedarikçiler, iş birliğine dayalı ürün geliştirme, tedarik zincirinde şeffaflık, risklerin ortak yönetimi ve öngörü doğruluğu gibi unsurlar aracılığıyla bütünsel tedarik zinciri yönetimine imkân tanır. Endüstri 4.0’ın sunduğu teknolojiler, tedarik zinciri aktörleri arasında yalnızca bilgi alışverişini değil, aynı zamanda stratejik uyumu da güçlendirmektedir. Bu bağlamda akıllı tedarikçiler, bulut tabanlı sistemler ve AI destekli platformlar aracılığıyla DSN genelinde gerçek zamanlı ve sürekli veri paylaşımını mümkün kılarak karar süreçlerini hızlandırmakta ve kararlılığı artırmaktadır (Ghobakhloo vd., 2025: 68). Özellikle CPS, IIoT, uç bilişim ve AI destekli sistemlerle donatılan bu yapı, tedarikçilerin veri kaynaklarına yakın, merkezi olmayan ama bilinçli kararlar alabilmesini sağlamaktadır. Bu sayede tedarikçiler, yalnızca geçmiş verilere dayalı tepki vermek yerine, olası senaryoları önceden değerlendiren “what-if” planlamaları gibi modern yaklaşımları benimseyerek daha esnek ve dirençli tedarik zincirleri oluşturabilmektedir (Abdirad ve Krishnan, 2021: 192).

Akıllı tedarikçilerin sunduğu bu esneklik ve entegrasyon kapasitesi, tedarik zinciri boyunca şeffaflığın artmasına, risklerin iş birliği içinde yönetilmesine ve doğru öngörülemeyen durumlara karşı senaryo temelli stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Üretim ve teslimat süresinin kısaltılması, ürün geliştirme döngüsünün hızlandırılması, sipariş doğruluğunun artırılması ve müşteri memnuniyetinin iyileştirilmesi gibi hedefler doğrultusunda tedarikçilerin kendi operasyonlarını yeniden yapılandırmaları mümkün hâle gelmiştir (Dubey vd., 2021: 1587). Öte yandan değer zinciri boyunca bu denli kapsamlı veri paylaşımı konusundaki görüşlerde farklılıklar bulunmaktadır. Sonuçta, üretim esnekliği avantajı, tedarikçi ile müşteri arasındaki bağın fazla sıkı hale gelmesi ve şirket süreçlerinin açığa çıkması

dezavantajlarıyla dengelenmektedir. Yani son derece hassas iç stratejik verilerin korunmasına ilişkin riskler ciddidir, ancak uygulamaları esnek bir şekilde uyarlayabilme olanağı, Endüstri 4.0'ı kullanıcılar için cazip kılmaktadır (Heng, 2014: 9).

Bir diğer bileşen olan akıllı lojistik bileşeni, tedarik istikrarı, sipariş yönetimi, kesintilerin azaltılması ve gerçek zamanlı kontrol gibi unsurlarla lojistik süreçlerin esnekliğini artırmaktadır. Endüstri 4.0'ın sunduğu teknolojik gelişmeler, lojistik süreçlerin yalnızca dijitalleşmesini değil, aynı zamanda esnek, öngörülebilir ve çevik bir yapıya kavuşmasını da sağlamaktadır. Bu bağlamda akıllı lojistik; arz stabilizasyonu, sipariş yönetimi optimizasyonu, kesintilerin en aza indirilmesi ve gerçek zamanlı teslimat yönetimi gibi işlevlerle, lojistik süreçleri değişken piyasa koşullarına karşı daha dayanıklı hâle getirmektedir. Makine-makine iletişimi, IoT, CPS ve bulut bilişim teknolojileri sayesinde fiziksel lojistik sistemleri ile dijital ortamlar arasında kurulan entegrasyon, üretim ve dağıtım süreçlerinin senkronizasyonunu artırarak zaman ve maliyet avantajı yaratır (Sony ve Naik, 2020: 799). Bu dönüşüm, yalnızca büyük ölçekli üreticilerin değil, tedarik zincirinin tüm halkalarının daha etkin kararlar almasına olanak tanımaktadır.

Akıllı lojistik çözümleri, Endüstri 4.0'ın iş organizasyonu, değer yaratımı ve iş modeli dönüşümlerini destekleyen altyapının önemli bir bileşenidir. Akıllı fabrikalar, akıllı hareketlilik ve akıllı şebekeler ile kurduğu arayüzler sayesinde geleceğin akıllı altyapılarında merkezi bir rol oynamaktadır (Heng, 2014: 5). Bu yapı, geleneksel değer zincirlerini geliştirmenin ötesinde yeni nesil iş modellerinin benimsenmesine katkıda bulunur. Endüstri 4.0'ın bütüncül yapısı, üretim, pazarlama ve lojistik sistemlerini bir araya getirerek kaynakların, tesislerin ve depolama sistemlerinin entegre biçimde yönetilmesini mümkün kılar. Bu yeniden yapılanma, yalnızca teknik bir dönüşüm değil; aynı zamanda enerji tedarikinden akıllı lojistik ve hareketlilik çözümlerine kadar uzanan sistemsel bir dönüşüm sürecidir (Heng, 2004: 374). Envanter seviyeleri, lojistik süreçler ve katma değer üzerindeki etkiler gerçek zamanlı olarak öngörülebilir hâle gelirken; maliyetler, alınması gereken aksiyonlar ve riskler de hızlı biçimde analiz edilebilmektedir (Heng, 2014: 14).

Bir sonraki bileşen olan Akıllı müşteriler, müşteri ile daha etkin iletişim kurulması, müşteri tercihlerinin gerçek zamanlı izlenmesi ve müşteri entegrasyonunun derinleşmesi gibi faaliyetleri içermektedir. Endüstri 4.0 kapsamında müşteri, yalnızca ürünün nihai alıcısı değil; üretim sürecine veri temelli katkı sunan aktif bir paydaş olarak konumlanmaktadır. Bu dönüşümde, üretici ile müşteri arasındaki iletişimin kalitesi büyük önem taşımaktadır. Müşterilerle kurulan gerçek zamanlı bağlantılar, esneklik, uyarlanabilirlik ve verimliliğin sağlanmasına katkıda bulunurken; aynı zamanda üreticiler ile tüketiciler arasında daha etkili bir

iletişim ortamı yaratmaktadır (Gorecky vd., 2014: 294; Wan vd., 2015: 136; Li vd., 2017: 25). Buradaki etkileşim, kablosuz ağlar ve RFID ipleri gibi IoT ve CPS temelli teknolojiler aracılığıyla sağlanmakta; böylece müşteri tercihlerinin anlık takibi ve sistemle entegrasyonu mümkün hâle gelmektedir (Beier vd., 2020: 7). Bu nedenle üretim ve hizmetlerin tüketici taleplerine göre özelleştirilmesi, Endüstri 4.0'ın müşteri memnuniyeti açısından sunduğu en önemli katkılardan biri olarak değerlendirilebilmektedir.

Fabrikaların müşteri davranışlarını daha iyi analiz edebilmesini mümkün kılan Endüstri 4.0 uygulamaları, ekonomik ölçekte kitlesel üretim koşullarını koruyarak, bireysel ürünlerin tekli parti şeklinde üretimini hedeflemektedir (Lasi vd., 2014: 239). Bu anlayış, kitlesel özelleştirme olarak tanımlanmakta olup; müşterinin bireysel tercihlerini doğrudan ürün tasarım sürecine dâhil edebilmesini ve son dakika değişiklikleri talep edebilmesini sağlamaktadır (Shrouf vd., 2014: 699). Bu sürecin gerçekleşmesinde IoT, IoS ve sanal prototipleme uygulamaları gibi teknolojiler kritik rol oynamaktadır. Ek olarak, bu uygulamalar ancak esnek, büyük ölçekli ve modüler üretim sistemleriyle uyumlu hâle geldiğinde işlevsel olabilmektedir. Nitekim ayrıık üretim yapan ve yüksek düzeyde özelleştirme gerektiren sektörlerde faaliyet gösteren işletmeler, kesintisiz ya da parti tipi üretim yapan sektörlerle kıyasla Endüstri 4.0'ın bu yeniliklerine çok daha açık bir tutum sergilemektedir (Heng, 2014: 11).

Son bileşen olan Akıllı ürünler ise ürün yaşam döngüsünün anlık izlenmesini, satış sonrası hizmetlerin optimizasyonunu ve yeni gelir modellerinin geliştirilmesini içermektedir. Hesaplama yapabilen, veri depolayabilen, iletişim kurabilen ve çevresiyle etkileşime geçebilen bu ürünler (Mühlhäuser, 2008: 160; Miche vd., 2009: 1), dijital ve fiziksel süreçlerin iç içe geçtiği yapılarla bütünleşik biçimde çalışabilmektedir (Schmidt vd., 2015: 16). Akıllı fabrikalar, bu ürünleri internete bağlı olarak müşterilere sunmakta; ardından bu ürünlerden ve ilgili uygulamalardan gelen verileri toplayıp analiz ederek sürekli geri besleme mekanizmaları kurmaktadır (Shrouf vd., 2014: 698). Bu sayede yalnızca satış sonrası hizmetlerde değil, bakım süreçlerinde de daha öngörülebilir ve evik stratejiler geliştirmek mümkün hâle gelmektedir. Akıllı ürünlerin bu nitelikleri, üreticiler açısından yeni iş modelleri geliştirme, özelleştirilmiş hizmet sunma ve sürdürülebilir değer yaratma açısından kritik fırsatlar sunmaktadır (Schmidt vd., 2015: 17).

Akıllı ürünlerin kendilerini tanımlamaları ve üretim süreçlerini yönlendirmeleri mümkündür. Aynı zamanda sahip oldukları özellikleri, mevcut durumlarını, geçmiş işlem adımlarını ve gelecekteki kullanım veya bakım gereksinimlerini de tanımlayabilmektedir (Schmidt vd., 2015: 18). Geleceğin üretim vizyonunda, kendi üretim sürecini kontrol edebilen modüler ürünler ve verimli sistemler temel alınmaktadır (Lasi vd., 2014: 239). Rekabetin

giderek daha da arttığı çağımızda, işletmelerin hızlanmak ve farklılaşmak adına kendilerine yatırım yapmaları gerekmektedir. Öte yandan müşteri talebindeki sürekli ve hızlı değişimler de göz önünde bulundurularak üretim süreçleri çağın gerektiği özelliklere sahip olmalıdır. Örneğin, müşteriye özel veya müşteri yerinde şekillendirilebilir ürünler sunabilmek, iade oranlarının azaltılmasına ve müşteri memnuniyetinin artırılmasına doğrudan katkı sağlayabilmektedir (Schmidt vd., 2015: 17). Böylece hem üretim süreci verimli bir hal almakta hem müşteri sadakati sağlanmakta hem de maliyet bazında tasarruflar elde edilebilmektedir. Bu bağlamda akıllı ürünler fiziksel çıktı sunarak da fayda sağlayabilmektedir. Sonuç olarak karar alma süreçlerine veri sağlayan, etkileşimli ve öğrenen birimler olarak akıllı ürünler Endüstri 4.0'ın çevik ve sürdürülebilir üretim yapısının temel bileşenlerinden biri hâline gelmektedir.

1.2.3. Endüstri 4.0'ın Tasarım İlkeleri

Endüstri 4.0, kavramsal olarak bir teknoloji bütününden çok daha fazlasını ifade etmekte; üretimin yapısal ve düşünsel temellerinde köklü bir dönüşüm çağrısını da beraberinde getirmektedir. Bu dönüşüm, önceki bölümlerde detayları verilen Endüstri 4.0 teknolojileri ve bileşenlerinin doğru tasarım ilkeleriyle işletmelere entegre edilmesi sayesinde üretim süreçlerinin daha akıllı, esnek ve duyarlı hâle gelmesini mümkün kılmaktadır. Tasarım ilkeleri, yalnızca teknik uyumluluk sağlayan yapılar değil; aynı zamanda işletmelerin çevresel değişkenlere karşı duyarlılığını, müşteriye yakınlığını ve bütüncül stratejilere olan açıklığını da biçimlendiren yönetsel çerçevelerdir. Bu nedenle, Endüstri 4.0'ın temel tasarım ilkeleri, yalnızca bugünün değil, geleceğin üretim sistemlerini de düşünsel düzeyde inşa etmeye yönelik bir bakış açısı olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışmanın temel aldığı kavramların hepsinde olduğu gibi, Endüstri 4.0 ve Endüstri 4.0'la ilişkili olgular hakkında literatürde birçok farklı tanımlama ve sınıflandırmanın yer aldığı önceki bölümlerde belirtilmiştir. Bu bağlamda her bir kavram için mümkün olan en geniş perspektiften faydalanılmaya çalışılmış, değerlendirmeler bu amaç doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Buradan hareketle Endüstri 4.0 kapsamında literatürde kabul gören çalışmalardan biri olan Ghobakhloo ve diğerlerinin (2025: 63) çalışmasından yola çıkarak Endüstri 4.0 tasarım ilkeleri belirlenmiştir:

- Yatay ve Dikey Entegrasyon
- Sanallaştırma
- Birlikte Çalışabilirlik
- Modülerlik
- Ademi merkeziyetçilik

- Müşteri ve hizmet odaklılık
- Teknik destek
- Gerçek Zamanlı Yetenek

Bu ilkelerin hayata geçirilmesi, yalnızca teknolojik altyapının sağlanmasıyla mümkün olamamakta; üretim ve tedarik süreçleri başta olmak üzere bütüncül bir bakış açısıyla sistemin yeniden tasarlanması ve her bir parçanın birbirine entegre edilmesi gerekmektedir. Örneğin birlikte çalışabilirlik, sistemler arası veri ve işlev uyumunu sağlarken; sanallaştırma, fiziksel süreçlerin dijital kopyaları aracılığıyla gerçek zamanlı izlenmesini mümkün kılmaktadır (Lu, 2017: 3). Gerçek zamanlı yetenek ise, beklenmedik durumlar karşısında hızlı karar alma ve çevik yanıt kabiliyeti açısından kritik bir unsur olarak öne çıkmaktadır (Ghobakhloo vd., 2025: 63). Yani bir işletmede Endüstri 4.0 temelli üretimin tam anlamıyla gerçekleştirilebilmesi için ilgili teknolojilerin, bileşenlerin ve tasarım ilkelerinin bütünlüklü bir yapıda olduğu sistemlerin kurulması gerekmektedir. Bu anlamda yatay ve dikey entegrasyonun, Endüstri 4.0'ın omurgasını oluşturan tasarım ilkelerinden biri olduğu düşünülebilir. İşletmelerin farklı departmanları, tedarikçileri ve müşterileri arasında tam anlamıyla bütünlüklü bir bilgi sisteminin eksikliği, karar alma süreçlerinde gecikmelere ve kopukluklara neden olabilmektedir. Yatay ve dikey entegrasyonun yönetim kademesinden üretim hattına kadar tüm fonksiyonları kapsayacak şekilde geliştirilmesiyle bu sorunlar minimize edilebilmekte; otomatik ve koordineli değer zincirleri kurulabilmektedir. Örneğin; 3D tasarım, simülasyon ve ürün yaşam döngüsü yönetimi yazılımları geliştiren küresel şirketlerden Dassault Systèmes; paydaşlar arasında güvenli, standartlara uygun ve şeffaf veri alışverişi ile dijital işbirliğini teşvik etmek amacıyla kurulan BoostAeroSpace organizasyonu ile birlikte bu yaklaşıma örnek olacak nitelikteki AirDesign platformunu geliştirmişlerdir (Rüßmann vd., 2015: 57). Avrupa havacılık ve savunma sektöründe kullanılan bu sistem, birden fazla paydaşın ortak dijital bulut altyapısı üzerinden karmaşık mühendislik verilerini güvenli şekilde paylaşabilmelerini ve yönetebilmelerini sağlamaktadır. Bu sayede, tüm paydaşlar için her detayı izlenebilir bir yapı oluşturulmuş ve bu yapı, Endüstri 4.0'ın yatay ve dikey entegrasyon ve birlikte çalışabilirlik tasarım ilkelerinin somut uygulama alanlarına örnek olmuştur.

İşletmelerde, entegrasyonun sadece işletme içi süreçlerde gerekli olduğuna yönelik bir bakış açısı olabilmektedir. Buna rağmen dijital süreçlerin devasa bir dijital evren içinde gerçekleştirilmesi her birinin birbirine entegre olması gerektiğini, içsel entegrasyonun bu anlamda yeterli olmadığını göstermektedir. Bu nedenle geleneksel tedarik zincirleri Endüstri 4.0'ın etkisiyle DSN'ye evrilmekte; bu sayede modüler, hiper bağlantılı, ölçeklenebilir ve veri odaklı bir sistem haline gelmektedir (Ghobakhloo vd., 2025: 63; Kazancoglu vd., 2023: 907).

Tedarik zincirinin tedarikçilerden müşterilere kadar tüm aktörlerinin dijitalleştirilmesi, bu sistemin sorunsuz çalışabilmesi açısından oldukça önemlidir. Bu dönüşümün gerçekleştirilmesiyle dijital ağlar hem operasyonel çevikliğe hem de stratejik sürdürülebilirliğe katkı sağlayabilmektedir (Fatorachian ve Kazemi, 2021: 73).

Tasarım ilkelerinin bir diğer önemli yönü ise lojistik sistemlerle olan etkileşimidir. Sürdürülebilir ve çevik bir üretim sistemi, yalnızca teknolojik donanımlarla değil, aynı zamanda verimli, uyarlanabilir ve güvenilir lojistik altyapılarla mümkündür. Bunun sağlanabilmesi için kuruluşların yeterli teknik kapasiteye sahip insan kaynağını geliştirmeleri, değişiklikleri uygulayabilecek çevik yapılar kurmaları gerekmektedir (Gupta vd., 2022: 355). Bu da Endüstri 4.0 tasarım ilkelerini yalnızca teknik parametrelerle değil, aynı zamanda örgütsel öğrenme ve yetkinlik geliştirme stratejileriyle birlikte düşünmeyi gerektirir.

Tasarım denildiğinde akla genellikle yapısal özellikler gelse de tasarım ilkelerinin insan merkezli yönleri de bulunmaktadır. Endüstrilerde karar verme aşamalarında AI destekli sistemlerden faydalanılmaya başlansa da son sözün insanlara mı yoksa teknolojiye mi bırakılacağı konusunun henüz netlik kazanmadığı söylenebilir. Stock ve Seliger (2016: 539), gelecekte bu kararların AI'ya dayalı sistemler tarafından alınabileceğini öne sürerken; Beier ve diğerleri (2020: 10), bu durumun sosyal sürdürülebilirlik üzerindeki potansiyel etkilerine dikkat çekmektedir. Bu nedenle Endüstri 4.0 tasarımı yalnızca teknik sistemlerin değil, aynı zamanda örgütlerin kültürel yapılarının da yeniden düşünülmesini gerektirmektedir (Morgan, 1998: 16).

İşletmeler uzun araştırmalar ve uğraşlar sonucu tasarlanan sistemlerinde kurumsal çeviklik anlamında tasarım ilkelerinden bağımsız olarak bazı sorunlar yaşayabilmektedir. Crick ve Chew (2017: 631) bu durumun, iş süreçlerinin “tasarlandığı gibi” ve “uygulandığı gibi” olmak üzere iki ayrı düzlemde gerçekleşmesinden; aralarındaki gerilimin ise doğrudan esneklik ihtiyacından kaynaklandığını belirtmektedir. Burada özellikle bilgi teknolojisi altyapısının doğaçlamayı kolaylaştıran özellikleri çözüm üretilebilmesi adına öne çıkmaktadır. Öte yandan rutinler ile olanaklar arasındaki ilişkiyi ele alan yaklaşımlar ise, iş süreçlerinin tasarımında insani boyutun bütünleyici önemini ortaya koymaktadır (Feldman ve Pentland, 2003: 97; Crick ve Chew, 2017: 632). Bu bağlamda, kurumsal çevikliğin sürdürülebilir bir biçimde tesis edilebilmesi için yalnızca teknoloji altyapısının değil, aynı zamanda örgütsel kültürün ve bireylerin uyum becerilerinin de dikkate alınması gerekmektedir.

Endüstri 4.0 her ne kadar işletmelerin anda, dinamik ve proaktif kalmalarını sağlayan bir yapı yaratsa da tasarım ilkeleri uygulanırken yalnızca bugünün değil, aynı zamanda gelecekteki belirsizliklerin de dikkate alınması gerekmektedir. Veit ve diğerleri (2022: 1181), klasik ticari analizlerin yalnızca bilinen risklere odaklandığını, ancak Endüstri 4.0

tasarımlarında öngörülemeyen aksaklıkların da hesaba katılması gerektiğini belirtmektedir. Bu bağlamda esnekliğin, sistemin yaşam döngüsü boyunca maliyet, performans ve güvenilirlik gibi unsurlar üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğu ve bu nedenle erken tasarım aşamasında hesaba katılması gereken bir boyut olduğu vurgulanmaktadır.

Tüm bu çerçevede değerlendirildiğinde, Endüstri 4.0 tasarım ilkeleri yalnızca teknik mimariyi belirleyen unsurlar olarak değil; aynı zamanda sürdürülebilirlik, çeviklik ve örgütsel dönüşüm açısından stratejik yönetim araçları olarak da ele alınmalıdır. Bu ilkelerin etkin biçimde uygulanmasının, geleceğin üretim yapılarında çevreci bir bakış açısıyla rekabet avantajı ve kurumsal dirençlilik elde edilmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Bu sayede gezegenimizin kötü gidişatına fayda sağlanabilmesi umut edilmektedir.

1.3. Sürdürülebilirlik Kavramının Temel Özellikleri

İnsanlık varoluşundan beri içinde yaşadığı ekosistemleri çeşitli şekillerde değiştirmiş ve dönüştürmüştür. Bazı toplumlar doğaya saygılı ve doğayla uyumlu yaşam biçimleri oluşturmuşken, bazıları çeşitli tahribatlara yol açmıştır. Özellikle Sanayi Devrimi sonrasında gerçekleşen gelişmelerin çevreye olan olumsuz etkileri artış göstermiş, bu durum yıllar içerisinde küresel bir sorun haline gelmiştir. Bugüne bakıldığında, ekolojik ayakızımız gün geçtikçe büyümekte, gezegenimizin doğal kaynak sınırları zorlanmakta, çevre kirliliği artmakta ve bu nedenle içinde bulunduğumuz bu yaşamın “sürdürülebilirliği” sorgulanmaktadır.

Sürdürülebilir bir dönüşümün ilk adımı, tıpkı yaşamın diğer yönlerinde olduğu gibi, farkındalıkla atılır. Farkındalığın oluşabilmesi ve yayılıp etki yaratabilmesi için her paydaşın doğru bilgiye kolaylıkla erişebilmesi gerekmektedir. Günümüzde Endüstri 4.0 gibi büyük dönüşüm fırsatları ile gelişme hızı artan teknolojiler sayesinde bilgi alışverişi görece yükselse de sürdürülebilirliği bütün boyutlarıyla değerlendirebilen kuruluşların henüz oldukça az sayıda olduğu görülmektedir (Gündoğan vd., 2023: 1). Bu durum, sürdürülebilirliğin tam anlamıyla hayata geçirilebilmesi açısından aşılması güç bir engel olarak ortaya çıkmaktadır. Küresel anlamda sürdürülebilirliğin sağlanabilmesi için her türlü kurum ve kuruluştan bireylere kadar bütün paydaşların bu farkındalığa ulaşması hayati önem taşımaktadır. Yalnızca çevreci bir kavram olarak değerlendirilmemesi gereken sürdürülebilirlik, bütün boyutlarıyla uygulandığında bilgi paylaşımı ve dolayısıyla farkındalığın gelişmesine katkı sağlarken öte yandan bu boyutların uygulanabilmesi için de bilgi paylaşımı ve farkındalık gerekmektedir. Bu paradoksun yakın gelecekte çözümü mümkün görünmese de sürdürülebilir olma amacına yönelik her bir adım çok kıymetlidir. Sonuçta bir kavramın küresel ölçekte etkiye sahip olabilmesi kısa vadede gerçekleştirilebilecek bir durum değildir. Hiçbir ülke, kuruluş ya da

birey yeterli farkındalığa sahip olsa bile sürdürülebilirlik yolculuğunda tek başına ilerleyemeyecektir. Dolayısıyla bütün küresel paydaşların, bu konuda fikir birliği içinde olması; gerekli uygulamaları her kesimi kapsayacak şekilde ve bir bütün olarak hayata geçirmesi sürdürülebilirliğin başarılmasındaki en önemli koşullardan biridir.

Günümüzde ekonomik koşullar ve ekosistem arasında, özellikle büyük kuruluşların doğal kaynaklarımızı ekonomik varlıklarını büyütebilmek için düşüncesizce kullanmalarından kaynaklanan bir çatışma söz konusudur. Dünya ekonomisinde söz sahibi olan bu büyük kuruluşlar, kimi zaman çevik olabilmek adına doğal kaynaklara el koymakta; hammadde ve enerji bağımlılıklarını bu şekilde gidermekten rahatsızlık duymamaktadır. Halbuki içinde bulunduğumuz iklim krizinde her geçen gün daha fazla kaynağa ihtiyaç duyulmakta, bu ihtiyacı karşılamak gün geçtikçe zorlaşmaktadır (Gündoğan vd., 2023: 4). Dolayısıyla işletmelerin çevik olurken sürdürülebilir olması bütün dünya için dikkate alınması gereken bir zorunluluk haline gelmiştir.

Bu kapsamda tezin ilerleyen bölümlerinde sürdürülebilirlik kavramının gelişimi ve dönüşümü hakkında bilgiler verilmiş; sürdürülebilirliğin temel boyutları ve sürdürülebilir kalkınma amaçları ile ilgili detaylar paylaşılmıştır.

1.3.1. Sürdürülebilirlikten Sürdürülebilir Kalkınmaya Geçiş

Her ne kadar son elli yıllık süreçte popülerliği artmış olsa da sürdürülebilirlik kavramının aslında çok daha eskiye dayandığı bilinmektedir. Bu kavram, modern çevre hareketinin bir ürünü değildir; Almanca'da "Nachhaltiger Ertrag" kelimesiyle ifade edilen "Sürdürülebilir Verim" kavramı neredeyse iki yüzyıl boyunca uluslararası ormancılığın temel doktrini olmuştur. Kelimenin kendisi ise 1713 yılında Saksonya Krallığı Kraliyet Madencilik Ofisi Başkanı Hanns Carl von Carlowitz tarafından, dönemin en önemli kaynağı olan kerestede yaşanacağı tahmin edilen kıtlığın üstesinden gelebilmek ve orman alanlarının korunmasını sağlamak amacıyla ortaya atılmıştır. (Grober, 2007: 3). Ancak kavramın yükselişi, çevre sorunlarının küresel anlamda ve uluslararası bir ortamda ilk kez tartışıldığı 1972 yılında Stockholm'de düzenlenen "Birleşmiş Milletler İnsan Çevresi Konferansı" sonrasında gerçekleşmiştir (Birleşmiş Milletler (BM), 2025). Konferans, sanayileşmiş ve gelişmekte olan ülkeler arasında ekonomik büyüme, hava, su ve okyanusların kirlenmesi ve dünyanın dört bir yanındaki insanların refahı arasındaki bağlantı konusunda bir diyalogun başlangıcını oluşturmuştur. İsminden de anlaşılacağı üzere insan ve kalkınma odaklı olmasına rağmen bu konferansın ardından UNEP kurulmuş, çevre ve sürdürülebilirlik konusundaki çalışmalar hız kazanmıştır. İlerleyen yıllarda sürdürülebilirlik kavramı, "Sürdürülebilir Kalkınma" olarak

kullanılmaya başlanmış; yaygınlaşması ise Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu'nun (WCED) 1987 tarihli Ortak Geleceğimiz (Our Common Future), namı diğer Brundtland Raporu ile gerçekleşmiştir. Bu rapora göre Sürdürülebilir Kalkınma “gelecek kuşakların kendi gereksinimlerini karşılayabilme yetilerini tehlikeye atmadan bugünün ihtiyaçlarını karşılayabilen kalkınmadır” olarak tanımlanmıştır. Kavram günümüzde birçok farklı şekilde tanımlanabilmekte ve bu tanım artık klişeleşmiş olarak görülse de kapsamlılığı ve yenilenebilirliği açısından anlamındaki değeri yitirmemiştir.

Yıllar içinde kavramın gelişim göstermesinde ve yukarıda belirtildiği gibi farklı şekillerde tanımlanabilmesinde önemli bir adım olan Brundtland Raporu, sürdürülebilir kalkınmaya tam olarak nasıl ulaşılacağı konusunda yeterince yol gösterici nitelikte değildir. Ancak 1992 yılında Rio de Janeiro’da düzenlenen, Yeryüzü Zirvesi olarak da bilinen BM Çevre ve Kalkınma Konferansı (UNCED) sürdürülebilir kalkınmada bir rehber niteliğinde sayılabilir. UNCED, Gündem 21 (Agenda 21) adında bir eylem planı ile iki uluslararası sözleşmenin (BM Biyolojik Çeşitlilik Sözleşmesi (UNCBD) ve BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC)) oluşturulmasına katkı sağlamıştır. Özellikle Gündem 21 ile sürdürülebilir kalkınmanın gerçekleştirilebilmesi açısından çok önemli hedefler geliştirilmiş olsa da bu hedeflere yönelik düzenleme ve faaliyetlerin gönüllülük esasına dayandırılıp ülkelerin kendi tercihlerine bırakılmasının, bu alanda potansiyelinden görece daha yavaş bir şekilde ilerleme kaydedilmesine neden olduğu düşünülebilir.

Yirmi birinci yüzyıla gelindiğinde, doksanlı yıllarda tek boyutlu ekonominin sorgulanır hale gelmesinin ardından BM 2000’de New York’da, çok boyutlu bir kalkınma hedefi sunan Bin Yıl Zirvesi’ni gerçekleştirmiş ve bu zirvede 189 ülke tarafından kabul edilen ve 2015 yılına kadar gerçekleştirilmesi tasarlanan Binyıl Kalkınma Hedefleri-BKH (Millennium Development Goals) başlıklı sekiz kalkınma hedefi açıklanmıştır (BM, 2000):

- Aşırı yoksulluk ve açlığın ortadan kaldırılması: (Günlük 1 doların altında kazançla yaşayanların oranını azaltmak, açlıkla mücadele etmek vb.)
- Evrensel ilköğretim sağlanması: (Tüm çocukların ilköğretimi tamamlamasını sağlamak.)
- Toplumsal cinsiyet eşitliğinin sağlanması ve kadınların güçlendirilmesi: (Kız ve erkek çocukların eğitime eşit katılımı)
- Çocuk ölümlerinin azaltılması: (5 yaş altı çocuk ölüm oranlarının düşürülmesi)
- Anne sağlığının iyileştirilmesi: (Gebelikte anne ölüm oranlarının azaltılması)
- HIV/AIDS, sıtma ve diğer hastalıklarla mücadele: (Bu hastalıkların yayılımını durdurmak ve geriletmek)

- Çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması: (Doğal kaynakların korunması, temiz suya erişim, gecekondü bölgelerinin iyileştirilmesi vb.)
- Küresel kalkınma için iş birliği oluşturulması: (Adil ticaret, borç hafifletme, ilaç ve teknoloji erişimi gibi konularda uluslararası iş birliği)

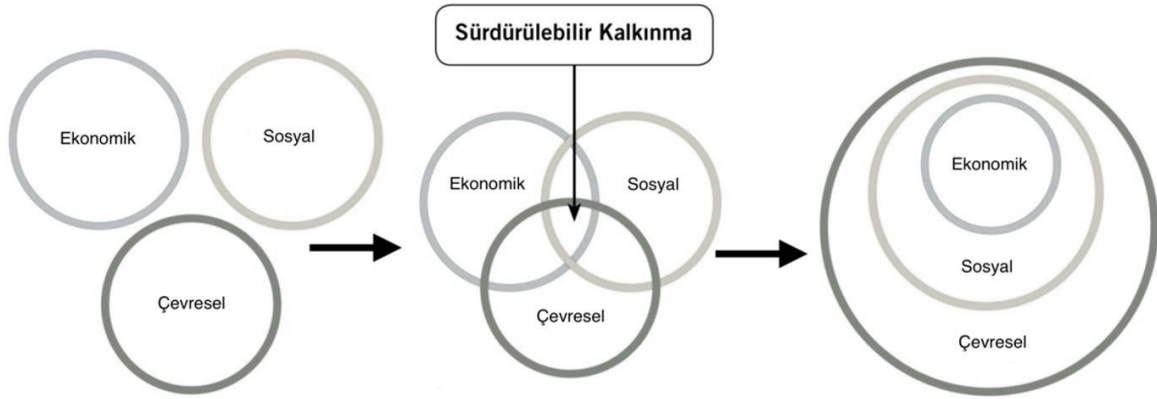
Yetersiz olsa da bu kalkınma planında çevresel sürdürülebilirliğin tek başına bir hedef olarak yer alması oldukça önemlidir. Bundan önceki küresel çabaların hiçbirinde çevre ile ilgili planlamalar ön plana çıkmamakta, insani faaliyetleri ve kuruluşların sürdürülebilirliğini merkeze alan tutumlar hayata geçirilmektedir. Bu maddenin tek başına yer almasıyla çevre koruma ve toplumsal kalkınma birlikte ele alınmaya başlamış; çevre konuları kalkınma gündeminde daha görünür hale gelmiş ve geliştirilen politikaların çevreyle uyumluluğu konusundaki bilinç ortaya çıkmaya başlamıştır (Eşkinat, 2016: 275). Dolayısıyla çevresel bir maddenin tek başına bir hedef olarak yer alması kavramın gelişimi açısından çok önemli bir basamaktır.

2015 sonrasında BKH'nin yerini 2030 yılına kadar gerçekleştirilmesi planlanan Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları'na (SKA / Sustainable Development Goals - SDGs) bırakmıştır (Bkz: Şekil 1.3). 17 amaçtan oluşan SKA, sürdürülebilirliğin, insani gelişmenin ve ekonomik büyümenin boyutlarından biri değil; bu gelişme ve büyümenin nasıl gerçekleştirilmesi gerektiğinin göstergesi olduğunu ortaya koymuştur. Sürdürülebilir olmayan kalkınmanın mümkün olamayacağı fikri, küresel boyutta ve uluslararası alanda kabul görmeye başlamıştır. SKA hakkında detaylı bilgi ilerleyen bölümlerde verilecektir.

1.3.2. Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları

Sürdürülebilirlik ve ardından sürdürülebilir kalkınma kavramlarının tarihsel gelişimi incelendiğinde dikkat çeken en önemli noktalardan biri, başlarda ekonomik büyüme odaklı yaklaşımlar görülürken yıllar içerisinde sosyal ve çevresel bakış açılarının da önem kazanması ve günümüzde bu üç kavramın bütüncül olarak ele alınmasıdır (Khan vd., 2021: 3). Bu değişim gerçekleşmeden önce, sürdürülebilirlik sadece çevresel amaçlar için dikkate alınır; insani ve endüstriyel gelişim için sosyal ve ekonomik her bir boyut ayrı ayrı incelenirdi. Ancak BM başta olmak üzere, sürdürülebilirlik konusunda çalışan kurumlar tarafından yıllar içinde gerçekleştirilen konferanslar, oluşturulan raporlar ve imzalanan sözleşmeler, işletmelerin ekonomik, sosyal ve çevresel konuları birlikte gözetmesi gerektiği anlayışının yerleşmesi konusunda etkili olmuştur. Üçlü Bilanço Hesabı (Triple Bottom Line) olarak da dile getirilen ve sürdürülebilirliğin temel boyutları olan bu kavramlar kurumların ekonomik değerlerini değil, aynı zamanda çevresel etkilerini ve sosyal sorumluluklarını da değerlendirmeleri gerektiğini

göstermiştir (Elkington ve Rowlands, 1999: 1). Günümüzde ise toplumsal refah için elzem olduğu düşünülen sürdürülebilir kalkınma, SKA’larda da dile getirildiği üzere, iç içe geçmiş ve birinde başarılı olunmadan diğerinin başarılması mümkün olmayan kavramlarla ifade edilmektedir. Yıllar içinde gerçekleşen bu dönüşüm Şekil 1.2’de görselleştirilmiştir.



Şekil 1.2 Sürdürülebilirliğin Temel Boyutlarının Dönüşümü

Kaynak: Şekil yazar tarafından Gündoğan ve diğerlerinin (2023: 7) çalışması temel alınarak yeniden oluşturulmuştur.

Ortaya çıktığı dönemlerde genellikle sadece çevresel boyutuyla bilinen sürdürülebilirlik kavramı günümüzde her geçen gün daha fazla araştırılan ve tartışılan bir konu haline gelmiştir. Eskiden kamu sektörünün görevi gibi algılanan sürdürülebilirlik; ekonomik, sosyal ve çevresel etkileriyle toplumun her bir bireyini “vatandaş” ve “tüketici” olarak etkileyen bir kavrama dönüşmüştür (Gündoğan vd., 2023: 1). Bireylerin yanı sıra, yerel ve küresel boyutlarda gerçekleşen olaylardan etkilenen iş dünyası da sürdürülebilirlik konusunda sorumluluk alanını genişletmeye başlamıştır. İnsan hakları, fırsat eşitliği, toplumsal cinsiyet eşitliği, çevre ve hayvan hakları gibi konular öncelikli ilgi alanı haline gelmiştir. Sevindirici bir gelişme olarak değerlendirilebilecek olan bu durum, sürdürülebilirlik hakkında genel bir farkındalık artışı gibi yorumlansa da gerçek hayatta karşılık bulduğu alanların kısıtlılığı, konuyla ilgili doğru bilgiye ulaşmanın her zaman kolay olmaması ya da bu bilginin analiz edilme kapasitesinin eksikliği gibi faktörler nedeniyle sürdürülebilirlik konusunda hala yapılması gereken çok şey olduğunun göstergesidir. Toplumsal bir sürdürülebilirlikten bahsedebilmek için büyük kapsamlı bir çalışma yapılması ve hem kurumlarda hem bireylerde değişim yaratılması gerekmektedir. Sürdürülebilir bir yaşam bilgili, farkında, harekete geçmeye hazır bir toplumla mümkün olabilir; böyle bir toplum ise sürdürülebilirliğin çevresel, sosyal ve ekonomik olmak üzere bütün boyutlarının dikkate alınmasıyla mümkün olabilir. Unutulmamalıdır ki sürdürülebilirlik

adeta sistem gibi işleyen bir yapıya sahiptir, bu sistemde yer alan her bir aktör süreçlerin sorunsuz devam etmesini sağlayan özelliklere ve görevlere sahiptir. Dolayısıyla hiçbir ülke, kurum ya da birey sürdürülebilir olma yolunda tek başına ilerleyemeyecektir. Ancak hep birlikte hareket edilerek, konu hakkında ortak bir algı geliştirilerek, uzlaşa ve iş birliği ile çalışılarak sürdürülebilir olma yolunda aşama kat edilebilecektir.



Şekil 1.3 BM'nin Çalıştığı Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları

Kaynak: BM Türkiye, 2025

2030 yılına kadar gerçekleştirilmesi taahhüt edilen SKA'lara, 2025 yılı itibarıyla hem dünya genelinde hem de Türkiye özelinde ulaşılmasında ne yazık ki büyük zorluklar yaşanmaktadır. BM Ekonomik ve Sosyal İşler Bölümü (UN DESA) tarafından yayınlanan 2024 Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları Raporu'na göre SKA'ların sadece %17'sinde planlandığı şekilde aşama kaydedilmiştir. Amaçların yarısında orta ya da sınırlı düzeyde gelişme kat edilmiş olup, üçte birinden fazlasında ise ya ilerleme durma noktasında gelmiş ya da gerileme başlamıştır. BM Ticaret ve Kalkınma Konferansı (UNCTAD, 2023) tarafından yayımlanan SDG Investment Trends Monitor (Issue 4) raporuna göre, SKA'lardaki ilerlemeye pandemi, artış gösteren siyasi ve jeopolitik gerilimler, küresel ekonomik eşitsizlikler ve iklim krizi gibi faktörlerin engel olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, gelişmekte olan ülkelerde amaçlara ulaşmak için gereken yatırım ihtiyacının yıllık 4 trilyon dolar olduğu ve bu ülkelerin bu yatırımlarda yetersiz kaldığı vurgulanmıştır. SKA'lara ulaşmada karşılaşılan zorluklar hem küresel hem de ulusal düzeyde, daha güçlü siyasi irade, özel sektörün daha aktif katılımı ve yenilikçi finansman modellerini gerektirmektedir. Özellikle eğitim, sağlık ve finansal hizmetlere erişimin artırılması ve dijital teknolojilerin süreçlere dahil edilmesi SKA'lara ulaşmada önemli bir rol oynayabilir (Hinssen, 2024). Ayrıca SKA'lar kavramsal olarak tatmin edici tanımlara sahip olsalar bile gönüllülük esasına göre uygulanmalarından dolayı amaçların

gerçekleşmesinin sekteye uğradığı düşünülebilir. Bu nedenle SKA'lara uygun zorunluluklar getirilmesi amaçlara ulaşmadaki başarıyı artırabilir.

Akdeniz havzasında yer alması sebebiyle iklim krizinden en çok etkilenen ülkelerden biri olan (Kalaycı Kadak ve Öztürk, 2019: 162; Kovancı, 2023: 319; World Bank, 2022: 18) Türkiye'nin SKA'lara ulaşma çabaları incelendiğinde elde edilen bulguların ne yazık ki olumlu olmadığı görülmektedir. Türkiye'de özellikle çevresel sürdürülebilirlik ve sosyal eşitsizliklerin azaltılması konularında yapısal reformlara, yatırım artışına ve kapsayıcı kamu politikalarına ihtiyaç duyulmaktadır. 2024 yılı verilerine göre sera gazı emisyonları, biyoçeşitlilik kaybı ve enerji kullanımı gibi çevresel göstergelerde düşük performans sergilendiği görülmektedir. Ek olarak, gelir dağılımı eşitsizliği, sosyal koruma açıkları ve toplumsal cinsiyet temelli fırsat farklılıkları gibi sürdürülebilirliğin sosyal boyutunda da büyük eksiklikler görünmektedir (Sachs vd., 2024; BM Türkiye, 2024). Türkiye uluslararası anlamda birçok iklim çalışmasına katılsa da gerçekleştirilmesi planlanan düzenlemelerin çoğu teorik kalmakta, bu düzenlemeler oldukça sınırlı uygulanabilmektedir. Birçok kurumun çevreci tutumları, gerçek bir çevre duyarlılığından değil, daha çok pazarlama amaçları ve imaj yönetimi gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır. Mevcut ekonomik koşullar altında işletmelerin piyasada kalma çabaları da çevresel konulara ilgilerinin azalmasına neden olabilmektedir. Halbuki sürdürülebilir kalkınma bilincinin gerçekten yerleşmiş olduğu kurumlarda çevreci uygulamalarla birlikte işletme performansında da iyileşmeler yaşandığı görülebilmektedir. Örneğin bazı kurumlar, normal şartlar altında çevresel ve kurumsal performansı artırmak için alınması gereken ISO 14001 Çevre Yönetim Sistemi sertifikası gibi belgeleri, sadece yasal yükümlülükleri yerine getirmiş gibi görünmek ya da prestij kazanmak için almaktadır (Ekşi, 2019: 118). Bu şekilde uygulanan düzenlemeler, kimi zaman faydadan çok zarara neden olabilir. Özetle çevreci yaklaşımlar bazen “yeşil” bir görünüm sağlayan stratejik vitrinler olarak karşımıza çıkmaktadır.

Sanayileşmenin ilerlemesiyle insan faaliyetleri, gezegenimizin doğal dengesini ve döngülerini bozmaya başlamıştır. Bu durum insan kaynaklı iklim değişikliğine neden olmaktadır. Okyanusların asidifikasyonu, topraklardaki kimyasal ve fiziksel değişimler, habitat ve biyoçeşitlilik kayıpları, erozyon ve çölleşme, hava kirliliği başta olmak üzere diğer bütün çevresel kirlilikler vb. insan faaliyetlerinden kaynaklanan olumsuzluklardan bazılarıdır. Gezegenimizde ve dolayısıyla hayatlarımızda bu kadar etkisi olan bu olayların göz ardı edilmemesi, geri döndürülemez hale gelmeden çeşitli önlemlerin alınmasını gerektirmektedir. Sürdürülebilirlik konusunda artık neredeyse tüm kesimlerde önemli çabalar gösterilse de gelişmeler çok yavaş ilerlemekte ve zamanımız daralmaktadır. Örneğin, küresel iklim politikaları düşünüldüğünde en kapsamlı ve güncel uluslararası anlaşmalardan biri olan Paris

Anlaşması'nın en önemli ilkelerinden biri, küresel sıcaklık artışının 1,5°C'de sınırlandırılmasıdır. Ayrıca bu anlaşma tüm ülkelere sera gazı emisyonlarını azaltma yükümlülüğü de getirmiştir. Benzer şekilde, Fortune Global 500 şirketlerinin %45'i, 2050 yılına kadar net sıfır emisyon hedefi belirlemiştir. Climate Impact Partners'a göre (2024) bu oran, 2020'de %8 iken, 2023'te %39'a ve 2024'te %45'e yükselmiştir. Bir başka örnek olarak Dünya Ekonomik Forumu'nun (World Economic Forum-WEF) raporunda (2024), büyük sanayi şirketlerinin ortalama emisyon yoğunluğunda 2019-2023 yılları arasında %4,1'lik bir azalma gözlemlenmiş; bu azalma 2022-2023 döneminde daha da hızlanmıştır. Bu konudaki örnekler elbette çoğaltılabilir ve daha da çoğalmalıdır. Ancak bu gibi örnek gelişmelerin kurumların yeterince şeffaf ve etkin olmamasından kaynaklı olarak yanlış ya da yetersiz lanse edildiğine yönelik eleştiriler de bulunmaktadır. Gerçek ve sürdürülebilir emisyon azaltımı için daha kapsamlı ve şeffaf stratejilere ihtiyaç duyulmaktadır (Jessop, 2024).

İKİNCİ BÖLÜM

ENDÜSTRİ 4.0, SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE İNSANSIZ DENİZ ARACI PERSPEKTİFLERİNDEN ÇEVİK ÜRETİM DEĞERLENDİRMESİ

2.1. Literatür Taraması

Bu çalışma, çevik üretim kavramının, son yıllarda literatürde adından çokça söz ettirmesinin nedenleri üzerine odaklanmaktadır. Gerçekleştirilen literatür taramasına göre bu nedenler arasında Endüstri 4.0 ve teknolojik gelişmelerin getirdiği iyileştirmeler, sürdürülebilirliğe duyulan kaçınılmaz ihtiyaç ve Covid-19 salgını ön plana çıkmaktadır. Özellikle iklim krizinin içinde olduğumuz bu günlerde, aşırı ve hızlı tüketimi kolaylaştırdığından dolayı toplum için bir yandan da risk faktörü olarak görülebilecek çeviklik kavramının Endüstri 4.0'ın etkisiyle sürdürülebilirlik ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda literatürde nasıl yer bulduğu incelenmiş; bu kavramlar temel alınarak İnsansız Deniz Araçları (İDA) üretimi kapsamında bir ampirik çalışma gerçekleştirilmiştir. İDA'lar ve ampirik çalışmalarla ilgili detaylar ilerleyen bölümlerde sunulmuştur.

Belirtilen tüm kavramlar göz önünde bulundurularak, nitelikli bir literatür taraması yapmak adına bilim dünyası tarafından yaygın olarak kullanılan ve kabul görülen Web of Science (WoS) veri tabanı esas alınmıştır. Çeviklik kavramının farklı bakış açılarıyla incelenmesi amaçlandığından dolayı 58 farklı anahtar kelime grubuyla (Bkz: Tablo 2.1) taramalar gerçekleştirilmiş ve çok sayıda çalışmaya ulaşılmıştır. Tamamlanmış ve belirli bir denetimden geçmiş çalışmalara erişebilmek adına yalnızca makale formatındaki çalışmalar kapsama alınmış ve bu seçimin ardından 2024 yılı Ağustos ayı itibarıyla yaklaşık 45700 adet yayına ulaşılmıştır. İşletme ve Üretim Yönetimi odaklı bir değerlendirilme yapılması hedeflendiği için yayınlarda WoS kategori filtrelerinden yararlanılmış; “business”, “management”, “operations research”, “management science” ve “supply chain” gibi kategorilerdeki yayınlar filtrelenmiştir. Bu işlem sonrasında 5065 adet yayına ulaşılmıştır. Bu çerçevede literatürün durumu hakkında genel bir bilgiye sahip olunabilmesi adına her bir anahtar kelime grubu için en eski tarihli 10 yayın, en yeni tarihli 10 yayın ve en çok atıf alan 10 yayın değerlendirmeye alınarak bir liste oluşturulmuştur. Bu liste oluşturulurken farklı anahtar kelimelerle ulaşılan aynı yayınlara listede bir kere yer verilmiş; İngilizce veya Türkçe olmayan ve tam metnine ulaşılamayan yayınlar listeden çıkarılmıştır. Sonuç olarak 401 yayından oluşan bir yayın listesi ortaya çıkmıştır.

Tablo 2.1 Literatür Taramasında Kullanılan Anahtar Kelimeler

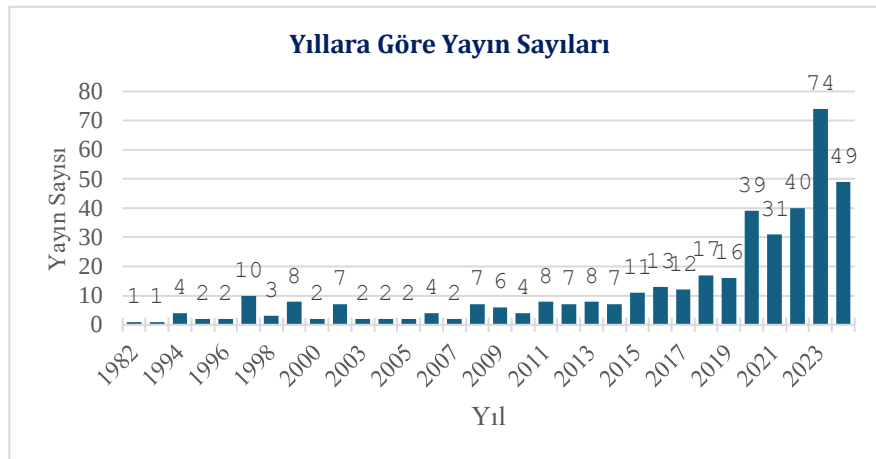
"Agile Production"	Industry 4.0 + Unmanned Surface Vehicle
"Agile Manufacturing"	Sustainability + "Unmanned Surface Vehicle"
Agility	Sustainability + Unmanned Surface Vehicle
"Agile Production" + "Industry 4.0"	Agility + Unmanned Surface Vehicle
"Agility Index"	Agility + "Unmanned Surface Vehicle"
"Agile Production" + "Covid 19"	Agile Manufacturing + Unmanned Surface Vehicle
Agility + "Covid 19"	Agile Manufacturing + Unmanned Surface Vessel
Agile + Production	Agile + Unmanned Surface Vessel
Agile Production + Sustainability	Agile Production + Unmanned Surface Vessel
Behavioral Operations Management + Agility	Agility + Unmanned Surface Vessel
Behavioral Operations Management + "Agile Production"	Production + Unmanned Surface Vessel
"Behavioral Operations Management" + Agility	Industry 4.0 + Unmanned Surface Vessel
"Behavioral Operations Management" + "Agile Production"	Sustainability + Unmanned Surface Vessel
"Behavioral Operations Management" + Production	Unmanned Surface Vessel
Agility + Production	Unmanned Surface Vehicle
"Agile Production" + Sustainability	Agile Production + Naval
"Agile Manufacturing" + "Industry 4.0"	Agile Production + Marine
"Agility Index" + "Industry 4.0"	Agile Production + Shipbuilding
"Covid 19" + "Industry 4.0"	Agile Production + Shipyard
Sustainability + "Industry 4.0"	Industry 4.0 + Naval
Behavioral Operations Management + "Industry 4.0"	Industry 4.0 + Marine
"Agile Production" + "Industry 4.0" + Sustainability	Industry 4.0 + Shipbuilding
Agile + "Unmanned Surface Vehicle"	Industry 4.0 + Shipyard
Agile + Unmanned Surface Vehicle	Sustainability + Naval
Agile Production + Unmanned Surface Vehicle	Sustainability + Marine
"Agile Production" + "Unmanned Surface Vehicle"	Sustainability + Shipbuilding
Production + Unmanned Surface Vehicle	Sustainability + Shipyard
Production + "Unmanned Surface Vehicle"	"Unmanned Surface Vessel"
Industry 4.0 + "Unmanned Surface Vehicle"	"Unmanned Surface Vehicle"

Kaynak: Tablo, yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 2.1’de görülebileceği üzere literatür taraması gerçekleştirilirken çerçeveyi mümkün oldukça kapsamlı tutabilmek adına çok sayıda ve farklı varyasyonlarla anahtar kelimeler kullanılmıştır. Yukarıda bahsedilen filtrelemeler sonrası tabloda yer alan anahtar kelimeler arasında en fazla yayına ulaşanlar 29’ar çalışma ile "Agile Manufacturing", Sustainability + "Industry 4.0" ve sustainability + marine anahtar kelime grupları olmuştur. Buna karşılık, 28 anahtar kelime grubuna ilişkin herhangi bir çalışmaya ulaşılammıştır. Endüstri 4.0, çevik üretim ve sürdürülebilirlik kavramlarını birlikte ele alan tek yayının Agarwal ve diğerlerinin 2023 tarihli yayını olduğu tespit edilmiştir. Literatürde bu alana yönelik sınırlı sayıda çalışmaya rastlanması üzerine bu durumun belirli bir eksikliğe işaret ettiği düşünüldükçe, çalışma bu doğrultuda yapılandırılmıştır. Ek olarak, Türkçe literatür de incelenmiş; Endüstri 4.0, sürdürülebilirlik ve çevik üretim kavramlarının her birine ayrı ayrı

çeşitli çalışmalarda derinlemesine yer verildiği tespit edilmiştir. Ancak bu üç kavramın birlikte ve kapsamlı biçimde ele alındığı bir çalışmaya erişilebildiği kadarıyla rastlanamamıştır. Bununla birlikte, İDA kavramının henüz oldukça yeni bir alan olması nedeniyle, konuya ilişkin literatürün hem ulusal hem de uluslararası düzeyde sınırlı kalmış olması beklenen bir sonuçtur. Dolayısıyla, bu yenilik alanı bir fırsat olarak değerlendirilmiş ve çalışmanın ampirik bölümü bu doğrultuda yapılandırılmıştır.

Elde edilen yayınların yıllara göre dağılımına bakıldığında (Bkz: Şekil 2.1) özellikle son 10 yıllık süreçte hızlı bir ivmeyle yayın sayılarının arttığı görülmektedir. 2023 yılında 74 yayınla en yüksek sayıya ulaşıldığı tespit edilmiş olup, mevcut yükseliş eğilimi dikkate alındığında, önümüzdeki yıllarda bu sayının artış göstereceği düşünülmektedir. Ek olarak, tablodaki veriler doğrultusunda kavramın 2010’lu yıllara kadar literatürde sınırlı biçimde ele alındığı tespit edilmiş olup, bu durumun işletmelerin çevikliği mümkün kılacak teknik donanım, finansman, altyapı ve bilgi birikimine yeterince sahip olmamalarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Muhtemelen Endüstri 4.0 kavramının literatürde belirli bir olgunluğa ulaşmasının ardından, 2015 yılından itibaren yayın sayılarında yıllar içinde artan bir yükselişin gözlemlendiği söylenebilir. Bu artışın, hem Endüstri 4.0 ve teknolojik gelişmelerin sunduğu imkânlar hem de Covid-19 salgınının getirdiği zorunluluklarla birlikte işletmelerin hız kazanma çabalarından kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir. Sektörde yaşanan bu yönelimin, alandaki akademik çalışmaların artış göstermesinin muhtemel nedenlerinden biri olduğu tahmin edilmektedir. Günümüz piyasasında hızlı olmak bu derece dinamik bir ortamda hayati bir özellik olarak karşımıza çıkmaktadır. Dolayısıyla işletmelerin hızıyla bağlantılı en önemli kavramlardan biri olan çeviklik literatürüne katkının artması oldukça doğaldır.



Şekil 2.1 Literatür Taraması Sonucu Erişilen Yayınların Yıllara Göre Sıralanması

Kaynak: Şekil, yazar tarafından oluşturulmuştur.

İlerleyen bölümlerde Şekil 2.1’den hareketle çevik üretimin yıllar içindeki gelişimine yer verilmiştir. Çevik üretimin ortaya çıktığı yıllardan pandemi sonrası döneme kadar çeşitli

aralıklarla kavramın gelişimi hakkında bilgi verilmiş, genel özelliklerinden bahsedilmiş ve diğer kavramlarla olan etkileşimi hakkında görüşler sunulmuştur.

2.2. Çevik Üretim Kavramının Tarihsel Gelişimi

Bu bölümde, erişilebildiği kadarıyla çevik üretim kavramının geçtiği ilk çalışmadan başlamak üzere günümüze kadar kavramın gelişimi hakkında kronolojik bir akış oluşturulması amaçlanmıştır. Literatürün hem niteliksel hem de niceliksel hareketleri göz önünde bulundurularak kavram, belirli zaman aralıklarına göre dönemsel olarak açıklanmaya çalışılmıştır.

2.2.1. Başlangıç Dönemi (1982-1993)

Gerçekleştirilen literatür taramasına göre çeviklik kavramının geçtiği ilk yayın erişilebildiği kadarıyla 1982 yılında Brown ve Agnew tarafından yazılan Corporate Agility isimli çalışmadır. Bu çalışmada çeviklik, kurumsal çeviklik olarak karşımıza çıkmakta ve esneklikle olan bağlantısına yer verilmektedir. Buna ek olarak kurumsal çeviklikte çıktı odaklı düşünüldüğü takdirde, üretim sisteminin temel kaynaklara bağlılığı gerektirdiği belirtilmektedir. Çalışmanın yapıldığı dönemde bu felsefenin yöneticiler tarafından benimsense de çoğu zaman bu olguya sözde bağlılık gösterdikleri, çevikliğin işletmelerde hayata geçirilemediği vurgulanmıştır.

2.2.2. 90'lar Ortaları ve 2000'lerin Başlangıcı (1994-2001)

Çeviklik kavramı ortaya çıktığı döneme kıyasla 90'lı yılların sonuna doğru görece artan bir ilgiyle karşılaşmıştır. Küresel firmaların rekabet önceliği 1970'lerin sonuna kadar maliyetten, 1980'lerin başından 1990'ların başlarına kadar kaliteye ve sonrasında zamana doğru ilerlediği için, bir şirketin pazar ihtiyaçlarına cevap verme yeteneğinin sistematik bir değerlendirmesi, zorunluluk haline gelmiştir (Kumar ve Motwani, 1995: 51). Ancak bu ivme teknolojik yetersizlikler, yanlış uygulamalar ve çevik bakış açısına yönelik adaptasyon sorunları gibi çeşitli sebeplerle sürdürülememiştir. Örneğin, Van Hoek ve diğerlerinin (2001: 126) belirttiği gibi çeviklik uluslararası iş dünyasının ve değişken pazarların performans gereksinimleri düşünüldüğünde karşılaşacağı en önemli zorluklardan biri olarak daha fazla dile getirilmeye başlansa da o dönemde mevcut literatürde kendisine yeterli derinlikte yer bulamamıştır. Benzer bir şekilde, Burgess de (1994: 23) konu hakkındaki akademik katılıma rağmen, çevik üretim kavramının o dönem için literatüre derinlemesine giremediğini ve mevcut çeviklik kavramı anlayışının yalnızca yakın zamandaki kökenlerini yansıtan biçimsiz bir kavram olarak kaldığını belirtmiştir. Dönemin yayınlarının çoğu çevikliği üretime dayalı bir

yönetim kavramı olarak ele almış, bütünleştirici bir yaklaşım ve kurumsal bir bakış açısıyla tasarım, tedarik zinciri, pazar ve müşteriler gibi diğer olgularla ilişkilendirememiştir. Kurumsal düzeyde çevikliğin anahtarı bilgi entegrasyonudur ve bu mantık bütün işletmeye genişletilmelidir (Pant vd., 1994: 68). Ancak doksanlı yıllarda hayata geçirilen çalışmalar çeşitli açılardan henüz yeterli olgunluğa erişemediği için çeviklik felsefesinin yeterince bütünleştirici değerlendirmeleri yapılamamıştır.

Öte yandan kavramın mevcut çalışmaların çoğunda yalnızca Amerika Birleşik Devletleri (ABD) merkezli olması (Van Hoek vd., 2001: 146) çeviklik literatürüne gelen bir başka eleştiridir. Bu durum ABD'deki hükümet yetkililerinin ve üreticilerin, Japon merkezli üreticiler gibi ekonomik rakiplerin oluşturduğu algılanan tehditlere yanıt verme yönündeki kararlılığından kaynaklanmaktadır (Burgess, 1994: 23). Yani çevik üretimle ilgili yapılan çalışmaların, göstermelik bir tutumla oluşturulduğu iddia edilmiştir. Öte yandan, Burgess'e göre (1994) çeviklik kavramının Avrupalı üretim yönetimi teorisyenlerinin bakış açısından kolektif bilince nüfuz etmemiş gibi görünmesinin literatürün bu denli kısıtlı kalmasına neden olduğu sonucuna varılabilir. Benzer olgunlaşma sorunlarından dolayı ilerleyen yıllarda bu alanda gerçekleştirilen çalışmaların azalma eğiliminde olduğu düşünülebilir.

Meade ve Sarkis ise (1999: 259) konuyu karar verme mekanizmasıyla ve önceliklendirme sorunlarıyla ele almıştır. Çevik bir iş süreci yaratma arayışının sürekliliği, karar vericiler için seçenekleri önceliklendirme gibi karmaşık görevler anlamına gelmektedir. Kusiak ve He'ye göre ise (1997: 157) çevik bir iş süreci yaratma tasarım sürecinden, özellikle de montaj tasarımından başlamaktadır. Bir üretim sisteminin çok çeşitli ürünleri verimli bir şekilde üretebilmesi, ürün karmasındaki ve tasarımlarındaki değişiklikleri karşılamak için yeniden yapılandırılabilir olması gerektiği vurgulanmıştır. Bu da aslında çevik üretim kavramının, değişen müşteri gereksinimlerine hızlı bir şekilde yanıt verme ihtiyacından kaynaklandığını ortaya koymaktadır. Bu durumda çevikliğin belirleyicileri, boyutları ve sağlayıcıları gibi özellikleri ve bunların ilişkilerinin bütünleştirilmesi, işlevler arası eğitim uygulamaları, objektif analizler ve bunların sonucunda verilen stratejik kararlar gibi birçok boyut çevik üretim kapsamında düşünülmesi gereken olgular olarak ortaya çıkmıştır. Şüphesiz operasyon yöneticilerinin ve idari karar vericilerin bu teknikleri ve felsefeleri kendi ihtiyaçlarına göre filtreleyebilecekleri bir yöntem ihtiyacı vardır ve literatürde çeşitli yöntemler sunulmuştur ancak yukarıda bahsedilen sebepler teorinin uygulamaya geçirilememesine ve dolayısıyla alanın popülaritesini kaybetmesine neden olmuştur.

Seksenlerden doksanlı yıllarında sonuna doğru geline süreçte çeviklik kavramı kendisinden başka birçok kavramla ilişkilendirilse de henüz fikir birliği sağlanamamıştır.

Örneğin yalın üretim, çevik üretimin öncülü gibi görülmüştür. Bazı çalışmalar (Christopher, 2000: 39), yalın ve çevik felsefe arasındaki farklara odaklanırken bazı çalışmalar (Naylor vd., 1999: 117) bu paradigmaların geliştirildikçe bir ilerleme ve ayrı ayrı görme eğiliminin oluştuğunu, buna karşılık bu tarz kavramların bütünleştirici bir bakış açısıyla ayrı ayrı düşünülmemesi gerektiğini savunmuştur. Naylor vd.'ne göre (1999), hiçbir paradigma diğerinden daha iyi ya da daha kötü değildir; aslında doğru tedarik zinciri stratejisi içinde tamamlayıcıdır. Dolayısıyla üreticilerin operasyonlara tedarik zincirinin geri kalanından ayrı olarak bakmamaları gerekmektedir. Doksanlı yılların sonundan itibaren tedarik zinciri performansını iyileştirmek için teknoloji ve beyin gücü kullanımı önem arz etmeye başlamış, üreticiler tedarik zincirinin tüm aşamalarında müşteri taleplerine yönelik hareket edilmesini sağlamak amacıyla esnek üretim, elektronik veri değişimi, otomatik depolama ve hızlı lojistik gibi çevikleştirici hamlelerde bulunmaya başlamıştır (Fisher, 1997: 106). Değişimin hız kazandığı bu dönemde sadece iç üretim süreçlerinin değil, aynı zamanda dış lojistik altyapısının da değişmesi gerekmiş; stratejik olarak uyumlu firmalardan oluşan ağlar, rekabet eden birimler olarak bireysel firmaların yerini almıştır (Vastag, vd., 1994: 73). Benzer bir bakış açısıyla Sriram ve diğerleri (1992: 303) alıcıları tedarikçileriyle yakın ve iş birliğine dayalı bağlar kurmaya motive eden faktörleri araştırmış; bu araştırma o dönem için tedarik zinciri aktörleri arasındaki bağımlılıkların pozitif ve negatif yönlerinin teorik bir perspektifle açıklanmasının gerekliliğini gösteren çalışmalardan biri olmuştur.

2.2.3. Endüstri 4.0'a Kadar Yaşanan Duraksama Dönemi (2002-2010)

Doksanlı yıllar çevik üretim için bir çerçeve oluşturulmaya ve ilişkide olduğu aktörlerin tanımlanmaya çalışıldığı bir dönem olarak görülebilir. Üretim sistemi, tasarım, lojistik, müşteri talebi, teknoloji kullanımı gibi kavramlar ve bunların bütüncül ilişkileri hem teorik hem pratik yönden araştırılsa da çevik üretimin çevreci ve sürdürülebilir bir tutumla değerlendirildiği örneklerle bu dönemde henüz rastlanmamıştır. Bu tutum 2000'li yılların ortalarından itibaren değerlendirilmeye başlamış ve iklim krizinin etkileri gözle görünür hale geldikçe literatürde kendine daha fazla yer bulmuştur.

2000'li yılların ortalarından itibaren, çeviklik kavramının literatürde yeniden yükselişe geçtiği söylenebilir. Daha bütüncül bakış açıları geliştirilmeye başlanmış, teknoloji ve internetin etkileri belirginleşmiştir. Stevenson ve Spring (2007: 685) giderek artan literatürün, tedarik zinciri yönetimi çağında esnek fabrikanın ötesine geçerek esnek tedarik zincirine bakmanın önemli olduğunu kabul etmeye başladığını belirtmiştir. Dolayısıyla çalışmalar tedarik zincirinin esnekliği, buna engel olan etmenler ve bunların çevikliğe olan etkileri üzerine

yoğunlaşmıştır. Lee (2004: 1) uyum, uyarlanabilirlik ve çevikliğin tedarik zinciri risklerini yönetmek için temel bileşenler olduğunu ifade etmiştir. Lin ve diğerleri (2006a: 285) ile Braunscheidel ve Suresh (2009: 119) de benzer şekilde, uyum göstermenin öneminden bahsetmiş; firmaların, operasyonlarını kolaylaştırmak amacıyla tedarikçiler, müşteriler, pazardaki değişiklikler ve potansiyel ve fiili aksaklıklarla uyum sağlamaları; bireysel şirketlerin ötesinde bir çeviklik düzeyine ulaşmak için ilgili aktörlerle birlikte çalışmaları gerektiğini belirtmiştir. Bahsedilen uyum firmanın sahip olduğu yeteneklerin, özellikle de bilgi teknolojileri, insanlar, iş süreçleri, tesisler ve tedarik zinciri entegrasyonunun bir fonksiyonudur (Lin vd. 2006b: 353; Swafford vd., 2008: 288). Çevikliği artıracak entegrasyonun ne kadar önemli olduğu çeşitli araştırmacılarca ortaya konulurken, bu çevikliğin ve entegrasyonun ne ölçüde olması gerektiğine dair çalışmalar da yapılmaya başlanmıştır. Örneğin esneklik ve çeviklik kavramlarını eş anlamlı kullanan Tang ve Tomlin (2008: 12) firma esnekliğinin, yani çevikliğinin, tedarik zinciri esnekliğini açık bir şekilde artırdığını belirtirken, tedarik zinciri risklerini azaltmak için ne kadar esnekliğe ihtiyaç duyulduğunun hala belirsizliğini koruduğunu söylemektedir. Bu nedenle farklı esneklik düzeyleriyle ilişkili faydalar net bir şekilde ifade edilmediğinde firmalar, özellikle güvenilir veri, doğru maliyet ve fayda analizi elde etmenin zor olduğu durumlarda, esnekliğe yatırım yapma konusunda isteksiz davranabilmektedir. Geleneksel değerlendirme yaklaşımları kötü tanımlanmış ve belirsiz göstergeleri nedeniyle, çok yönlü ve karmaşık çeviklik değerlendirmelerinde uygulanabilir öneriler sunamamıştır (Lin vd., 2006b: 353). Bu nedenle literatür taraması tablosunda da görülebileceği üzere çeviklik değerlendirmesinde hem nicel hem de nitel araştırma kapsamında oldukça fazla yöntem denenmiştir.

Doksanlı yıllarda olduğu gibi yalın ve çevik üretim değerlendirmeleri 2000’li yıllarda da devam etmiştir. Örneğin, Hallgren ve Olhager (2009: 976) yine yalın üretim ve çevik üretim farklılıklarından bahsetmiş, kıyaslamalarında yeni bir boyut öne sürmüş, maliyet liderliği stratejisinin her iki üretim biçiminin itici güçleri ve sonuçları üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Narasimhan vd. (2006: 440) de yalın ve çevik üretim farklılıklarına odaklanmış ancak bu farklılıkları üretim paradigmaları ve performans yetenekleri perspektiflerinden değerlendirmiştir. Literatür taraması tablosundan görüldüğü üzere ilerleyen yıllarda da bu gibi üretim sistemi türlerinin farkları ve benzerliklerine odaklanılmaya devam edilmiş, kimi çalışmalarda ayrıştırıcı kimi çalışmalarda ise bütünleştirici değerlendirmeler yapılmıştır.

2000’li yıllarda üretilen yayınlara genel olarak bakıldığında tüm bu çalışmalarda yer yer bahsedildiği gibi, çevik üretimin analizi ve başarısı için; otomasyon, bilgi teknolojileri, esnek üretim sistemleri, eşzamanlı mühendislik, toplam kalite yönetimi, stratejik ve iş birliğine dayalı

dış kaynak kullanımı, zamana dayalı rekabet, iş sürecinin yeniden yapılandırılması, kıyaslama, kitlesel kişiselleştirme gibi birçok faktörün düşünülmesi gerekmektedir (Vázquez-Bustelo vd. 2007: 1304). Yani çevik üretimin içerisinde birçok olguyu barındıran bütünleşik bir yapıya sahip olduğu bu dönemde kabul görmüştür.

2.2.4. 2011'den Pandemiye Kadar Yaşanan Sakin Yükseliş (2011-2019)

2010'lu yıllar üretim yönetimi literatüründeki dönüm noktası olaylardan biri olan 4. Endüstri Devrimi yani Endüstri 4.0'ın etkileriyle şekillenmiştir. Ayrıca bu yıllarda ve sonrasında çeviklik ile bağlantılı ölçüm ve değerlendirmelere yönelik çeşitli matematiksel modellemeler, bulanık yaklaşımlar ve vaka analizlerinin artış gösterdiği görülmüştür. Örneğin, Aravind Raj vd. (2013: 5971) bireysel çevik etkinleştiriciler, kriterler ve nitelikler arasındaki bağımlılıkları değerlendirmek için bir model geliştirmenin oldukça yararlı olduğunu savunmuştur. Mishra vd. (2014: 1084) bir kuruluşun genel çeviklik derecesinin tahmini sırasında karar vericilerin risk alma tutumlarını değerlendirirken dilsel yargılara hassasiyet gösterilebilmesi adına bulanık yöntemi tercih ettiklerini belirtmiştir. Benzer şekilde Singh Patel vd. de (2017: 212) bir tedarik zincirinde çevikliği değerlendirirken kesinsizlik ve belirsizlik gibi dezavantajların üstesinden gelmek için bulanık mantık kullanmıştır. Analizler için farklı yöntemler denenirken, Kumar vd. (2016: 713) araştırma kapsamını büyük çaplı firmaları analiz eden çoğu çalışmadan farklı olarak KOBİ'lere yönlendirmiş, literatürde çevik üretim-KOBİ etkileşimi hakkında yeterli çalışmanın mevcut olmamasından dolayı gelişmekte olan ülkelerde çevik üretimin uygulanmasında hala geride kalındığını göstermiştir.

Endüstri 4.0 etmenlerinin ve dolayısıyla dijital dönüşümün de çevik üretim değerlendirmelerinde kendisine yer bulduğu gözlemlenmiştir. Örneğin, Akter ve diğerleri (2016: 125), firma performansını iyileştirmek adına büyük veri analizinden yararlanarak kurumsal çeviklik ve iş süreçleri çevikliğinin değerlendirilmesine katkıda bulunmuştur. Öte yandan Warner ve Wäger (2019: 326) dijital dönüşümü; AI, bulut, blok zinciri ve IoT teknolojileri gibi yeni dijital teknolojilerin, müşteri deneyimini artırmak, operasyonları kolaylaştırmak ve yeni iş modelleri oluşturmak için iş iyileştirmeleri sağlamak üzere kullanılan bütüncül bir çaba olarak tanımlarken bu kavramın kullanımında bir tutarsızlık tespit etmiştir. Yapılan saha çalışmasında sektör liderlerinin çeşitli strateji oluşturma ve organizasyon faaliyetlerini tanımlamak için tutarsız bir şekilde "dijital dönüşüm" terimini kullandığı görülmüştür. Örneğin, dijital dönüşümün somut örnekleri olarak liderlerin hızlı prototipleme denemeleri yapmak, operasyonları bulut bilişime taşımak veya sadece bir dijital pazarlama ekibi kurmak gibi stratejik faaliyetlerden yararlandıkları gözlemlenmiştir. Bu durum, bu

konuyla ilgili stratejik düşünme, planlama ve eylemlerde genel bir uyumsuzluk ve yanlış kanı olduğunu göstermektedir (Warner ve Wäger, 2019: 344). Çünkü burada bahsedilen faaliyetleri dijital dönüşüm olarak adlandırmak için bütüncül bir bakış açısına sahip olunması gereklidir. Ancak buradaki çabaların yalnızca dijitalleşme adımları olduğu söylenebilir.

2010'lu yılların ortalarına doğru Endüstri 4.0 etkilerinin çeviklikte ses getireceği varsayımı üzerine literatür taraması gerçekleştirilirken, bu yıllarda yayın sayılarında bir düşüş tespit edilmiş ve belki de bu devrimin çevik üretim alanını negatif yönde etkilemiş olabileceği düşünülmüştür. Örneğin Lu ve Ramamurthy (2011: 949) çeviklik gerekliliklerinden biri olan bilgi teknolojileri hakkında çelişkili sonuçlara ulaşmıştır. Bilgi teknolojilerine daha fazla harcama yapılmasının, daha fazla çevikliğe yol açmadığı, ancak bilgi teknolojileri yeteneklerinin geliştirilmesinin daha fazla çevikliğe yol açtığı tespit edilmiştir. Bilgi teknolojileri yeteneklerinin geliştirilmesinin de bilgi teknolojilerine yapılan harcamayı gerektirdiği düşünülürse ortaya bir paradoks çıkmaktadır. Dolayısıyla çevikliğin çelişkileri ve dinamikleri hakkında daha bütünsel ve kapsamlı bir anlayış oluşturmak için daha fazla araştırma yapılması ve teori geliştirilmesi gerekmektedir.

Covid-19 salgını, dışsal bir şokun mümkün kıldığı doğal bir deney ortamı yaratmıştır (Bendoly vd., 2023: 1). Covid-19 ile ABD-Çin ticaret savaşı, üretim ve operasyon yönetimi araştırmalarında malzeme, bilgi ve finansal akışların önemini ortaya koymuştur. Bu akışlar az gelişmiş örgütsel ortamlarda özellikle performans dikkate alındığında firmalara ciddi zararlar verebilmektedir (Prause ve Atari, 2017: 428). Buna önlem olarak Endüstri 4.0 çağında operasyonel verimlilik, esneklik ve sürdürülebilirlik elde etmek için firmaların inşa etmesi veya güçlendirmesi gereken yetenekler bulunmaktadır. Zhang ve arkadaşları (2020a: 2219), bu yetenekleri bağlanabilirlik, netlik ve süreklilik olarak üç başlıkta toplamıştır. Bu tip yaklaşımlar sürecin bütünleşik olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir. Dolayısıyla, bütün alanlardaki araştırmacılar için bir dönüm noktası niteliğinde olan Covid-19 salgını, dijitalleşme ve çeviklik kavramı ile ilgili çalışmalarda da oldukça çarpıcı bir artışa neden olmuştur. Bu artış kimi çalışmalarda doğrudan Covid-19 bağlantılı yayınlar olarak görünse de kimi çalışmalarda dolaylı bir sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır. Öte yandan aksinin iddia edildiği birçok çalışma olmasına rağmen (Khin ve Ho, 2019: 177; Queiroz vd., 2019: 1763; Ageron vd., 2020: 133) dijital kabiliyetin operasyonel faaliyetlerle anlamlı bir ilişkisinin bulunmadığı çalışmalar da tespit edilmiştir (Ruel vd., 2023: 9). Firmaların Covid-19 süresince dijital kabiliyetlerini operasyonel performansı önemli ölçüde etkileyecek kadar geliştirecek zamanlarının olmaması bu durumun nedeni olarak gösterilebilmektedir. Literatürle kıyaslandığında beklenmedik bir sonuç olan bu durum firmalar için pandeminin ardından dijitalleşmeye bağlılık olarak devam

etmiştir. Ancak dijital kabiliyetin, yani bir kuruluşun dijital araçlar sayesinde operasyonel performansını artırma kabiliyetinin etkileri, Covid-19 tedarik belirsizliğinin benzeri görülmemiş bir düzeyde olması nedeniyle gerçekleşmemiştir. Bu durum firmaların dijitalleşme süreçlerinde bireysel olarak geldikleri noktaların iyi bir seviyede olsalarda yeterli olmamasıyla açıklanabilir. Dijitalleşme, çözüm sağlayıcıların iş modellerini dönüştürmekte, ekosistemler içinde örgütsel sınırlar boyunca dijital çözümler geliştirirken firma sınırı kararlarını şekillendirmektedir. Dolayısıyla, dijitalleşme yalnızca firmaların bireysel iş modellerini etkilemekle kalmaz, aynı zamanda ekosistemdeki diğer firmaların iş modellerinin de uyumlaştırılmasını gerektirir. Bu nedenle, dijitalleşen iş modellerine ekosistem perspektifinden bakılmalıdır (Kohtamäki vd., 2019: 380).

2.2.5. 2020 Covid-19 Pandemisi ve Sonrası

Yıllara göre yayın sayıları tablosundan görülebileceği üzere son 10 yıllık dönemdeki yayınların büyük çoğunluğu 2020 yılı sonrasında aittir. Yaşanan bu sağlık krizinin ardından firmalar çeviklik ihtiyacı ile bir rekabet gereksinimi olarak değil hayati bir özellik olarak yüzleşmiştir. Pek çok kuruluşun aksini iddia eden söylemleri olsa da Covid-19 salgınına hazır olmadıkları ve yeterince hızlı tepki veremedikleri görülmüştür (Worley ve Jules, 2020: 279). Modern insanın aşına olmadığı bu olaylar, dolayısıyla araştırmalarda genel bir artışın yaşanmasına neden olmuştur. Öte yandan iklim krizinin etkileri gözle görünür hale gelmiş, artık sadece kaynak temini sorunu olmaktan çıkmış, hayatlarımızı değiştiren bir boyuta ulaşmıştır. Üretim yönetimi de diğer tüm alanlar gibi bu durumdan da farklı şekillerde etkilenmiştir. Firmalarda sürdürülebilir ve çevreci üretim süreçlerine verilen önem artmış, farklı üretim biçimleri entegre edilerek daha yeşil bir sistem kurulması amaçlanmıştır. Bütün bu gelişmeler göz önünde bulundurulduğunda, firmalar için, özellikle geleneksel yöntemlerle çalışmaya devam edenler için, uyum sağlaması zor değişimlerin yaşandığı söylenebilir. Son yıllarda yaşanan bu krizlerin, zaten gerçekleşmesi beklenen dönüşümlerin beklenenden hızlı bir şekilde gerçekleşmesine neden olduğu düşünülebilir.

Yukarıda bahsedilen büyük değişimler sonrasında 2020’li yılların başlangıcında üretim yönetimi ve çevik üretim literatüründe yeni adımlar atılmaya başlanmıştır. Davranışsal operasyon yönetimi adıyla anılan bu yeni alt disiplin, üretim yönetiminin teknik, insan faktörünü merkeze almayan ve yönetim kuramlarından uzak araştırmalarının arasında yeni bir perspektif olarak yer almaktadır. Bu alandaki çalışmalarda teknik olgular, kuramsal ya da davranışsal kavramlarla açıklanmaya çalışılmıştır. Örneğin, Perera ve diğerleri (2020: 997) tedarik zincirinin esnekliğini ve başarısını, etkili envanter ve sipariş kararlarına bağlarken, karar

vericilerin nicel modeller tarafından öngörülen optimal sipariş davranışından sıklıkla saptığını tespit etmiştir. Bu nedenle bu tür olgularda davranışsal deneyler kullanarak daha derinlikli değerlendirmelerin yapılması ve davranışsal operasyon yönetimi alanının insan davranışını nicel sonuçlara ekleyen tutumundan daha fazla faydalanılması gerektiğini belirtmiştir. Bir başka örnek olan Qamar ve diğerleri (2021: 1) ise yalın ve çevik rutinlerde firmaların iç yapılarının bağlamsal faktörlerle olan uyumunu ve tedarik zincirinde faaliyet gösterdikleri kademenin buna etkisini durumsallık teorisi çerçevesinde değerlendirmiştir. Vasanthan ve Suresh (2022: 1465) firmaların strateji geliştirirken faydalanabilecekleri, dinamik yetenekler teorisi ve kurumsal çevikliğin kombinasyonunu sunan bir çerçeve önermiştir. Nurhayati ve diğerleri (2023: 19) ise kaynaklara erişim konusunda tedarikçiler ve üreticiler arasında ortak karar alma mekanizmasının itici güçlerini açıklayabilmek için kaynak bağımlılığı teorisinden faydalanmıştır. Bu gibi geleneksel üretim yönetimi anlayışından farklı çalışmaların sayısı hiç şüphesiz ki değerleri değişen küresel yapıyla beraber artış gösterecektir.

Geçmiş yıllarda olduğu gibi farklı üretim yönetimi sistemleriyle çevik üretimin bu yıllarda da birbirlerine temas ettiği görülmüştür. Örneğin Qamar vd., (2020: 723) günümüz rekabet ortamında hayatta kalabilmek için üretim sistemlerinin hem yüksek düzeyde esnekliğe hem de kaliteye sahip olması gerektiğini vurgulamış, bu iki olgu arasındaki ilişkileri ve farklılıkları incelemiştir. Sonuç olarak, firmaların esnekliği çevik üretim uygulamalarından sağladığı, kaliteyi ise yalın üretim uygulamalarından sağladığı ve bunun tersinin mümkün olmadığı ileri sürülmüş; yalın ve çevik yaklaşımlar birbirlerinden farklı sonuçlara neden olsalar da entegrasyonlarının yaratılan faydayı yükselttiği belirtilmiştir. Benzer bir şekilde, yalın üretim ile aynı kökenden gelen Toyota Yönetimi'nin de bünyesinde barındırdığı hız ve esneklik özellikleri sayesinde çevik üretim üzerinde olumlu etkilere sahip olduğu; ancak tek başına hiçbir Toyota Yönetimi etmeninin bütün sistemin çevikliğini iyileştiremeyeceği bulunmuştur (Vanichchinchai, 2022: 1450). Ancak bu durum elbette bu iki sistemin birbirini dışlayan yapılar olduğu anlamına gelmemektedir. He ve diğerleri ise (2022: 688) çeviklik ve yalınlık kıyaslamasına başka bir yön sunarak, firmaların yalın ve çevik üretimi uygulamak amacıyla geliştirdikleri çeşitli projeleri gerçekleştirirken dış çevreden, yani düzenli olmayan kıt kaynaklardan giderek daha fazla tükettiklerini tespit etmiştir. Bu nedenle bu üretim sistemlerinin kendilerinden ziyade hayata geçirilmeleri sırasında gerçekleştirilen projelerdeki kıt kaynakların kullanımının ve kapasitelerinin etkili bir şekilde planlanması proje organizasyonları için kritik bir sorun haline gelmiştir. Hariyani ve diğerleri (2023: 2705) ise kaynak kıtlığını ve sürekli değişen talebi yönetebilmek için devletler ve üreticilere entegre sürdürülebilir-yeşil-yalın-altı sigma-çevik üretim sistemini (ISGLSAMS) önermiştir. Ancak bu

derece kapsamlı bir entegre sistemin uygulanabilirliği çeşitli engeller nedeniyle başarısız olabilmektedir. Düşük tedarikçi taahhüdü, belirsiz finansal faydalar, yüksek maliyet yanılması, yaşam döngüsü boyunca sistem performansının değerlendirilmesindeki zorluk, ISGLSAMS süreç tasarımı ve yönetiminde karmaşıklık, güncel bilgi eksikliği, ürün tasarımıdaki belirsizlik ve gelecekteki belirsiz mevzuat, ISGLSAMS'ın önündeki en büyük engeller olarak belirlenmiştir. Liderlik eksikliği, üst yönetimin bağlılığının düşük olması, hükümet desteğinin olmaması, organizasyon yapısı, çalışanların düşük bağlılığı, teknolojik risk ve kamuoyu baskısının düşük olması ISGLSAMS için görece küçük engeller olarak değerlendirilmektedir (Hariyani vd., 2023: 2705). Bu engellerin üstesinden gelinecek çözüm yollarının keşfedilmesi; müşteri talepleri ve değişen pazar koşullarına uyum konusunda firmalara hızlı yanıt verme özelliği kazandıracak ve firmaların bu özelliği çevreci bir tutumla hayata geçirmelerine olanak tanyacaktır. Benzer bir şekilde çeviklik ve sürdürülebilirliği birbirini tamamlayıcısı olarak ele alan Geyi ve diğerlerinin (2020: 1) çalışmasında, sürdürülebilirlik kampanyalarının sonuçlarını en üst düzeye çıkarmak isteyen yöneticilerin, sürdürülebilirlik uygulamaları ile çevik uygulamaları eş zamanlı olarak uygulaması önerilmektedir.

Endüstri 4.0 uygulamalarının belirli bir olgunluğa eriştiğinin varsayıldığı 2020'lerin başlangıcında, bu olgunluğun çevik üretim üzerindeki etkilerini gösteren çalışmalar mevcuttur. Örneğin, Mukherjee ve diğerleri (2021: 46), Endüstri 4.0 uygulamalarının gelişmesiyle öne çıkan blokzincir teknolojisinin tedarik zincirlerini uzun vadede çevik, esnek ve duyarlı hale getirdiğini ve üretim süreçlerini iyileştirdiğini belirtmiştir. Blok zinciri aynı zamanda günümüz dünyasında yaşanan iklim krizine bir çözüm önerisi olarak sürdürülebilirlik boyutunu da eklemektedir. Blok zinciri teknolojisiyle verilerin merkezi olmayan yapısı ve ağın her katılımcısı için herhangi bir zamanda veri setine daha iyi erişilebilirlik sağlaması, gereksiz hareketliliğin ve stoklamanın önlenmesi başta olmak üzere birçok alanda israftan kaçınılmasını sağlamış, çevreci bir fayda yaratmıştır (Mukherjee vd., 2021: 47). Endüstri 4.0'ın yapıtaşlarından biri olan IoT ile gelişmesinde etkili olduğu dijital ikiz uygulaması da çevik üretim ve çevik tedarik zinciri ortamlarında teslim sürelerini azaltma konusunda doğrudan etki sahibi olmaktadır (Abideen vd., 2021: 1). Böylece karar mekanizmalarına destek olan bu yaklaşımlara ek olarak üretim ve lojistik sistemlerinde makine öğrenimi sayesinde yalın-akıllı-çevik üretim kombinasyonları oluşturulmaya başlanmıştır. Bahsedilen dijital dönüşüm ve bunun sonucunda ortaya çıkan yeni iş modeli, geleneksel firmalar üzerinde büyük bir baskı yaratmış; tüketicilerin beklentileri ve davranışlarında temelden değişimler yaratmış ve bunun sonucunda çok sayıda pazarda aksamalar yaşanmıştır (Verhoef vd., 2021: 889). Endüstri 4.0 ve çeviklik üzerine yapılan değerlendirmelerin çoğunda, Endüstri 4.0 ile artan dijital dönüşümün

çeviklik üzerinde olumlu etki yarattığı, bu akıma ayak uyduramayanların ise hayatta kalma sorunları yaşadığı belirtilmiştir. Ancak de Oliveira-Dias ve diğerleri (2023: 1), literatürün genel kanısının aksine Endüstri 4.0 temel teknolojilerinin tedarik zincirlerini daha yalın hale getirirken, çevik tedarik zinciri uygulamaları üzerinde önemli bir doğrudan etkisinin bulunmadığını saptamıştır. Bahsedilen çalışmaya göre bu teknolojiler yalın ve çevik tedarik zinciri stratejileri üzerinde aynı etkilere sahip değildir. Ancak bu farklılığa rağmen bu iki yaklaşımın birbirinden bağımsız olmadığı ve operasyonel performansı farklı koşullar altında etkileyebileceği belirtilmiştir.

Küreselleşme ve yüksek rekabet gücü ile, giderek daha talepkar olan müşterilere tatmin edici bir şekilde yanıt vermek için teknolojik çözümleri benimsemek kuruluşların varlıklarını sürdürebilmeleri için kaçınılmaz hale gelmiştir. Toplum giderek daha değişken bir yapıya bürünmüş, bu yapıya doğru ve hızlı karşılık verebilecek çevik üretim süreçleri oluşturmak zorunluluk arz etmiştir (Yumina ve Ramos, 2022: 176). Endüstri 4.0 firmaları daha esnek daha çevik ve daha çevreci olabilmeleri konusunda özellikle teknolojik olarak desteklemektedir. Ancak her tedarik zincirindeki her firma aynı ölçüde dijitalleşmemiş olabilir. Bu noktada tedarik zinciri aktörleri arasında algılanan dijital yetenekte asimetri olabilmekte, bu durum tedarikçinin dijital olarak daha yetenekli alıcıya olan bağımlılığını artırabilmekte ve bunun sonucunda alıcı fırsatçılığına daha fazla maruz kalındığı görülmektedir. Bu nedenle bir firmanın çevikliği aslında sadece kendisiyle alakalı değil, tedarik zincirinin dijitalleşme dereceleriyle de alakalıdır. Endüstri 4.0'ı etkinleştiren teknolojilerin uygulanması, tedarik zinciri boyunca bilgi paylaşımı ve şeffaflığını artıracak, kapsamlı entegrasyon sağlayacak, tedarik zinciri yönetimine yönelik bütünsel bir yaklaşımla önemli performans iyileştirmeleri getirecektir. Ayrıca bu teknolojiler, süreç entegrasyonu, dijitalleştirme ve otomasyon sağlayarak ve yeni analitik yetenekler getirerek tedarik, üretim, envanter yönetimi ve perakendecilik gibi bireysel tedarik zinciri süreçlerinde büyük performans iyileştirmelerine olanak sağlayacaktır (Fatorachian ve Kazemi, 2021: 63).

Gelecekte, şeffaf ve küresel tedarik zincirleri sağlamak için gerekli olan uygun altyapı ve teknik araçlara olan ihtiyaç daha da artacaktır. Sürdürülebilir bir gelecek için Endüstri 4.0 teknolojilerinin benimsenmesi, tedarik zinciri iş birliği ve ortak sorumluluk gibi çeşitli stratejiler belirlenmelidir (Sharma vd., 2020: 1). Ek olarak, proaktif ve dinamik tedarik planlamasındaki belirsizlikleri ve risk faktörlerini dikkate alan tahmine dayalı modellerin geliştirilmesi gerekecektir. Bu tahmine dayalı modeller, kurumsal karar vericilerin çeşitli senaryoların olası analizlerini üstlenmesine ve verimliliği artırmak için otomasyon ile AI'ın entegre edilip edilmeyeceğine karar vermesine yardımcı olacaktır (Liu vd., 2020: 259). Ayrıca

hükümetler ve endüstriler başta olmak üzere tüm aktörler arasında daha fazla iş birliğine ihtiyaç duyulacaktır. Öte yandan Toplum 5.0 veya Endüstri 5.0 kavramlarının ön plana çıkmaya başlaması; firmalar ve toplum için daha esnek yapılara elverişli ve daha çevreci seçenekler sunması da endüstriyel aktörler arasındaki ilişkilerde köklü değişiklikler yaşanmasına neden olacaktır. Endüstri 4.0 teknoloji odaklı olarak kabul edilirken, Endüstri 5.0 değer odaklı olarak algılanmaktadır (Narkhede vd., 2024). Ancak ilgili literatürün çoğunun Endüstri 5.0 yerine ağırlıklı olarak Endüstri 4.0'a odaklandığı; bu durumun, operasyon yönetimi ve tedarik zinciri ile ilgili insan, sürdürülebilirlik ve örgütsel esneklik gibi konuların daha derinlemesine analiz edilmesi için bir ampirik ve teorik bir fırsat teşkil ettiği görülmektedir (Garrido vd., 2024: 1).

Bu bölümde “Çevik Üretim” kavramının Sürdürülebilirlik ve Endüstri 4.0 kavramlarının etkisi göz önünde bulundurulmak üzere literatürde nasıl bir değişim ve dönüşüm yaşadığı ifade edilmeye çalışılmıştır. Önceki bölümde her biri ayrı ayrı irdelenen bu kavramların pratikte nasıl bir ilişki içinde olduklarını görebilmek adına bir uygulama alanı bulmak amacıyla 2020’lerin güncel konuları üzerine odaklanılmıştır. Son yıllarda, özellikle Rusya-Ukrayna savaşıyla dünya gündeminde bambaşka bir boyut kazanan İDA sektörü hem çevik olma ihtiyacı hem teknoloji odaklılığı hem de çevreci hedefleriyle bu araştırma kapsamında değerlendirilmek üzere belirlenmiştir. Henüz denizcilik ve gemi inşa gibi doğrudan ilgi alanı olan disiplinlerde bile olgunlaşmamış bir literatüre sahip olan İDA, işletme literatüründe de oldukça sınırlı düzeyde ele alınmıştır. Literatürdeki bu boşluktan hareketle ve İDA konusunun gelecekte daha da önem kazanacağı öngörüsüyle bu çalışmanın ampirik uygulamasında İDA sektörü dikkate alınmıştır. Sonraki bölümde bu çok yeni sektörün özellikleri hakkında genel bir bilgilendirme yapılacaktır.

2.3. İnsansız Deniz Aracı

Teknolojik yenilikler, hayatın bütün alanlarında farklı şekillerde yer almakta; geleneksel sistemlerin günümüze uyarlanması temel gereklilik olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durum denizcilik sektörü özelinde incelendiğinde, bahsedilen yeniliklerin otonom gemilerin kullanımına tanıklık etmemizi sağlayan hızlı gelişmelere yol açtığı görülmektedir.

Otonom gemi çalışmaları 2017 yılında Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) üyelerinin önerisiyle Deniz Güvenliği Komitesi tarafından gündeme alınmıştır (ASELSAN, 2023). Bu kapsamda otonom platformlarla ilgili çalışmalar artış göstermiş; gelişmiş radar ve sonar sistemleri, sensör teknolojileri, analiz ve karar destek yazılımları ile farklı seviyelerde otonom uygulamalar gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Dünyada uzaktan kontrol ve navigasyon

fonksiyonlarına sahip ilk İDA 2023 yılında Çin tarafından denize indirilmiştir (Global Times, 2023).

Sektörel gelişimi bu şekilde başlayan İDA'ların literatürde konu olduğu çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda çoğu araştırmanın son yıllarda gerçekleştirildiği görülmektedir. Çoğu çalışmada İDA uygulamalarının navigasyon kontrolü ve güvenlik gibi bileşenlerine odaklanıldığı; bazı insan odaklı ve örgütsel konular başta olmak üzere ulaşım ve lojistik gibi potansiyel alanların yeterince araştırılmadığı görülmüştür (Wróbel vd., 2020: 1; Gu vd., 2021: 1706). Bu durum, İDA konusunun farklı disiplinlerce geliştirilmeye açık bir alan olduğunu göstermektedir. Disiplinler arası gelişimi incelendiğinde literatürde İDA'ların teknolojik özelliklerine göre farklı isimlerle anılabildiği tespit edilmiştir. Deniz Otonom Suüstü Gemileri, İnsansız Gemiler ve Otonom Deniz Araçları gibi isimlerle anılan İDA'lar gelişen teknolojiyle birlikte birçok alanda kendine yer bulmaya başlamıştır (Li ve Fung, 2019: 330; Ramos vd., 2020: 1; Chang vd., 2021: 1; Fan vd., 2022: 1; Chen vd., 2023: 1). Endüstri 4.0'ın da katkısıyla denizcilik endüstrisinin dijitalleşmesi İDA'ların başta gemi inşa ve denizcilik sektörü uzmanları olmak üzere araştırmacılar, politikacılar ve askeri kurumlar gibi birçok aktörün ilgi alanına girmesini sağlamıştır. Özellikle Rusya – Ukrayna savaşında Ukrayna'nın Rusya donanmasına İDA'lar ile karşılık vermesi, tüm dünyanın adeta oyun değiştiren yeni bir kavram olarak İDA'lardan bahsetmeye başlamasına neden olmuştur. İDA'ların geleneksel donanmaya göre daha ucuz ve basit çalışma prensiplerine sahipken, etkilerinin de bir o kadar yüksek olması ve stratejik konuşlanmalarda önem taşıması gördüğü ilginin nedeni olarak gösterilebilir. Yüzyıllardan beri süregelen deniz savaşları boyunca edinilen deneyimlerle oluşturulan savaş prensiplerinin çoğunu bünyesinde barındıran İDA'lar, kendisine karşı geliştirilebilecek önlemler, ondan daha basit ve ucuz olmadığı sürece önemini korumaya devam edecektir (Fırat, 2024: 10).

İDA artık birçok türü ile birçok farklı alanda kullanımı söz konusu olan bir teknolojidir. Askeri uygulamalar temel kullanım alanını oluşturmakta; liman devriyesi, mayın temizleme, keşif, terörle mücadele süreçleri ve ateş desteği bu kapsamda öne çıkan faaliyetler arasında yer almaktadır (Chen vd., 2023: 2). Her ne kadar askeri uygulamalarla önemi ortaya çıksa da İDA, birçok farklı sivil alanda kullanılabilme potansiyeline sahiptir. İnsansız gemilerin sivil uygulamaları arasında lojistik ve kargo taşıma, deniz çevresinin izlenmesi, deniz arama ve kurtarma, balıkçılık ve balıkçılık idaresi denetimi gibi uygulamalar yer almaktadır (Li ve Fung, 2019: 330). Ayrıca İDA'lar sürdürülebilirlik ve ekolojik denge için oldukça önemli olan baraj gölleri, yapay göletler gibi su rezervuarlarının kalitelerinin izlenmesinde de kullanılmaktadır (Zhang vd., 2020b: 353). Suyun içme, sulama, enerji üretimi, ekosistem sağlığı ve rekreasyon

gibi amaçlara uygunluğunu belirleyen bu ölçümler, sulama ve enerji üretim verimliliğini de doğrudan etkilemekte ve su kaynaklarının uzun vadeli korunması için sürekli izleme ve değerlendirme imkânı sunmaktadır.

İDA kullanımının ana avantajı, gemi mürettebatı sayısının azaltılması veya gemi mürettebatının tamamen ortadan kaldırılması olarak nitelendirilmekte olup, bu sayede insan hatalarının en aza indirilmesiyle işletme maliyetlerinin azaltılmasıdır (Chen vd., 2023: 1). Mürettebat durumunda yaşanan bu değişim, çalışanların yorgunluğunu ve iş yükünü azaltmaya katkı sağlayarak seyir güvenliğini artırabilmektedir (Li ve Fung, 2019: 330). Ayrıca İDA'nın geleneksel gemilerden farklı olarak tasarımları ve çalışma prensipleri sayesinde zararlı egzoz emisyonunu azaltması denizciliği daha güvenli ve sürdürülebilir hale getirebilmektedir (Li ve Fung, 2019: 330). Öte yandan deniz kazalarının en az kayıpla atlatılması açısından da İDA kullanımı önemli yararlar sağlamaktadır. Özellikle çarpışmaların önlenmesi denizde seyir güvenliği açısından kritik önem taşımaktadır. İDA öncesi araştırmalarda, çarpışmalardan ve kazalardan kaçınmanın merkezinde insan olduğu için, operatörlerin durumsal farkındalığının artırılmasına yönelik seyir destek sistemleri geliştirilmesi hedeflenirken; İDA ile sorunların makineler tarafından çözülebilmesi, kullanılan sistemlerin otonom hale gelmesini sağlamıştır (Huang vd., 2020: 451).

Denizcilik sektöründe giderek artan bir ilgiye sahip olan İDA'lar, insan hatalarını azaltma ve genel güvenlik seviyesini önemli ölçüde artırma konusundaki beklentilere rağmen şüphesiz yeni riskleri de beraberinde getirecektir (Chang vd., 2021: 1). Özellikle olası bir kazada, insanların can güvenliğini, gemideki yükün ve geminin kendisinin güvenliğini sağlamak için uluslararası hukuki bir düzenlemenin eksikliği mevcut durumdaki en önemli dezavantajlardan biridir. Bu konu hem ulusal hem de uluslararası arenada önem taşımaktadır. İDA'ların mevcut düzenlemeler altında yer alan "gemi" tanımına girip girmediğinin net olmadığı; bu durumun uygulamada önemli boşluklara ve muhtemel suçların mevcut hukuki düzenle doğru bir şekilde soruşturulamamasına neden olabileceği belirtilmektedir (McKenzie, 2020: 17; Çorum, 2025: 150). Dolayısıyla İDA'ların getirdiği yenilikler, can güvenliği başta olmak üzere taşınan yük ve geminin kendisinin de güvenliğinin sağlanabilmesi açısından kapsamlı bir düzenleme gerektirmektedir. Öte yandan, İDA'ların tasarım ve üretim süreçlerinin basitliği, düşük maliyeti ve devletler harici farklı aktörler tarafından üretilebilen, erişilebilen ya da kullanılabilen teknolojiler olması göz önünde bulundurulduğunda oluşturulacak yaptırımların ne derece kapsamlı ve işe yarar olacağı dikkate alınmalıdır (Firat, 2024: 11). Sahip olduğu yüksek erişilebilirlik seviyesiyle gelişimini gün geçtikçe ilerleten ve yeni özellikler kazandırılan İDA'lar pazarda hızla yoluna devam etse de mevcut gelinen noktada çarpışma dışı

hasar ve olaylarla mücadele etmesi konusunda bazı tereddütleri beraberinde getirmektedir. Herhangi bir sebepten meydana gelebilecek olan yangın, su baskını ve karaya oturma gibi olumsuzluklarda hızlı müdahale konusunda sorunlar yaşanabileceği öngörülmektedir (Douglas vd., 2020: 651). Bu durum da bu konuda yeterli seviyede donanım ve bilgi birikimine sahip olmayan İDA kullanıcıları için tehlike yaratmaktadır.

IMO'ya göre (2025) bir diğer dezavantaj İDA'nın rekabetçi ticaret ortamı üzerinde nasıl bir etki yaratacağı konusunda yeterince veri ve öngörü bulunmamasıdır. Ulusal ve uluslararası ticaretin İDA sayesinde kolaylaşacağı düşünülürken olası maliyetler henüz saptanamamaktadır. Ayrıca bu yeniliklerin hem denizdeki hem de karadaki çalışanlar açısından nasıl bir etki yaratacağı konusu da oldukça belirsizdir. Çalışanlar bu değişime direnç gösterebilir; sürecin mümkün oldukça dengeli gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Aksi halde İDA kullanımıyla bazı avantajlar elde edilmesi beklenirken öngörülemeyen zararlara maruz kalınabilir.

Sonuç olarak henüz çok yeni bir teknoloji olmasından dolayı bazı eksiklikleri bulunduğu gerçeği aşikâr olsa da İDA'ların birçok sektörde ve disiplinde özellikle çeviklik ve sürdürülebilirlik anlamında büyük yararlar sağlayacak bir potansiyele sahip olduğu söylenebilir. Dolayısıyla bu çalışmanın kavramsal çerçevesi düşünüldüğünde ampirik uygulama kısmında İDA'lar üzerinde bir inceleme yapılmasına karar verilmiştir.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

ENDÜSTRİ 4.0, SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE ÇEVİK ÜRETİM KAVRAMSAL ÇERÇEVESİ KAPSAMINDA İNSANSIZ DENİZ ARACI ÜRETİM SÜREÇLERİ HAKKINDA BİR DEĞERLENDİRME

3.1. Amaç

Bu çalışmanın ortaya çıkış amacı, literatürde uzun zamandır çalışmalara konu olan ancak kendisine olan ilginin özellikle son on yıllık süreçte artış gösterdiği gözlemlenen çevik üretim kavramı üzerine bir analiz gerçekleştirmektir. Bu artışın nedenlerini anlamak amacıyla bir literatür taraması gerçekleştirilmiş; özellikle Endüstri 4.0 ile gelen yenilikler ve Covid-19 pandemisinin getirdiği olağandışı koşullarla beraber birçok küresel ölçekli olgunun çevik üretime artan ilginin nedeni olabileceği düşünülmüştür. Bu bağlamda literatür taraması biraz daha genişletilmiş; çevik üretim ile ilgili anahtar kelimelere ek olarak Endüstri 4.0 ve Covid-19 ile ilgili anahtar kelimeler sürece dahil edilmiştir. Endüstri 4.0 ile bağlantılı yayınlarda karşılaşılan sürdürülebilirlik temalı analizler ve sonuçlar bu çalışmanın kavramsal çatısının oluşmasını sağlamıştır. Bazı çalışmalarda aşırı tüketimi tetiklediği, kaynak verimliliğini kısıtladığı ve çevre için olumsuz etkilere sahip olduğu için eleştirilen çevik üretim kavramının, Endüstri 4.0'ın getirdiği yeniliklerle sürdürülebilir bir üretim sürecine dönüşüp dönüşemeyeceği ile ilgili bir analiz yapabilmek ve analiz sonucunda bir görüş ortaya koyabilmek adına Çevik Üretim, Endüstri 4.0 ve Sürdürülebilirlik kavramlarını temel alan kapsamlı bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Bu tarama sonucunda, bahsi geçen üç temel kavramın hepsinin birlikte ele alındığı ulaşılabildiği kadarıyla tek çalışmanın Agarwal ve diğerlerinin (2023) gerçekleştirmiş olduğu çalışma olduğu görülmüştür. Ek olarak Türkiye literatürü de gözden geçirilmiş, bahsi geçen kavramların tek tek ya da ikili olarak detaylı bir şekilde incelendiği yayınlar görülmüş ancak bu çalışma için düşünülen kapsamı karşılayan bir yayın tespit edilememiştir. Bu durumun hem ulusal hem de uluslararası anlamda bir boşluğa işaret ettiği düşünülmüş ve çalışma bu boşluğa katkı sağlayabilmek adına tasarlanmaya başlamıştır. Çevik Üretim, Endüstri 4.0 ve Sürdürülebilirlik kavramları detaylı bir şekilde incelenmiş, birbirleriyle olan etkileşimleri hakkında değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Bu değerlendirmelere göre, Endüstri 4.0 uygulamalarının üretim süreçlerinin dijitalleşmesinde etkin rol oynadığı, bu dijitalleşmenin hem çeviklik hem de çevresel metrikler açısından olumlu sonuçlar elde etmeyi kolaylaştırdığı söylenebilir. Buradan hareketle hem teknoloji odaklı hem çevik olma gerekliliği bulunan hem de çevreci bir yapı vaadeden sektörlerden biri olan İDA üretimi konusunda uzman görüşlerine dayanan bir araştırma yapılması planlanmıştır. Bu

amaçla literatür taraması İDA ile ilgili anahtar kelimeler dahil edilerek son haline kavuşmuştur. Agarwal ve diğerlerinin (2023) çalışması ve literatür taramasından yararlanılarak “Endüstri 4.0”, “Sürdürülebilirlik” ve “İDA” perspektifleri göz önünde bulundurularak çevik üretime ulaşılması için sahip olunması bir nevi zorunluluk olan “ÇYG’ler” ve “ÇS’ler” belirlenmiştir. Bu ifadelerin yer aldığı bir soru formu oluşturulmuş; İDA üretim süreçlerinde farklı işletmeler ve farklı pozisyonlarda görev alan sektör uzmanlarının görüşlerinden ÇKKV yöntemleriyle analizler gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemlerin detaylarına ilerleyen bölümlerle yer verilecektir. Yapılan analizler neticesinde, işletmelerin çevik üretim yetkinliğine ulaşabilmeleri için öncelik vermeleri gereken ÇS’ler ile bu stratejilere erişimi mümkün kılacak temel ÇYG’leri ortaya konulmaya çalışılmıştır. Bu araştırmanın sonucunda, İDA üretiminde faaliyet gösteren işletmelerin Endüstri 4.0’ın da katkılarıyla hem sürdürülebilir hem de çevik olabilmesi için hangi stratejilere öncelik vermesi gerektiğine ve bu stratejilere ulaşmada hangi yetenek ve göstergelerin belirleyici rol oynadığına dair bir değerlendirme zemini sunulması hedeflenmektedir.

3.2. Kapsam

Bu çalışma, son yıllarda hızla artan akademik ve sektörel ilgiye konu olan çevik üretim kavramını; Endüstri 4.0 ve sürdürülebilirlik bağlamında yeniden değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Çevik üretim, azımsanmayacak bir geçmişe sahip olsa da teknolojik yetersizlikler ve belirsiz kuramsal temeller nedeniyle uzun süre sınırlı bir uygulama alanına sahip olmuştur. Ancak dijital dönüşümün hız kazanması, küresel ölçekte yaşanan krizlerin üretim süreçlerini dönüştürmesi ve çevresel kaygıların ön plana çıkması, bu üretim yaklaşımını yeniden gündeme taşımıştır. Bu çalışmada, söz konusu dönüşümün dinamiklerini anlamak amacıyla üç temel kavram, çevik üretim, Endüstri 4.0 ve sürdürülebilirlik, birlikte ele alınarak kapsamlı bir analiz yapılması hedeflenmektedir.

Araştırmanın kuramsal temelini oluşturmak üzere bir literatür taraması gerçekleştirilmiş; çevik üretimle birlikte Endüstri 4.0, sürdürülebilirlik ve İDA ile ilişkili yayınlar kapsam dâhiline alınmıştır. Özellikle Endüstri 4.0 uygulamalarının üretim sistemlerini dijitalleştirerek süreçleri daha esnek, hızlı ve verimli hâle getirdiği; aynı zamanda sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sunduğu yönündeki bulgular, bu üçlü yapının birlikte değerlendirilmesini gerektirmiştir. Literatürde çevik üretimin aşırı tüketime neden olabileceği ve çevreye zarar verebileceği yönünde eleştiriler yer almakta; ancak bu çalışmada, dijital teknolojilerin bu olası olumsuz etkileri nasıl dengeleyebileceği sorgulanmaktadır.

Bu doğrultuda, yüksek teknoloji ve çevikliği stratejik bir gereklilik olarak benimseyen İDA sektörü araştırmanın uygulama alanı olarak seçilmiştir. Sektör seçimi, hem literatürdeki boşluğa katkı sağlama hedefiyle hem de araştırmacının sektöre erişim kolaylığı sayesinde yapılmıştır. Türkiye merkezli işletmeler temel alınarak yürütülen çalışmada, farklı kurumsal düzeylerde görev yapan uzmanlardan veri toplanmıştır. Çalışmanın özgün katkısı, çevik üretim kavramının sürdürülebilirlik bağlamında ve Endüstri 4.0 etkisiyle gözlemlenen dönüşümüne yönelik ampirik bulgular sunmasıdır. Literatürde bu üç kavramı bütünsel olarak ele alan erişilebilir tek kaynak olan Agarwal ve diğerlerinin (2023) çalışması, bu araştırma için metodolojik bir referans noktası olarak değerlendirilmiştir.

Araştırma sürecinde 58 anahtar kelime grubuyla sistematik tarama gerçekleştirilmiş; ardından bir işletmenin çevik olabilmesi adına dikkate alınması gereken ÇYG'ler ve ÇS'ler belirlenmiştir. Bu öğeler temel alınarak geliştirilen soru formu, İDA üretiminde faaliyet gösteren firmalardaki uzmanlara uygulanmış; elde edilen veriler ÇKKV yöntemleriyle analiz edilmiştir. Yöntemsel detaylara ilgili bölümlerde kapsamlı biçimde yer verilmiştir.

Sonuç olarak bu çalışma, Endüstri 4.0'ın üretim süreçlerini nasıl dönüştürebildiğini, çevik üretim ile sürdürülebilirlik arasındaki ilişkiye nasıl katkıda bulunduğunu ve bu bağlamda hangi strateji, yetenek ve göstergelerin belirleyici olduğunu ortaya koymayı hedeflemektedir. Böylece İDA üretiminde faaliyet gösteren işletmelerin uzman görüşleri çerçevesinde hem çevik hem de sürdürülebilir bir yapıya kavuşmasına katkı sağlayacak açıklayıcı bir çerçeve sunulması amaçlanmaktadır.

3.3. Soru Formunun Oluşturulması

İDA üretiminde çevikliğin sağlanabilmesi için Endüstri 4.0 ve sürdürülebilirlik çerçevesinde bir değerlendirme yapılabilmesi adına kapsamlı bir literatür taraması yapılmış, literatürde geçen ÇYG ile ÇS'ler derlenerek bir soru formu oluşturulmuştur. Soru formu oluşturulurken ve analiz sürecinde, Agarwal ve arkadaşlarının 2023 tarihli çalışmaları temel alınmıştır.

Bu çalışmada, aynı isimli başlıklarda detayları verilen “Çeviklik Yetenekleri ve Göstergeleri” soru formunda birinci bölümü, “Çeviklik Stratejileri” ise ikinci bölümü oluşturmaktadır. Birinci bölüm 6 temel boyut altında (Teknoloji ve Endüstri 4.0, Sürdürülebilirlik, Tedarik Zinciri, Müşteri Talebi, Stratejik ve Operasyonel, Diğer Koşullar) toplam 39 yetenek ve gösterge ifadesinden oluşmakta, ikinci bölüm ise aynı boyutlar ile 29 strateji ifadesinden oluşmaktadır. Bu ifadeler ve bu ifadelerin kategorileri hakkındaki detaylı bilgilere çalışmanın “2.1.1. Çeviklik Yetenekleri ve Göstergeleri” ve “2.1.2. Çeviklik

Stratejileri” başlıklarından erişilebilmektedir. Soru formunda ek olarak, araştırma kapsamındaki kavramların (Çevik Üretim, Sürdürülebilirlik, Endüstri 4.0) açıklamalarının yer aldığı bir bölüm ve yaş, cinsiyet, mesleki deneyim gibi bilgilerin talep edildiği “Kişisel Bilgiler” bölümü mevcuttur. Yazar tarafından derlenen forma hem sektör uzmanlarının hem de akademisyenlerin görüşleri doğrultusunda eklemeler ve çıkarmalar yapılarak son hali verilmiştir.

3.4. Analiz Türünün Belirlenmesi

Sosyal bilimler; fazla teorik kalması, sektörün değişim hızına yetişememesi veya sektör şartlarından bağımsız ilerlemesi sebebiyle zaman zaman eleştirilebilmektedir (Flyvbjerg, 2006: 242; Saltelli ve Giampietro, 2015: 31). Mevcut bilimsel yaklaşımlar özellikle karmaşık toplumsal sorunları anlamada ve çözmede zayıf ve yetersiz bulunmakta; daha kapsamlı ve bağlamsal yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır (Smaldino ve McElreath, 2016: 1). Bu eleştiri ve ihtiyaçlar göz önünde bulundurularak bu çalışmada sektör gerçeklerine biraz daha yaklaşabilmek adına çok kriterli karar verme yöntemlerine (ÇKKV) başvurulmuştur.

Karar verme süreçleri, sorunların tanımlanması, tercihlerin oluşturulması, alternatiflerin değerlendirilmesi ve en iyi alternatiflerin belirlenmesi adımlarından oluşur (Simon, 1960: 1; Kleindorfer vd., 1993: 145). Tek bir kriterin söz konusu olduğu durumlarda karar vermek sezgisel bir şekilde gerçekleşebilir; çünkü sadece en yüksek tercih derecesine sahip alternatifin seçilmesi yeterlidir. Ancak alternatifler birden fazla kriter doğrultusunda değerlendirildiğinde, kriterlerin önem derecelerinin ve ağırlıklarının belirlenmesi, tercihler arasındaki ilişkiler ve bağımlılıklar ve kriterler arasındaki olası çelişkiler süreci karmaşıktır ve zorlaştırır. Bu tür zorluklarla başa çıkabilmek için daha gelişmiş ve sistematik yöntemlerin kullanılması gerekmektedir. ÇKKV problemleriyle başa çıkabilmek için ilk adım problemin tanımlanması olup bu adım problemde kaç adet nitelik ya da kriterin bulunduğunu belirlemek ve problemin yapısını anlamına gelmektedir. Ardından, karar vericinin tercihlerini doğru şekilde yansıtan ve dikkate alan uygun veri ya da bilginin toplanması ve tercihlerin oluşturulması gerekmektedir. Bu süreçten sonra, belirlenen hedefe ulaşılmasını sağlayacak olası alternatifler ya da stratejiler kümesi oluşturulur ve bunlar değerlendirilir. Tüm bu aşamaların ardından, alternatiflerin ya da stratejilerin değerlendirilmesine, sıralanmasına veya iyileştirilmesine yardımcı olacak uygun bir yöntemin seçilmesi gerekmektedir (Tzeng ve Huang, 2011: 1). Bu nedenle bu çalışmada geleneksel ÇKKV yöntemleriyle daha hassas analizler yapılabilmesine olanak tanıyan bulanık sistem entegreli yöntemler kullanılmıştır. Uzman görüşlerindeki ve dilsel ifadelerdeki

karmaşıklığı ve belirsizliği değerlendirmeye dahil edebilmek adına Delphi ve TOPSIS yöntemleri bulanıklaştırılmıştır.

Geleneksel Delphi Yöntemi, RAND Corporation'da aralıklı olarak yürütülen bir uzman görüşü çalışmasında kullanılan teknik ile ortaya çıkmıştır. Bir grup uzmanın en güvenilir görüş birliğini elde etmek amacıyla geliştirilen teknik bu amacını kontrollü görüş geri bildirimi ile serpiştirilmiş bir dizi yoğun anketle başarmaya çalışmıştır (Dalkey ve Helmer, 1963: 458). Ancak birden fazla oturum ile birbirinin devamı niteliğinde tekrarlanan anketlerle veri toplanması nedeniyle uygulamada zorluk yaratmakta, yanıt oranlarında düşüşe neden olmakta ve bu nedenle analizler olumsuz etkilenebilmektedir. Yöntemin bu tür olumsuzluklarından kaçınmak için bulanık teori ve Delphi yöntemi birleştirilerek uygulanan BDELPHI yöntemi ile, değerlendirme göstergelerini türetmek için anketlere dayalı bir bulanık ağırlık fonksiyonu kullanılır (Lee vd., 2010: 139; Agarwal vd., 2023: 3674). Adından da anlaşılacağı üzere, bulanık teori dereceli kavramların değerlendirilmesinde kullanılır; yani her şeyin bir derece meselesi olduğu, bir başka deyişle her şeyin bir tür elastikiyete sahip olduğu bir teoridir (Zimmermann, 2011: 15). Bu teoriden faydalanılarak geliştirilen BDELPHI Yöntemi uzmanların yargılarına dayanan anket sonuçlarının geri bildirim mekanizması aracılığıyla bir olasılık değerine yakınsama yoluyla tahmin yapılmasını sağlayan etkili yöntemlerden biridir (Ishikawa vd., 1993: 241). Bu yöntem, bulanık teori ile birleştirildiğinde, görüşme sayısını ve araştırma süresini azaltma avantajına sahip olurken aynı zamanda uzman bilgisinin daha kapsamlı bir şekilde ifade edilmesini sağlar. Uzmanlardan anonim olarak tek seferde ya da ihtiyaç dahilinde birkaç turda toplanan görüşler ve geri bildirimlerle, araştırma konusu hakkında fikir birliğine ulaşılabilir. Özellikle belirsizliklerin ya da görüşlerin fazla olduğu durumlarda öngörü geliştirmek ve uzmanlar arasında konsensus sağlamak amacıyla bu yöntem tercih edilebilmektedir (Linstone ve Turoff, 1975: 3; Skulmoski vd., 2007: 1).

İnsanlar günlük rutinlerini gerçekleştirirken ya da bir konuda karar verirken çoğu zaman farkında olmadan bir şeyleri optimize etmeye çalışmaktadır. Bu optimizasyon, kazanım söz konusu olduğunda maksimizasyon, kayıp söz konusu olduğunda ise minimizasyon olarak ortaya çıkmaktadır. Bu esnada, türlü seçenekler arasından en uygun ve iyi olan seçilirken birden fazla amaç ve faktör göz önünde bulundurularak karar verilmektedir. İşte bu karar verme süreçlerinde sıklıkla kullanılan yöntemlerden biri olan TOPSIS, seçenekler içinden en uygun veya en iyi seçimin yapılmasına yardımcı olan bir tekniktir (Özdemir, 2018: 133). Literatürde “Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution” (İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Tercih Sıralama Tekniği) ifadesinin kısaltması olarak kullanılan TOPSIS, ÇKKV problemlerinde seçenekleri ideal ve en kötü çözümlere olan uzaklıklarına göre değerlendirir ve sıralama yapar.

Bu sayede yöntem, karar vericilerin en uygun seçeneği belirlemelerinde yardımcı olur (Hwang ve Yoon, 1981: 58; Behzadian vd., 2012: 13051).

TOPSIS ve Delphi her ne kadar çok sıklıkla ve uzun zamandır kullanılan yöntemler olsalar da bazı konularda yetersiz kalabilmektedirler. Bu yetersizlik en temelde, dilsel ifadelerle edinilen verilerin analizi sonucunda, dilsel olmalarının getirdiği öznellik nedeniyle gerçeğe yakın sonuçlar elde edilememesi olarak tanımlanabilir. Bu nedenle önyargılar, belirsizlikler, öznel yorumlar ve tahmini veya dilsel değerlendirmeler söz konusu olduğunda bunların sonuçlar üzerindeki olumsuz etkilerinin üstesinden gelinebilmesi için bulanık mantık kullanılabilir. TOPSIS ve Delphi yöntemleri de bulanıklaştırılabilir ve “çok kriterli karar verme” aşamalarında kesin değerler yerine bulanık sayılara yer verilerek uygulanabilir. Böylece uzman görüşlerindeki öznellikler, dilsel yargılar ve belirsizlikler daha iyi değerlendirilebilir ve karar verme aşamasında daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilir (Ishikawa vd., 1993: 245; Chen, 2000: 2; Hsu vd., 2010: 420). Bu nedenle bu araştırmada geleneksel uygulamalar yerine bulanık yöntemler kullanılmıştır.

3.5. Uygulama

Literatür taramasının sonuçları göz önünde bulundurulduğunda açıkça görülmektedir ki Endüstri 4.0, Çevik Üretim ve Sürdürülebilirlik alanlarında bütünleşik olarak gerçekleştirilen çalışmalar erişilebildiği kadarıyla oldukça sınırlı sayıdadır. Bu durumun aksine, literatür taraması bölümünde görüldüğü üzere Endüstri 4.0'ın sürdürülebilirliği ve çevikliği artırabileceğine yönelik bulguların yer aldığı çalışmalar mevcuttur. Dolayısıyla birbiriyle birlikte düşünülmesi gereken bu üç kavram için ampirik çalışmaların gerçekleştirilmesi literatürdeki belirgin eksikliklerden biridir. Buna ek olarak, İDA gibi son yıllarda ortaya çıkan ve ampirik çalışmaları oldukça azınlıkta olan bir sektör seçiminin de literatürde önemli bir boşluğa referans edeceği öngörülmektedir.

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi literatürde Endüstri 4.0, Sürdürülebilirlik ve Çevik Üretim alanlarını birlikte değerlendiren yegâne çalışmalardan biri olan Agarwal ve diğerlerinin çalışmasında uygulanan analiz temel alınarak bu çalışmada Bulanık Delphi (BDELPHI) ve Bulanık TOPSIS (BTOPSIS) yöntemleri kullanılmıştır. İDA alanındaki sektör profesyonellerinin görüşleri doğrultusunda uygulanan yöntemler ile ilgili detaylar aşağıda belirtilmiştir.

Agarwal ve diğerleri analizlerinin ilk fazında, literatür taramasıyla belirledikleri 34 çeviklik göstergesi için BDELPHI uygulamış, bu uygulama sonucunda gösterge sayısı 20'ye düşürülmüştür. Ardından yine literatürden belirlenen 10 adet gerçekleştirilmesi hedeflenen

stratejiler için, 20 göstergenin hangilerinin daha fazla tercih edildiğini ve önceliklendirildiğini belirlemek amacıyla BTOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Bahsi geçen çalışmada BDELPHI yöntemi sadece çeviklik göstergeleri için uygulanırken, bu çalışmada hem ÇYG hem de ÇS için kullanılmıştır. Bunun nedeni, temel alınan çalışmanın soru formunda yapılan güncellemeler sonrasında formda yer alan ifadelerin sayısının artış göstermesidir. BDELPHI analizinin ardından uzmanların fikir birliği sağlayamadığı ifadeler soru formundan çıkarılmış; ifadeler 13 adet ÇYG ve 12 adet ÇS olmak üzere form yeniden düzenlenmiştir. İfade sayılarının azalması, daha hassas sonuçlar elde edilmesini sağlamış; ek olarak araştırmanın ikinci fazındaki veri toplama ve analiz sürecini görece kolaylaştırmıştır. İkinci fazda elde edilen veriler BTOPSIS yöntemi ile analiz edilmiş; analiz sonucunda hangi ÇS'lerin öncelikli olduğu, öncelikli ÇS'lere ulaşmak için hangi ÇYG'lere daha fazla önem verilmesi gerektiği belirlenmiştir. Bu araştırmada gerçekleştirilen uygulamanın adımları özetlenerek Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

Literatür Taraması	•58 farklı anahtar kelime grubu kullanıldı. •401 çalışmaya ulaşıldı.
Soru formunun oluşturulması	•Yetenek ve göstergeler belirlendi. •Stratejiler belirlendi.
Uzman görüşleriyle soru formuna son şeklinin verilmesi	•Sektör uzmanlarının görüşleri alındı. •Alanda çalışan akademisyenlerin görüşleri alındı.
Veri toplama	•Yüz yüze ve online görüşmeler gerçekleştirildi.
Analiz	•Bulanık Delphi (BDELPHI) •Bulanık TOPSIS (BTOPSIS)

Şekil 3.1 Tez İş Akış Aşamaları

Kaynak: Şekil, yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 3.1'de gösterildiği gibi, ampirik uygulama için öncelikle detaylı bir literatür taraması yapılmış; bu taramayla belirlenen ifadeler sektör uzmanlarının ve ilgili akademisyenlerin görüşüne sunulmuştur. Alınan geribildirimlerin ardından soru formuna son hali verilmiş ve önce BDELPHI için ardından BTOPSIS için veri toplanmaya başlanmıştır. Her bir yöntemin uygulanışı ve sonuçların değerlendirilmesi aşağıdaki bölümlerde detaylı bir şekilde gösterilmiştir.

3.5.1. Bulanık Delphi

Bu çalışmada BDELPHI yöntemi, Endüstri 4.0, Sürdürülebilirlik ve Çevik Üretim konusunda bütünsel olarak gerçekleştirilen literatür taramasından elde edilen bilgiler ışığında hazırlanan soru formu ile bu alandaki uzmanlarca kabul gören ÇYG ve ÇS ifadelerinin belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. BDELPHI yöntemi, anket temelli bulanık ağırlık fonksiyonları aracılığıyla değerlendirme göstergelerinin türetilmesinde bulanık sistem teorisi ile Delphi metodunu entegre etmektedir. Bu birleşik yaklaşım hem görüşme sayısını hem de inceleme süresini kısaltırken, uzman bilgisinin daha kapsamlı ve doğru şekilde ifade edilmesine imkân tanımaktadır. Bu bağlamda geliştirilen soru formu ile İDA üretim projelerinde doğrudan görev alan sektör uzmanlarından veri toplama süreci başlatılmıştır.

Delphi yönteminde “uzman” tanımı, ilgi alanı ve bağlama göre değişkenlik gösterebilmektedir. Genel anlamda bir kişinin uzman olarak değerlendirilebilmesi için, belirli bir konuda deneyim kazanmış olması; özel bir yetenek, beceri ya da bilgiye sahip olması beklenir. Ancak seçilen uzmanların sınıf derecesiyle mezuniyet ya da doktora gibi standart akademik niteliklere sahip olmaları şart değildir (Dapari vd., 2017: 47). Araştırma gereğince alanda en yetkin kişilere ulaşılması gerektiğinde ise şu üç grup Delphi katılımcıları olarak önerilmektedir (Delbecq vd., 1975: 85):

- Delphi çalışmasının sonuçlarını kullanacak olan üst düzey yönetim karar vericileri
- Profesyonel kadro üyeleri ve onlara destek sağlayan ekip
- Yargılarına başvuru Delphi anketi katılımcıları

Aslında genel olarak uzman, ilgili alanda katkı sunabilecek herhangi biri olabilir. Literatürde birçok çalışmada kabul görmüş kaynaklardan biri olan Adler ve Ziglio’ya göre (1996) Delphi katılımcılarının dört uzmanlık koşulu sağlaması gerekmektedir:

- Araştırılan konularla ilgili bilgi ve deneyime sahip olmak
- Katılım kapasitesi ve istekliliği
- Delphi sürecine katılmak için yeterli zamana sahip olmak
- Etkili iletişim becerilerine sahip olmak

Belirtilen niteliklere sahip katılımcılardan sağlanan veriler, uzman görüşü kapsamında bilimsel değerlendirmeye alınabilir. Bu niteliklerden uygulamaya katılmak için yeterli zamana sahip olmak, muhtemelen nitelikler içindeki en önemlisi olarak görülebilir. Çünkü Geleneksel Delphi uygulamaları genellikle çok turlu olarak gerçekleştirilir ve katılım taahhüdü, her turda verilen yanıt oranlarıyla anlaşılabilir (Keil vd., 2002: 117). Uzmanlık düzeyi yüksek bireyler, konuya ilişkin derinlemesine analiz yapabilme yetkinliğine sahip olsalar da çoğunlukla yoğun çalışma tempoları nedeniyle araştırma sürecine tam anlamıyla katılım sağlayamayabilirler. İlgi

çekici, kısa ve iyi yazılmış sorular, bu kişilerin katılımını sağlama konusunda etkili olabilir (Skulmoski vd., 2007: 10). Bir diğer alternatif olarak bulanık yöntemlerin uygulanması bu gibi sorunların ortadan kaldırılmasına yardımcı olabilmektedir.

Özetle Delphi katılımcılarının seçiminde herhangi bir standart belirleme konusunda, aslında literatürde hâlihazırda belirtilmiş kesin bir ölçüt bulunmamaktadır (Hsu ve Sandford, 2007: 3). Diğer bir ifadeyle, Delphi literatürü boyunca Delphi katılımcılarının tanımı belirsizliğini korumuştur (Kaplan, 1971: 24). Bununla birlikte, en uygun uzman grubunu seçmek ve bu seçimi savunmak her araştırmacının sorumluluğundadır (Sumsion, 1998: 154). Literatürdeki bu bilgiler göz önünde bulundurulduğunda bu çalışmadaki BDELPHI uygulaması için İDA üretim süreçlerinde proje yöneticisi, yazılım mühendisi, tasarımcı, üst düzey yönetici gibi farklı pozisyonlarda ve çeşitli kademelerde görev alan sektör uzmanlarının görüşlerine başvurulmuştur.

Geleneksel Delphi yöntemlerinde uzman örneklem büyüklüğü konusunda bir görüş birliği bulunmamakta olup örneklem büyüklüğünün değerlendirilebileceği kabul görmüş net bir ölçüt de yoktur (Hasson vd., 2000: 1010; Akins vd., 2005: 5). Bu durum, “tipik” bir Delphi uygulamasından söz edilemeyeceğini; aksine, yöntemin araştırmanın bağlamına ve sorularına göre uyarlanarak kullanılabildiğini ortaya koymaktadır (Skulmoski vd., 2007: 5). Örneğin Reid (1988), sağlık alanında Delphi uygulamalarına ilişkin yayımlanmış makaleleri incelemiş ve bu çalışmalarda 10 ila 1685 arasında panelist kullanıldığını belirlemiştir. Öte yandan Skulmoski ve diğerleri de (2007) çalışmalarında benzer şekilde farklı örneklem büyüklükleriyle karşılaşmış, kullanılan uzman sayısının 4 ile 171 arasında değişebileceğini tespit etmiştir. Özetle literatür, Delphi uzman örneklem büyüklüğüne dair yalnızca araştırmacılar tarafından yapılan ampirik tercihlere (örneğin kolayda, amaçlı veya ölçüt örnekleme) yer vermektedir (Hasson vd., 2000: 1010). Örneklem büyüklüğü hakkında her ne kadar kesin ve evrensel kurallar olmasa da dikkate alınması gereken bazı faktörler vardır. Örneğin Delbecq ve diğerlerine göre (1975) eğer katılımcı grubu homojense 10-15 kişilik bir örneklem yeterli olabilmektedir. Ancak uluslararası bir çalışma gibi farklı grupların dahil olması gerektiği durumlarda daha büyük örnekleme gereksinim olacaktır. Dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta, örneklem büyüdükçe grup hatasının azalması ve karar kalitesinin artmasıdır. Ancak bu noktada araştırmanın gerektirdiği örneklem büyüklüğü eşiği aşıldığında verileri analiz etmek ve Delphi sürecini yönetmek zorlaşırken, analiz sonucu edinilen bilimsel katkılar marjinal düzeyde kalabilmektedir (Skulmoski vd., 2007: 10).

Bu bilgilerden hareketle bu çalışmada amaçlı örnekleme kullanılarak belirli bilgi, deneyim veya niteliklere sahip bireyler kasıtlı olarak seçilmiştir. Antalya Serbest Bölge’de yer

alan tersanelerde gerçekleştirilen görüşmeler ve LinkedIn üzerinden sağlanan bağlantılar ile belirlenen uzmanların bazılarıyla yüz yüze bazılarıyla e-posta yoluyla iletişime geçilerek araştırmanın içeriği hakkında bilgi verilmiştir. Araştırmaya katılmayı kabul eden 34 katılımcı arasından seçilen, bu araştırmanın kapsamına en uygun olan 17 uzmandan, Ek 1’de sunulan çevrimiçi anket formu aracılığıyla veri toplanmıştır. BDELPHI analizine katılan uzmanlar, İDA projelerinde mühendis, tasarımcı, proje yöneticisi, araştırmacı ve üst düzey yönetici gibi çeşitli pozisyonlarda görev almaktadır. Bu uzmanların yaş ortalaması 37 olup, uzmanlardan yalnızca biri kadındır. Uzmanların ortalama İDA ve mesleki deneyim süreleri göz önünde bulundurulduğunda; İDA üretim süreçlerindeki deneyim sürelerinin yaklaşık 5 yıl, toplam mesleki deneyim sürelerinin yaklaşık 14 yıl olduğu tespit edilmiştir. Bu sürelerin bir konuda uzman olmak için yetersiz olabileceği düşünülebilir; ancak İDA’nın ortaya çıkışının üzerinden çok geçmemesi nedeniyle bu alanda çalışma sürelerinin az olması, yüksek teknoloji odaklı yapısı nedeniyle çoğunlukla genç yetişkinlerin bu alanda kendini geliştirmeye çalışması olağan karşılanabilir.

Her bir uzmandan BDELPHI için dilsel puanlama alınmıştır. BDELPHI yönteminde dilsel terimlerin karşılık geldiği bulanık sayılar, yani üçgen bulanık değerler, çalışmanın bağlamına, uzman grubunun değerlendirme alışkanlıklarına ve araştırmacının tercihlerine bağlı olarak önceden tanımlanır. Birçok Geleneksel Delphi uygulamasının çoğunlukla 9’lu ve 7’li Likert ölçeğinde yapıldığı görülmektedir (Cantrill vd., 1998: 132; Dean vd., 2000: 233; Campbell vd., 2000: 426; Aljamal vd. 2016: 210; McMillan vd., 2016: 658). Bu durum, analizdeki hassasiyeti artırmak için tercih edilebilmektedir. Çalışmanın ihtiyaçlarına göre 3’lü (Cassar Flores vd., 2014: 1182) ve 5’li (McDermott vd., 1995: 335; Chan vd., 2009: 2381) ölçeklerin kullanılabilirdiği de görülmüştür. Bu çalışmada literatürde yaygın olarak kullanılan eşit aralıklı 5’li Likert ölçeği kullanılmıştır. Geleneksel Delphi literatüründe rağbet gören 7’li veya 9’lu ölçek tercih edilmemesinin nedeni, bu ölçeklerin kullanımında uzmanların çok fazla ayırım yapmak durumunda kalmasıdır. Çok fazla sorunun yer aldığı formlarda veri toplama sürecinde karşılaşılan yorulma, sıkılma vb. sorunları minimize etmek tutarlı ve gerçekçi sonuçlar elde etmek için oldukça önemlidir. Bu çalışmada soru formunda yer alan ÇYG ve ÇS ifadelerinin hem çok sayıda olması hem de uzun cümlelere sahip olması ve araştırmanın aşırı hassasiyet gerektirmeyen bir çalışma olması nedeniyle 7’li veya 9’lu ölçek kullanılmasına ihtiyaç duyulmamıştır. Geleneksel yöntemden elde edilen sonuçların niteliğini artırabilmek için analiz birden fazla kere yapılmakta ve ölçekteki değer sayısı da hassasiyeti artırabilmek adına 7 veya 9’lu tercih edilebilmektedir. Ancak BDELPHI, değerlerin bulanıklaştırılmasıyla bu sorunu ortadan kaldırabilmekte, gereken hassasiyet bu şekilde temin edilebilmektedir. Bu

nedenle 5’li Likert ölçeği tercih edilerek veri toplama süreci görece kolaylaştırılmıştır. Ek olarak eşit aralıklı skala ile gerçekleştirilen çalışmalar görece belirli bir standarda uyumlandırılabilir ve aynı standarda tabi çalışmaların karşılaştırılmalarına olanak tanıyabilir. Bu nedenle bu çalışmada eşit aralıklı 5’li Likert ölçeği tercih edilmiştir. Ölçekteki dilsel terimler ve bu terimlerin üçgen bulanık değerleri Tablo 3.1’de gösterilmiştir (Manakandan vd., 2017: 230):

Tablo 3.1 Dilsel Terimler ve Üçgen Bulanık Değerler

Önem Dereceleri	1. Önemsiz	2. Az derecede önemli	3. Orta derecede önemli	4. Önemli	5. Son derece önemli
Üçgen Bulanık Değerler	0,0-0,0-0,2	0,0-0,2-0,4	0,2-0,4-0,6	0,4-0,6-0,8	0,6-0,8-1,0

Kaynak: Tablo, yazar tarafından Manakandan ve diğerlerinin (2017: 230) çalışması temel alınarak oluşturulmuştur.

Bir uzmanın Likert ölçeğiyle verdiği her kaydedilmiş yanıtın puanları, 0 ile 1 arasında değişen bulanık sayı kümelerine dönüştürülmüştür. Her yanıt için göz önünde bulundurulmuş üç değer şunlardır: minimum değer (n_1), en makul değer (n_2) ve maksimum değer (n_3). Bulanık değerlerin amacı, uzmanın görüşündeki bulanıklığı ya da kesin olmama durumunu yansıtmaktır. Çünkü her görüş, sabit bir puan veren Likert ölçeği ile ele alınamayan belli bir belirsizlik, öznellik ve muğlaklık içermektedir (Yusoff vd., 2024: 4). Bu bulanık değerler, uzman görüşlerinin daha kapsayıcı, temsili ve hassas bir biçimde ifade edilmesini sağlar. Örneğin, ÇYG’ler arasında yer alan “Çalışanların çevre koruma ve sürdürülebilirlik konularında eğitilmesi” ifadesinin bir uzman tarafından “5 (son derece önemli)” düzeyinde puanlandığı varsayıldığında bu puanın sırasıyla 0,6; 0,8 ve 1,0 bulanık puanlarının minimum, en makul ve maksimum değerlerine dönüştürülür. Bu da uzmanın maddeye %60, %80 ve %100 oranında katıldığı anlamına gelir. Elde edilen bulanık puanlar, daha sonraki netleştirme (defuzzification) süreci için m_1 , m_2 ve m_3 değerleri üzerinden ortalanmıştır.

Netleştirme (Defuzzification) süreci (A_{max}), her bir maddenin önem düzeyini belirlemek amacıyla yapılan bir sıralama işlemidir. Bu sıralama işlemi, aşağıdaki formül (1) temel alınarak hangi ifadelerin korunacağına veya eleneceğine karar vermede yardımcı olmaktadır (Manakandan vd., 2017: 229):

$$A_{max} = \frac{(m_1+m_2+m_3)}{3} \quad (1)$$

İfadelerin kabul edilebilirliğinin belirlenmesinde 3 ön koşul vardır:

- Eşik değeri (d) $\leq$ İlgili kategorinin d ortalaması (çalışmanın gereklerine göre literatür temelli bir eşik değer de kullanılabilir.)
- Değerlendirilen maddeler üzerinde uzmanlar arası görüş birliği $\geq$ %75 (çalışmanın gereklerine göre farklı yüzdelere kullanılabilir.)

- Maddenin sıralaması

Burada eşik değeri, her bir ifade için uzmanlar arasındaki uzlaşşıya bağlı olarak o yapının seçilip seçilmeyeceğini göstermektedir. Uzman görüşlerine dayalı önem derecelerinin ortalamasını temsil eden uzlaşşı anlamlılık değeri ile bu eşik değeri karşılaştırılır. Eğer uzlaşşı değeri eşik değerinden düşükse, ilgili değerlendirme kriteri dikkate alınmaz; aksi takdirde kabul edilir (Sumrit, 2020: 239).

Bu çalışmada her bir ifade için ortalama eşik değeri aşağıdaki formül kullanılarak bulunmuş olup; bu eşik değeri, ortalama bulanık sayı ile her bir uzmanın bulanık sayısı arasındaki farkın hesaplanmasıyla elde edilmiştir. İki üçgen bulanık sayı arasındaki uzaklık Vertex yöntemiyle (2) hesaplanmıştır:

$$d(\tilde{m}, \tilde{n}) = \sqrt{\frac{1}{3}[(m_1 - n_1)^2 + (m_2 - n_2)^2 + (m_3 - n_3)^2]} \quad (2)$$

Elde edilen $d(\tilde{m}, \tilde{n})$ değeri, aşağıdaki formülde (3) kullanılarak bir eşik değeri (Threshold Value) hesaplanmıştır:

$$\text{Eşik Değeri } (d) = \frac{\text{Her bir ifade için ortalama eşik değeri } (d)}{\text{Toplam uzman sayısı} \times \text{Toplam ifade sayısı}} \quad (3)$$

Literatürde birçok çalışmada ifadenin kabul edilebilirliği, farklı eşik değerleri ile belirlenmiştir. Örneğin Kuo ve Chen (2008: 1934), Somsuk ve Laosirihongthong (2017: 182) ve Sumrit (2020: 239), “tüm faktörlerin önem derecesinin %80’inin yalnızca %20’lik bir kısmından kaynaklandığı” yönündeki Pareto 80/20 kuralına dayanılarak eşik değerini 0,8 olarak belirlenmiştir. Öte yandan bazı çalışmalarda eşik değeri 0,2 olarak belirlenip herhangi bir ifadeye yönelik uzlaşşının sağlandığına karar verilebilmesi için belirlenen asgari gereklilik %75’tir (Chu ve Hwang, 2008: 2829; Ismail vd., 2021: 874; Yusoff vd., 2024: 5). Eşik değerinin literatüre dayandırılması aynı sektör ve benzer özellik gösteren çalışmalardaki sonuçların genellenebilir ve karşılaştırılabilir olmasını sağlayabilir, ancak temel alınan eşik değerinin analiz yapılan alan için doğru bir tercih olup olmadığıyla alakalı kesin bir yargıya varılamamaktadır.

Bu bilgiler göz önünde bulundurularak ve bu çalışmanın özellikleri değerlendirilerek, BDELPHI analizinde eşik değeri hesaplanırken literatürden farklı bir yöntem izlenmiştir. Öncelikle soru formunda yer alan ifadeler, her ne kadar aynı literatür taraması sonucu elde edilmiş olsa da birbirlerinden farklı özelliklere sahip oldukları için kategorize edilmiştir. Dolayısıyla BDELPHI için, eşik değeri hesaplaması kategori bazlı olarak gerçekleştirilmiş; bu yöntemin bütün grubu tek seferde analiz etmeye göre daha hassas sonuçlar vereceği düşünülmüştür. Bu çalışma hem literatürde çok fazla örneği olmayan bir konu ve alanda

yapıldığı için hem de bu alanda bu yönteme dair erişilebildiği kadarıyla ilk çalışma olduğu için literatürde yoğunlukla kullanılan değerlerin temel alınması tercih edilmemiştir; bunun yerine çalışmaya ve kategorilere özgü eşik değerleri hesaplanmıştır. Yani, örneğin ÇYG'nin "Sürdürülebilirlik" kategorisinde yer alan 7 ifadenin eşik değerlerinin aritmetik ortalaması alınmış; bulunan değer "Sürdürülebilirlik" kategorisinde yer alan tüm ifadeler için eşik değeri olarak kullanılmıştır. Soru formundaki ifadelerin çok sayıda ve birbirinden farklı kategoriler içeriyor olması nedeniyle değerlendirmelerinde hassasiyetin sağlanabilmesi açısından her bir kategoriye özgü eşik değerinin kullanılması tercih edilmiştir. Ayrıca kategori bazlı ifade sayılarının birbirlerinden farklı olması nedeniyle (Örneğin ÇYG'deki Teknoloji ve Endüstri 4.0 kategorisinde 13, Müşteri Talebi kategorisinde 5, diğer koşullar kategorisinde 2 ifade bulunmaktadır.), soru formundaki bütün ifadeleri kapsayan tek bir eşik değerinin kullanılmasının ve ifadelerin bu şekilde değerlendirilmesinin adil olmayacağı düşünülmüştür. Kategori bazlı eşik değeri hesaplamasının sayesinde kategoriler kendi içlerinde tematik anlamda değerlendirilme imkânı bulabilmekte; her bir ifadenin ilgili kategori içerisindeki güçlü ve zayıf olma durumu tespit edilebilmektedir. Böylece bu uygulamanın literatürdeki BDELPHİ birikimi için yeni bir katkı olacağı öngörülmektedir. Bu yaklaşım sonucu elde edilen eşik değerleri sonrasında görüş birliği %75'in altında kalan ifadeler elenmiş, ifadelerin önem sıralaması netleştirme süreci sonrasında belirlenmiştir. Tüm katılımcı verileri Microsoft Excel kullanılarak girilmiş ve analiz edilmiştir. Analizin nasıl gerçekleştirildiğine dair örnek olması açısından Tedarik Zinciri kategorisindeki ifadelerin Excel'den alınmış ekran görüntüsü Tablo 3.2'de gösterilmiştir.

Tablo 3.2 Tedarik Zinciri Kategorisinde Yer Alan İfadelerin BDELPHİ Yöntemine Göre Değerlendirilmesi

Karar Verici	Likert	Tedarik Zinciri 1				Likert	Tedarik Zinciri 2				Likert	Tedarik Zinciri 3				Likert	Tedarik Zinciri 4				Likert	Tedarik Zinciri 5			
		n1	n2	n3	d		n1	n2	n3	d		n1	n2	n3	d		n1	n2	n3	d		n1	n2	n3	d
KV01	4	0,4	0,6	0,8	0,0810	4	0,4	0,6	0,8	0,0922	5	0,6	0,8	1,0	0,1165	5	0,6	0,8	1,0	0,1167	5	0,6	0,8	1,0	0,0702
KV02	5	0,6	0,8	1,0	0,1157	5	0,6	0,8	1,0	0,1045	5	0,6	0,8	1,0	0,1165	5	0,6	0,8	1,0	0,1167	5	0,6	0,8	1,0	0,0702
KV03	5	0,6	0,8	1,0	0,1157	5	0,6	0,8	1,0	0,1045	4	0,4	0,6	0,8	0,0803	5	0,6	0,8	1,0	0,1167	5	0,6	0,8	1,0	0,0702
KV04	4	0,4	0,6	0,8	0,0810	3	0,2	0,4	0,6	0,2955	3	0,2	0,4	0,6	0,2835	4	0,4	0,6	0,8	0,0801	3	0,2	0,4	0,6	0,3298
KV05	5	0,6	0,8	1,0	0,1157	5	0,6	0,8	1,0	0,1045	4	0,4	0,6	0,8	0,0803	5	0,6	0,8	1,0	0,1167	5	0,6	0,8	1,0	0,0702
KV06	5	0,6	0,8	1,0	0,1157	5	0,6	0,8	1,0	0,1045	5	0,6	0,8	1,0	0,1165	5	0,6	0,8	1,0	0,1167	5	0,6	0,8	1,0	0,0702
KV07	4	0,4	0,6	0,8	0,0810	4	0,4	0,6	0,8	0,0922	3	0,2	0,4	0,6	0,2835	2	0,0	0,2	0,4	0,4833	3	0,2	0,4	0,6	0,3298
KV08	4	0,4	0,6	0,8	0,0810	4	0,4	0,6	0,8	0,0922	4	0,4	0,6	0,8	0,0803	3	0,2	0,4	0,6	0,2833	5	0,6	0,8	1,0	0,0702
KV09	5	0,6	0,8	1,0	0,1157	5	0,6	0,8	1,0	0,1045	5	0,6	0,8	1,0	0,1165	5	0,6	0,8	1,0	0,1167	5	0,6	0,8	1,0	0,0702
KV10	5	0,6	0,8	1,0	0,1157	5	0,6	0,8	1,0	0,1045	5	0,6	0,8	1,0	0,1165	5	0,6	0,8	1,0	0,1167	5	0,6	0,8	1,0	0,0702
KV11	4	0,4	0,6	0,8	0,0810	4	0,4	0,6	0,8	0,0922	5	0,6	0,8	1,0	0,1165	5	0,6	0,8	1,0	0,1167	4	0,4	0,6	0,8	0,1265
KV12	5	0,6	0,8	1,0	0,1157	4	0,4	0,6	0,8	0,0922	4	0,4	0,6	0,8	0,0803	5	0,6	0,8	1,0	0,1167	5	0,6	0,8	1,0	0,0702
KV13	4	0,4	0,6	0,8	0,0810	5	0,6	0,8	1,0	0,1045	5	0,6	0,8	1,0	0,1165	4	0,4	0,6	0,8	0,0801	5	0,6	0,8	1,0	0,0702
KV14	4	0,4	0,6	0,8	0,0810	5	0,6	0,8	1,0	0,1045	5	0,6	0,8	1,0	0,1165	4	0,4	0,6	0,8	0,0801	5	0,6	0,8	1,0	0,0702
KV15	4	0,4	0,6	0,8	0,0810	4	0,4	0,6	0,8	0,0922	5	0,6	0,8	1,0	0,1165	4	0,4	0,6	0,8	0,0801	5	0,6	0,8	1,0	0,0702
KV16	4	0,4	0,6	0,8	0,0810	5	0,6	0,8	1,0	0,1045	4	0,4	0,6	0,8	0,0803	5	0,6	0,8	1,0	0,1167	5	0,6	0,8	1,0	0,0702
KV17	4	0,4	0,6	0,8	0,0810	4	0,4	0,6	0,8	0,0922	4	0,4	0,6	0,8	0,0803	4	0,4	0,6	0,8	0,0801	4	0,4	0,6	0,8	0,1265
Genel D	0,1148	0,49	0,68	0,88	0,0953		0,50	0,69	0,89	0,1107		0,49	0,68	0,88	0,1233		0,49	0,68	0,88	0,1373		0,53	0,73	0,93	0,1074
m(i)		m1	m2	m3	ort d		m1	m2	m3	ort d		m1	m2	m3	ort d		m1	m2	m3	ort d		m1	m2	m3	ort d
A Maksimum		0,68					0,70					0,68					0,68					0,73			
Madde Sırası		3					1					4					5					2			
Sayı d =<Genel D		10					16					6					5					13			
Yüzde d=<d/Genel D		58,82					94,12					35,29					29,41					76,47			

Kaynak: Tablo, yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 3.2’de, her bir uzman bazında her bir ifadenin değerlendirilmesi sonrasında yukarıda detayları verilen hesaplamalarla elde edilen d değerlerinin ortalaması alınarak o ifadenin d ortalaması bulunmuş; ardından bütün ifadelerin d’leri toplanıp ortalaması alınarak kategoriye ait bir D eşik değeri bulunmuştur. Sayısal değerlerle açıklamak gerekirse, örneğin “Item.A4.01” başlıklı sütunda ilgileri yer alan ÇYG’nin ifade d ortalaması 0,0953’tür. Diğer ifadelerin d ortalamaları sırasıyla; 0,1107; 0,1233; 0,1373 ve 0,1074 olarak hesaplanmıştır. Bu d değerleri toplanıp 5’e bölünerek bir ortalama alınmış ve bu ortalama kategorinin eşik değeri olarak ($D = 0,1148$) belirlenmiştir. Buna göre her bir uzmana ait d değerlerinde 0,1148’in altında olanların sayısı işleme alınarak yüzdelik değerler hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonrasında %75’in altında kalan ifadeler bir sonraki analize dahil edilmemiş olup; %75’in üzerinde bir değer alan ifadeler yeni bir kod verilerek bir sonraki analize aktarılmıştır. Yüzdeliklerinin büyüklüklerine göre üstünlük sıralamaları belirlenmiş olup; ikinci ifade %94,12 değeriyle ilk sırada, dördüncü ifade %29,42 değeriyle son sırada yer almıştır. Soru formunda yer alan her bir ÇYG ve ÇS ifadesi için örnek olarak gösterilen bu hesaplamalar dizini gerçekleştirilmiştir.

ÇYG ve ÇS’ler, BDELPHI uygulamasının sonuçlarına göre “kabul edilebilir” ve “kabul edilemez” olarak sınıflandırılarak bir sonraki analiz BTOPSIS için ayrıştırılmıştır. Ayrıştırma sonrası kalan ÇYG ve ÇS ifadeleri Tablo 3.3’te ve Tablo 3.4’te yeni kodlarıyla listelenmiştir. Belirtildiği üzere BDELPHI analizinde her kategori için ayrı eşik değeri belirlenmiş; bazı kategorilerde hiçbir ÇYG ifadesi eşik değerini geçememiş, bazı kategorilerde ise yalnızca bir ifade kalmıştır. Bu durum, BTOPSIS uygulamasında kategorik yapının işlevselliğini azaltmıştır. Dolayısıyla BTOPSIS analizinde ÇYG’ler ve ÇS’ler kategori ayrımı yapılmaksızın bütüncül olarak ele alınmıştır. Bu durum aynı zamanda, çalışmada bütünlük bir değerlendirme ile sonuca ulaşılmasına katkı sağlayabilir.

Tablo 3.3’te görülebileceği üzere 39 ÇYG ifadesinden 13 tanesi uzmanların ortak görüşleri doğrultusunda bir sonraki aşamaya kabul edilmiştir. Teknoloji ve Endüstri 4.0 kategorisindeki 13 ifadenin 3’ü (TE1, TE2, TE3); Müşteri Talebi kategorisindeki 5 ifadenin 2’si (MT4, MT5); Stratejik ve Operasyonel kategorisindeki 8 ifadenin 6’sı (SO6, SO7, SO8, SO9, SO10, SO11) ve Diğer Koşullar kategorisindeki ifadelerin tamamı (DK12, DK13) uzmanlar tarafından görüş birliği sağlanarak bir sonraki analiz için oluşturulan soru formuna eklenmiştir. Sürdürülebilirlik kategorisindeki 7 ifadenin ve Tedarik Zinciri kategorisindeki 4 ifadenin tamamı ise görüş birliği sağlanamadığından dolayı soru formundan çıkarılmıştır. Soru formunda kalan ifadelerin kendi kategorileri içindeki önem sıraları Tablo 3.3’ün sağ sütununda gösterilmiştir.

Tablo 3.3 Bulanık Delphi Sonrası ÇYG'ler

Delphi Kategorileri	Çeviklik Yetenek ve Göstergeleri	Önem Sıraları
Teknoloji ve Endüstri 4.0	TE01 Teknolojik yeniliklerin takip edilmesi, erken benimsenmesi ve uygulanması.	1
	TE02 Otonom, çevik ve proaktif hiper-bağımlı bir üretim ekosistemi geliştirmek için eklemeli üretim, artırılmış gerçeklik, CPS, bilişsel/otonom robotlar, dijital ikiz, gömülü IoT, uç bilişim ve akıllı sensörlerin kullanılması.	2
	TE03 İnsansız deniz araçlarının; istihbarat, gözetleme, keşif devriyesi ve kıyı limanı savunma gibi görevlerini yerine getirmek için aktif bir veri/iletişim bağlantısına sahip olması.	2
Müşteri Talebi	MT04 Çalışanlara, değişimlere hızlı adapte olmalarını sağlayacak esnek ve uyarlanabilir çalışma mantığının kazandırılması.	1
	MT05 Deniz aracı siparişi veren kurumsal ya da bireysel müşterilerin zamanla güncellenen ve özelleşen gereksinimlerine (teslim tarihi, ürün kalitesi vb.) hızlı yanıt verilebilmesi.	2
Stratejik ve Operasyonel	SO06 Maliyet hedef ve amaçlarının belirlenmesi, kesinleştirilmesi ve bunlara ulaşılması.	2
	SO07 Liderin duyarlılığı.	3
	SO08 Sürekli öğrenme ve eğitim.	1
	SO09 Çalışanların iş birliği.	2
	SO10 Açık, şeffaf iletişim ve bilgi paylaşımı.	2
	SO11 Değişimlere hızla adapte olabilmek için süreç bilgisi ve ileri dijital teknolojiler gibi temel operasyonlarda geliştirilen kurum içi kaynakların varlığı.	1
Diğer Koşullar	DK12 Teşvik paketleri ve kriz kurtarma planlarının etkilerini en üst düzeye çıkarmak için hükümetlerle iş birliği yapılması.	1
	DK13 Siyasi istikrarsızlık, ekonomik dalgalanma, yakın coğrafyamızdaki savaşlar, göçmen krizleri, iklim değişikliği kaynaklı doğal afetler, yoksulluk, su ve gıda kıtlığı gibi küresel ve toplumsal zorluklarla daha iyi mücadele etmek için iş modellerini dönüştürebilmek amacıyla yeni teknolojiler edinilmesi.	1

Kaynak: Tablo, yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 3.4'te görülebileceği üzere 29 ÇS ifadesinden 12 tanesi uzmanların ortak görüşleri doğrultusunda bir sonraki aşamaya kabul edilmiştir. Teknoloji ve Endüstri 4.0 kategorisindeki 4 ifadenin 2'si (TES1, TES2); Sürdürülebilirlik kategorisindeki 3 ifadenin 1'i (SÜS3); Tedarik Zinciri kategorisindeki 3 ifadenin 1'i (TZS4); Müşteri Talebi kategorisindeki 4 ifadenin 1'i (MTS5); Stratejik ve Operasyonel kategorisindeki 7 ifadenin 3'ü (SOS6, SOS7, SOS8) ve Diğer Koşullar kategorisindeki 8 ifadenin (DKS9, DKS10, DKS11, DKS12) uzmanlar tarafından görüş birliği sağlanarak bir sonraki analiz için oluşturulan soru formuna eklenmiştir. Soru formunda kalan ifadelerin kendi kategorileri içindeki önem sıraları Tablo 3.4'ün sağ sütununda gösterilmiştir.

Tablo 3.4 Bulanık Delphi Sonrası ÇS'ler

Delphi Kategorileri	Çeviklik Stratejileri	Önem Sırası
Teknoloji ve Endüstri 4.0	TES01 Finansal Güç ve Teknolojik Yetenekler: Güçlü bir teknolojik altyapı ile verilerin analiz edilebilmesi ve böylece faydalı içgörülerini paydaşlarla paylaşarak daha iyi, akıllı ve hızlı kararlar alınabilmesi için yeterli finansal güce sahip olmak.	1
	TES02 Teknoloji Edinimi: Pazara sunma süresini kısaltma ve kalitesizlik maliyetini düşürme ihtiyacıyla yeni teknolojileri keşfetmek ve/veya dışarıdan tedarik etmek.	1
Sürdürülebilirlik	SÜS03 Çevik ve Çevreci Üretim: Teknolojik yeniliklerle ve dijital dönüşümle üretim sistemini hem çevikleştirmek hem de sürdürülebilir hale getirmek.	1
Tedarik Zinciri	TZS04 Hammaddede Temini: Hayati önem taşıyan malzemelerin eksikliği durumunda operasyonları yeni bir üretim türüne adapte edilebilir.	1
Müşteri Talebi	MTS05 Müşteri Memnuniyeti: Üretim ve teslimat süresini kısaltmak, ürün geliştirme döngüsünü azaltmak, sipariş doğruluğunu artırmak ve müşteri iletişimini ve memnuniyetini iyileştirmek için dahili ve iş birliğine dayalı operasyonlarını yeniden düzenleme yeteneğine sahip olmak.	1

Stratejik ve Operasyonel	SOS06 Çalışan Yetkinliği: Değer yaratmak ve rekabet avantajı oluşturmak için yeni süreçleri öğrenme, uyarlama, uygulama ve rol ve sorumlulukları genişletme becerilerine sahip insan kaynağı oluşturmak.	2
	SOS07 Rekabet Avantajı: Endüstri 4.0 uygulamaları sayesinde üretim sistemlerini geliştirerek maliyet liderliği elde etmek ve rekabet avantajı kazanmak.	3
	SOS08 Risk Yönetimi: Tüketici talebi tahminlerinde artan belirsizlik, paydaşlar arası bilgi aktarımındaki gecikmeler ve çarpıklıklar gibi beklenmedik risklere yanıt veren uygun bir üretim sistemi oluşturmak.	1
Diğer Koşullar	DKS09 Dayanıklılık: Organizasyona ve çalışanlara belirsizliklerle başa çıkma ve bu belirsizliklerden kurtulma konusunda çeşitli beceriler kazandırmak.	2
	DKS10 Ekonomik Etkililik: Ekonomik gerileme dönemlerinde iş gücünü yavaşlatmadan firma harcamaları üzerinde mutlak kontrol ve görünürlük sağlamak.	1
	DKS11 Düşük Gecikme Süresi: Herhangi bir üretim yapılandırmasında gecikmeleri ve bu gecikmelerden kaynaklı iş yükünü minimize etmek.	3
	DKS12 Üretim Sistemi: Çevik bir üretim sistemi kurarak, sosyo-politik değişimlerden doğal afetlere veya ekonomik krizlere kadar çeşitli nedenlerden kaynaklanan olası kesintilerden tamamen kaçınmak için çevreyi sürekli izlemek; bu kesintilerin olası etkilerinden kurtulmak için kendini en uygun şekilde yeniden yapılandırabilmek; kesinti yaşandıktan sonra optimum operasyonel performansı hızlı bir şekilde sağlamak; böylece kesintilerin etkisini proaktif olarak en aza indirebilmek.	4

Kaynak: Tablo, yazar tarafından oluşturulmuştur.

Oluşturulan yeni soru formu ile 5 uzmandan yeniden veri toplanmış ve bu veriler BTOPSIS yöntemi ile analiz edilmiştir. Bir sonraki bölümde bu analizin detaylarına yer verilecektir.

3.5.2. Bulanık TOPSIS

Son yıllarda iş dünyasındaki hızlı değişimlere bağlı olarak karar verme süreçlerinin hızlanması kaçınılmaz bir gereklilik olmuştur. Karar vericiler, alternatifler arasından seçim yaparken desteğe ihtiyaç duymakta ve genellikle daha az tercih edilen seçenekleri hızlıca elemek istemektedirler. Bu anlamda ÇKKV yöntemleri karar vericiler için en çok tercih edilen alternatifin seçilmesi, alternatiflerin önem sırasına göre sıralanması ve nihai karara yönelik alternatiflerin elenmesi gibi kolaylıklar sağlamaktadır (Jahanshahloo vd., 2006: 1545). Literatürde bu tarz analizlerin yapılabilmesi için birçok farklı ÇKKV yöntemi farklı uygulamalarla kullanılabilmektedir. Hangi yöntemin kullanılacağına sorunun tanımı ve beklenen çıktılar doğrultusunda karar verilmelidir.

TOPSIS (İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Sıralama Tekniği), çok kriterli karar verme yöntemleri arasında en yaygın kullanılanlardan biridir ve ilk olarak Hwang ve Yoon (1981) tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntem, daha sonra bazı konularda yetersiz kaldığı düşüncesiyle çeşitli araştırmacılar tarafından farklı yöntemlere entegre edilmiş, farklı varyasyonlarla geliştirilmiş ve uyarlanmıştır. Karar problemlerinde alternatiflerin analiz edilmesi, karşılaştırılması ve sıralanması yoluyla, mevcut kriterler doğrultusunda en uygun seçeneğin belirlenmesini amaçlayan etkili bir ÇKKV tekniği olan TOPSIS, gerçek yaşamda karşılaşılan karar problemlerine uygulanabilirliği ile dikkat çekmektedir (Madanchian ve Taherdoost, 2023:

1). Özellikle son yıllarda çeşitli alanlarda farklı özellikler kullanılarak başarıyla uygulanmış örnekleri görülmektedir.

TOPSIS'in bu kadar tercih edilen bir yöntem olmasını, sahip olduğu bazı avantajlara bağlamak mümkündür. Literatürde bu yöntemin genel anlamda kabul görmüş bazı üstünlükleri şu şekildedir (Madanchian ve Taherdoost, 2023: 1):

- İnsan tercihlerini yansıtmada güçlü bir rasyonalite sunar.
- Hem en iyi hem de en kötü alternatifleri eşzamanlı olarak dikkate alabilen ölçeklenebilir bir değer üretir (Agarwal vd., 2023: 3676).
- Hesaplama süreci oldukça basit olup, elektronik tablo programlamasına olanak tanır.
- Kriter ya da alternatif sayısının artması, işlem basamaklarının sayısını etkilemez.
- İki veya daha fazla boyutlu problemlerde, kriter ve alternatiflerin performans ölçümleri polyhedron denilen bir çokyüzlü aracılığıyla görselleştirilebilir.

Tüm bu üstünlükleri, TOPSIS'i önde gelen ÇKKV yöntemlerinden biri hâline getirmektedir. Ancak bu üstünlüklere rağmen özellikle geleneksel TOPSIS yöntemi, bazı dezavantajlarla karşı karşıyadır (Madanchian ve Taherdoost, 2023: 1):

- Kriterler arasındaki korelasyonu dikkate almaksızın Öklidyen Mesafe'yi kullanır. Bu nedenle bilgi örtüşmesi ve fazlalığı sonuçları etkileyebilir (Shih vd., 2007: 804).
- Bu yöntemde ağırlıklandırma süreci zorlayıcı ve belirsizdir (Shih vd., 2007: 802).
- Pozitif ve negatif ideal noktalara eşzamanlı olarak yakın olan alternatiflerle karşılaşılması mümkündür.
- Bilginin yetersiz olduğu durumlarda, insan yargılarındaki belirsizlik nedeniyle belirsiz verilerin hassas biçimde değerlendirilmesi her zaman mümkün olmayabilir.
- Bir alternatifin ya da bir kriterin eklenmesi veya çıkarılmasıyla mevcut alternatiflerin sıralamasının değişmesi anlamına gelen sıralama tersinmesi (rank reversal) riski sonuçları etkileyebilir. Öte yandan, sıralama endeksi, pozitif ve negatif ideal noktalara olan uzaklıkları ağırlıkları veya bu uzaklıkların göreceli önemlerini dikkate almaksızın kullanır (Opricovic ve Tzeng, 2004: 451; Çelikkilek ve Tüysüz, 2020: 282). Bu da sonuçların tutarlılığıyla alakalı sorunlar yaratabilir.

Bütün bu dezavantajlar ve eleştiriler, bu yönteme dayalı çeşitli uygulamalar ve bulanık modeller geliştirilmesine neden olmuştur. Bu olumsuzlukların Geleneksel TOPSIS'te diğer birçok ÇKKV yöntemine kıyasla daha düşük düzeyde gerçekleştiği düşünülmektedir (Madanchian ve Taherdoost, 2023: 3). Örneğin, Zanakis ve diğerleri (1998: 527) tarafından gerçekleştirilen simülasyon karşılaştırmasına göre, TOPSIS incelenen sekiz yöntem arasında en az sayıda sıralama tersinmesi yaşayan yöntemdir. Bu nedenle, TOPSIS çoğu çalışmada

geliştirilen yöntemlerin temel yapısı olarak tercih edilmektedir (Kahraman vd., 2003: 390; Shih vd., 2007: 802).

Bulanık teori ile TOPSIS metodolojisinin birleşimi, edinilen verilerdeki dilsel ifadelerden kaynaklı belirsizlik ve önyargıyı azaltabilmektedir (Junior vd., 2014: 194; Agarwal vd., 2023: 3671). Aristo mantığı olarak da bilinen ikili mantık, klasik kümelerin temelidir; buna göre bir nesne ya tamamen kümeye aittir ya da değildir. Ancak bulanık kümelerde durum farklıdır; burada üyelik sabit bir mutlaklıkla tanımlanmaz. Nesneler bir kümeye belli bir derecede ait olabilir ve üyelikleri 0 ile 1 arasında değişen değerlerle ifade edilir. Başka bir ifadeyle, nesnelerin kümeye kısmi bir aidiyeti olabilir (Ecer, 2006: 78). Bu da belirsizliğin analize dahil edilmesinde önemli bir katkı sunabilir. Çünkü bir konu hakkındaki dilsel ifadeler tamamen “siyah” ya da tamamen “beyaz” olarak nitelendirilemez; bu ifadede öznel yargılar, koşullara göre değişkenlikler ve belirsizlikler vardır. Dolayısıyla ifadeler “gri”nin çeşitli tonlarında olabilir. Yani, sanayilerin dönüşüm sürecinde olduğu günümüz koşullarında, ÇS’lerin önceliklendirilmesine yönelik çabalar ortamın getirdiği belirsizlik ve önyargılar göz önünde bulundurularak gerçekleştirildiğinde daha etkili ve gerçekçi sonuçlar elde edilmesi sağlanabilir. Karar vericiler, işletmelerine bu stratejilerin en iyi nasıl entegre edileceği konusunda çok fazla faktörü dikkate almak zorundadır ve bu konuda sınırlı düzeyde net bilgiye sahiptir. Bu yüzden karar vermelerine yardımcı olacak yöntemlere ihtiyaç duyarlar.

Bu bilgiler ışığında çalışmanın ikinci aşamasında diğer ÇKKV yöntemlerine kıyasla çeşitli avantajları bulunan BTOPSIS yaklaşımı bu çalışmada uygulanmak üzere tercih edilmiştir. İDA üretim operasyonlarında daha çevik ve sürdürülebilir olmak amacıyla ÇS’lerin benimsenmesine yönelik ÇYG’leri değerlendirmek üzere BTOPSIS yaklaşımının uygun olacağı düşünülmüştür. BTOPSIS’te insan tercihleri basit bir mantıkla temsil edilebilmekte ve bu mantık çeşitli paydaşların katkısıyla kolayca oluşturulabilmektedir. Ayrıca BTOPSIS’in diğer yöntemlere kıyasla uygulama aşamasında daha fazla çeviklik sağladığı tespit edilmiştir (Junior vd., 2014: 204). Bu nedenle uzman görüşlerinin dilsel ifadelerinden yararlanarak ÇS’lerin hayata geçirilmesinde yüksek etkene sahip ÇYG’ler belirlenmiş ve bu şekilde ÇS’leri gerçekleştirerek çevik olma amacı taşıyan diğer işletmeler için bir uygulama önerisi sunulmuştur.

Bir BTOPSIS uygulaması genel anlamda belirli adımlar takip ederek gerçekleştirilir. BTOPSIS uygulamaları temel olarak, var olan ya da bir ön analizle belirlenen alternatifler ve karar kriterlerinin karar vericiler tarafından değerlendirilmesini içerir. Çalışmanın gerekleri doğrultusunda, karar kriterlerinin önem düzeyi belirlenir ve her kriter için bir katsayı oluşturulur. Ardından alternatifler, bu katsayılarla ağırlıklandırılmış karar kriterleri

doğrultusunda analiz edilir. Bu analizler dilsel ifadelerin üçgen veya yamuk sayılara dönüştürülmesiyle gerçekleştirilir. Ardından normalize edilen değerlerin pozitif ve negatif ideal noktalara olan uzaklıkları hesaplanır ve burada elde edilen değerlerle alternatiflerin önceliklendirme sıraları tespit edilir. Bu uygulama adımlarının detayları ilerleyen sayfalarda gösterilecektir.

Kriter ağırlıklarının belirlenmesi, her ÇKKV probleminde kritik bir adımdır; kriter ağırlıklarının değerlendirilmesinde öznel yaklaşımlar bazen tutarsız yargılara yol açabilir. Literatürde, Eşit Ağırlık, Entropi Ağırlığı, Kriterler Arası Korelasyon Yoluyla Kriter Önem Düzeyi, Kriterlerin Etkisinin Kaldırılmasına Dayalı Yöntem, Logaritmik Yüzde Değişimine Dayalı Nesnel Ağırlıklandırma, Kriterin Simetri, Kriter Etki Kaybı, Nesnel Kriter Ağırlıklarının Bütünleşik Belirlenmesi, Temel Bileşenler Analizi ve Ağırlıklı Temel Bileşenler Analizi gibi birçok katsayı belirleme yöntemi bulunmaktadır (Chatterjee ve Chakraborty, 2024: 1). Hangi yöntemin daha uygun olduğu, araştırmanın özelliklerine göre değişkenlik gösterebilmektedir. Bazı uygulamalarda karar kriterlerinin birbirlerinden farklı önem düzeylerinde olmaları nedeniyle farklı katsayıların oluşturulması gerekmekte; bu şekilde daha tutarlı ve gerçekçi sonuçlar elde edilebilmektedir (Ecer, 2006: 79). Bazı uygulamalarda ise her bir kriterin önem ağırlığı, doğrudan atama yoluyla veya dolaylı şekilde ikili karşılaştırmalar kullanılarak elde edilebilmektedir (Chen, 2000: 5). Bazı analizlerde her kritere eşit düzeyde önem atfedebilmek adına ÇKKV problemlerinde kriter ağırlıklarını hesaplamak için kullanılan en basit yaklaşımlardan biri olan (Roszkowska, 2013: 19) eşit ağırlık yöntemi kullanılmakta; kriter sayısına göre ağırlık hesaplaması yapılmaktadır. Bazı analizlerde ise model geliştirici ya da karar verici tarafından sabit bir kriter önem düzeyi belirlenmekte ve bütün kriterler aynı katsayı ile analize girebilmektedir (Rahman vd., 2024: 2). Bu çalışmada da model geliştirici tarafından bütün kriterlerin aynı önem düzeyinde olduğu varsayılarak sabit önem düzeyi kullanılmıştır. Bu çalışmadaki katılımcıların farklı işletmelerde farklı pozisyonlarda olan uzmanlar olması nedeniyle kriterlerin objektif olarak ağırlıklandırılama riski göz önünde bulundurularak bu yola başvurulmuştur. Ayrıca bu alanda daha önce bu kapsamda bir çalışmanın uygulanmamış olması nedeniyle görece genellenebilir sonuçlara ulaşabilmek adına kriterlerin sabit önem ağırlıklarıyla analize girmesine karar verilmiştir.

BDELPHI, değerlendirme kriterlerini elemek ve genel değerlendirme çerçevesini oluşturmak amacıyla kullanılmaktadır (Wang ve Peng, 2020: 1). Bu çalışmada, ön analiz olarak BDELPHI analizi ile uzmanların görüş birliği sağladığı ÇYG ve ÇS ifadeleri elde edilmiş; bu ifadelerden yeni bir soru formu oluşturulmuştur. Bazı ÇYG kategorilerinde yer alan ifadelerin hiçbirinde uzlaşa sağlanamamış ve bu nedenle bu ifadeler bir sonraki aşamaya dahil edilememiş;

bazı ÇS kategorilerinde ise yalnızca 1'er ifade kalmıştır. Delphi analizi sonucunda bir kategoride hiç ifade kalmadığı durumlarda, ilgili kategorilerin sistem dışı bırakılması gerekmektedir; çünkü bu durumda herhangi bir veri temeli bulunmamaktadır. Bu nedenle BTOPSIS için yeniden soru formu oluşturulurken yapı değişikliğine gidilmiş; kategorik bir düzen kullanılmamıştır. Kalan ÇYG'lerin her biri kategorisiz birer kriter olarak değerlendirilirken ÇS'ler de yine kategorisiz düzene sahip alternatifler olarak soru formunda yer almıştır. BTOPSIS soru formunda bir kategoride tek bir ÇS ifadesinin yer aldığı durumda herhangi bir sıralama ya da derecelendirme mümkün olmayacağı için; yani diğer bir deyişle bu tek ifadenin analize gerek kalmadan o kategorinin tek tercihi olarak değerlendirilmesi gerekeceği için soru formu yeniden oluşturulurken kategorik yapının işlevselliğinin azaldığı düşünülmüş ve yapı değişikliğine gidilmiştir. Böylelikle tüm kriterler eşit düzlemde analiz sürecine dâhil edilebilmiştir. Ayrıca BTOPSIS'in matris yapısı dolayısıyla kategorik düzene ihtiyaç duymaması da kriterlerin tematik gruplamalardan bağımsız olarak değerlendirilebildiğini ve karar sürecinin yalnızca kriter ağırlıkları ile alternatif performansları arasındaki matematiksel ilişkiye dayandığını göstermektedir (Madanchian ve Taherdoost, 2023: 3).

ÇKKV yöntemleri, genellikle 1 ila 5 katılımcı arasında değişmekte ve sınırlı sayıda kişiyle uygulanabilmektedir (Baştuğ vd., 2024: 15). Ancak bu az sayıdaki katılımcının ilgili konudaki yetkinliği ve niteliği uzman olarak değerlendirme yapabilecek seviyede olmalıdır. Eğer kullanılan yöntem bulanık mantık içeriyorsa, insan yargısındaki doğası gereği var olan belirsizlik dikkate alınır ve daha az sayıda uzmanla yapılan değerlendirmelerde dahi güvenilir sonuçlar elde edilebilir. Bu bilgiler dikkate alınarak BTOPSIS aşamasında 4'ü BDELPHI analizinde de yer alan toplam 5 uzmanın görüşüne başvurulmuştur. Bu uzmanların seçiminde mümkün oldukça İDA konusunda deneyim kazanmış kişilere öncelik verilmiştir. Ayrıca, farklı pozisyondaki kişilerin görüşlerinde de farklılıklar olabileceği göz önünde bulundurularak, bu farklılıkların uzlaşacağı görüşlerin genellenebilir bir yapıda olacağı öngörülmektedir. Seçilen uzmanların demografik bilgileri Tablo 3.5'te yer almaktadır.

Tablo 3.5. Bulanık TOPSIS Analizinde Yer Alan Karar Vericilerin Demografik Bilgileri

Karar Vericiler	Yaş	İDA Öncesi Pozisyon	İDA Projelerindeki Pozisyon	İDA Projelerindeki Deneyim	Toplam Mesleki Deneyim
KV1	35	Proje Yöneticisi	İnsansız Sistemler Direktörü	6	12
KV2	46	Gemi Acentesi Yöneticisi	Bilim Uzmanı	3	20
KV3	35	Planlama Müdürü	Üretim Planlama Müdürü	2	11
KV4	32	Mekanik Tasarım Yöneticisi	Kıdemli Makine Mühendisi	4	10
KV5	30	Proje Mühendisi	Proje Mühendisi	2	7

Kaynak: Tablo, yazar tarafından oluşturulmuştur.

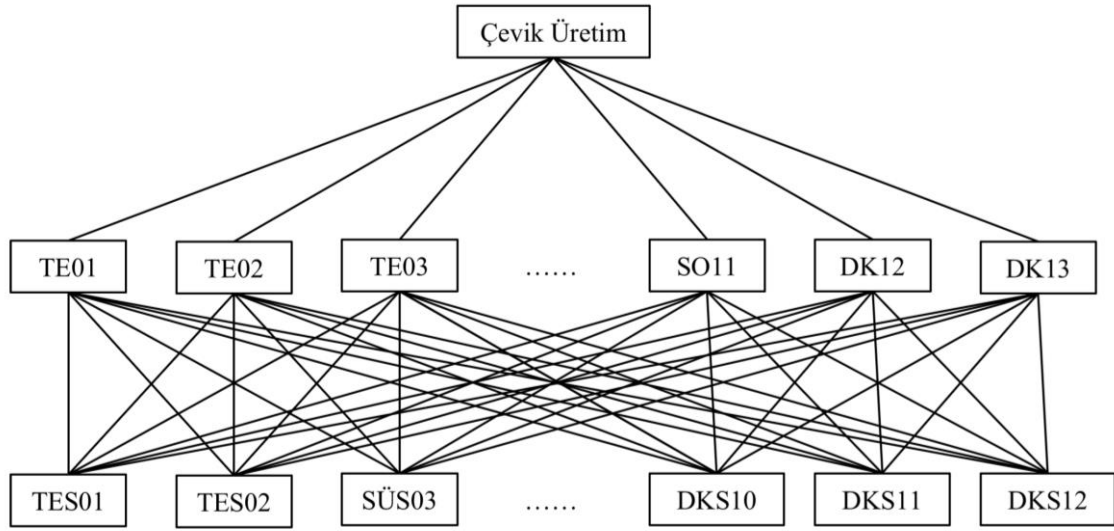
Tablo 3.5'te bilgileri yer alan uzmanların tamamı erkek olup, yaş ortalamaları 36'dır. Uzmanların ortalama İDA deneyimleri yaklaşık 4 yılken; toplam mesleki deneyim süreleri ortalama 12 yıldır. Bu anlamda BDELPHI'deki uzman profiliyle BTOPSIS'deki uzman profilinin oldukça yüksek düzeyde benzerlik gösterdiği söylenebilir. Tıpkı BDELPHI aşamasında olduğu gibi, bu aşamada da deneyim sürelerinin ve yaşların ortalamasının bir konuda uzmanlık sahibi olabilmek için yeterli olmayacağı düşünülebilir. Ancak İDA sektörünün geçmişinin çok da eskiye dayanmadığı unutulmamalıdır. Bu nedenle ortalamaların bu seviyede olmasının olağan bir durum olduğu düşünülmektedir.

Bu bilgiler ışığında analizin ikinci aşaması gerçekleştirilmiştir. BTOPSIS yönteminin uygulanabilmesi için karar kriter ve alternatiflerine; ek olarak bu ifadeleri değerlendirecek karar vericilere ihtiyaç vardır. Bir işletmenin çevik olabilmek adına kendisi için en iyi stratejiyi belirlemeye çalışması bir grup çok kriterli karar verme problemidir ve aşağıdaki kümeler aracılığıyla tanımlanabilir (Chen vd., 2006: 294):

- $D = \{D_1, D_2, \dots, D_k\}$ olarak adlandırılan K karar vericisinden oluşan bir küme
- $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ olarak adlandırılan m adet olası stratejiden oluşan bir küme
- $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ olarak adlandırılan işletmelerin çeviklik performanslarının değerlendirildiği n adet kriterden oluşan bir küme
- A_i ($i = 1, 2, \dots, m$) alternatiflerinin C_j ($j = 1, 2, \dots, n$) kriterlerine göre performans değerlendirmelerini içeren ve $X = \{x_{ij}; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n\}$ olarak adlandırılan bir değerlendirme kümesi

Bu çalışmada, işletmelerin süreçlerini çevikleştirebilmek adına hedeflemeleri gereken stratejilerin ÇYG'ler göz önünde bulundurularak değerlendirilmesi sonucunda en uygun stratejinin belirlenmesi için Junior vd. (2014), Majumdar vd. (2021) ve Agarwal vd. (2023) de uyguladığı BTOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Yöntemin algoritmasına uygun olarak, kriterler ve bu kriterler bazında alternatiflere ilişkin değerlendirmeler üçgen bulanık sayılara dönüştürülür; ardından kriter ağırlık matrisi ile bulanık karar matrisi oluşturulur. Bu matris normalize edilir ve kriter ağırlıklarıyla çarpılarak ağırlıklı normalize edilmiş bulanık karar matrisi elde edilir. Daha sonra, her alternatifin Bulanık Pozitif İdeal Çözüm (FPIS) ve Bulanık Negatif İdeal Çözüm (FNIS) noktalarına olan uzaklıkları, üçgen bulanık sayılar arasında uzaklık ölçmeye yarayan köşe noktası (Vertex) yöntemiyle hesaplanır. Bu uzaklıklardan elde edilen yakınlık katsayıları doğrultusunda, alternatiflerin öncelik sıralamaları belirlenir. Karar verme sürecinde matematiksel işlemlerin karmaşıklığından kaçınmak için, farklı kriter ölççeklerini karşılaştırılabilir ölçeklere dönüştürmek amacıyla doğrusal ölçek dönüşümü kullanılmıştır. Kriter kümesi; fayda kriterleri (değer arttıkça tercih edilebilirlik artar) ve maliyet

kriterleri (değer azaldıkça tercih edilebilirlik artar) olarak ikiye ayrılabilir (Chen vd., 2006: 295). Bu çalışmada yer alan kriterler fayda kriterleridir. Bu bilgiler doğrultusunda bu çalışmada gerçekleştirilen matematiksel hesaplamaların detaylarına aşağıda yer verilmiştir. BTOPSIS yöntemi ile sürdürülebilir nitelikli bir çevik üretim sistemi sağlayabilmek adına önceliklendirilmesi gereken ÇS'lerin belirlenmesi için oluşturulan karar probleminin hiyerarşik yapısı Şekil 3.2'deki gibidir.



Şekil 3.2 Karar Probleminin Hiyerarşik Yapısı

Kaynak: Şekil, yazar tarafından oluşturulmuştur.

Aşırı karmaşıklık karşısında kesinlikten geri adım atıldığında, sayısal değerler yerine doğal ya da yapay bir dildeki kelime veya cümlelerle tanımlanan değişkenler, yani “dilsel değişkenler” olarak adlandırılabilen yapıların kullanımı söz konusu olabilir. Dilsel değişken kavramı, geleneksel nicel ifadelerle makul biçimde tanımlanamayacak kadar karmaşık veya belirsiz olan durumlarla başa çıkmada oldukça kullanışlıdır (Zimmermann, 2011: 141). Dilsel değişken, değerleri dilsel ifadeler olan ve genellikle bulanık sayılarla modellenen değişken türüdür (Zadeh, 1975: 199). Karar vericiler kriterlerin önem düzeylerini kendileri belirliyorsay bu değişkenlere göre kriterlerin ağırlıklarını belirtir; aynı zamanda kriterlere göre alternatifleri değerlendirmek için yine bu değişkenlerden uygun gördükleri ile puanlama yaparlar. Bu çalışmada yer alan dilsel değişkenler ve üçgen bulanık sayı karşılıkları Tablo 3.6’da gösterilmiştir.

Tablo 3.6 Dilsel Değişkenler ve Üçgen Bulanık Sayı Karşılıkları

Dilsel Değişkenler	Üçgen Bulanık Sayılar	
	ÇYG Ağırlık Hesaplaması İçin	ÇS İkili Karşılaştırma İçin
Önemsiz (ÖD)	(0,1-0,1-0,3)	(1,1,3)
Az derecede önemli (AÖ)	(0,1-0,3-0,5)	(1,3,5)
Orta derecede önemli (OÖ)	(0,3-0,5-0,7)	(3,5,7)

Önemli (Ö)	(0,5-0,7-0,9)	(5,7,9)
Son derece önemli (ÇÖ)	(0,7-0,9-0,9)	(7,9,9)

Kaynak: Tablo, yazar tarafından Agarwal ve diğerlerinin (2023: 3679) çalışması temel alınarak oluşturulmuştur.

Bir karar grubu K tane karar vericisinden oluşmaktadır ve K'ncı karar vericinin j'inci kriter için verdiği önem ağırlığı formül 4 ile hesaplanır:

$$\widetilde{w}_j = \frac{1}{K} [\widetilde{w}_j^1 + \widetilde{w}_j^2 + \dots + \widetilde{w}_j^K] \quad (4)$$

Bu çalışmada model geliştirici tarafından bütün kriterlerin aynı önem düzeyinde olduğu varsayılmış ve sabit önem düzeyi kullanılmıştır. Bunun nedeni, karar vericilerin farklı işletmelerde ve pozisyonlarda çalışan uzmanlar olması nedeniyle kriterlerin objektif olarak ağırlıklandırılama riskinin dikkate alınmasıdır. Sonuçta farklı kuruluşlarda yer alan bir tasarımcı, bir yönetici ya da bir yazılımcının kriterleri aynı mantık çerçevesinde derecelendirmesi mümkün değildir. Bu çalışma aynı işletme içerisindeki kişilerle ya da farklı işletmelerde ama aynı pozisyondaki kişilerle gerçekleştirilseydi, karar vericilerin kriter ağırlıklarını değerlendirmesi daha tutarlı sonuçların elde edilmesini sağlayabilir; bu koşullar altında uzmanların kişisel deneyimleri bir fark yaratabilirdi. İDA alanı halihazırda yeni sayılabilecek bir teknolojidir ve bu alandaki görece deneyimli uzmanların sayısı oldukça kısıtlıdır. Dolayısıyla uzman profillerinin çeşitlilik göstermesi kaçınılmaz olmuştur. Bu kadar yeni ve kendi içinde belirsiz bir alanda, kriter ağırlıklarının da uzmanlar tarafından belirlenmesi tercih edilmemiştir. Ayrıca İDA alanında daha önce bu kapsamda bir çalışmanın gerçekleştirilmemiş olması nedeniyle görece genellenebilir sonuçlara ulaşabilmek adına kriterlerin sabit önem ağırlıklarıyla analize girmesine karar verilmiştir. Karar verilen sabit önem ağırlığının dilsel ifadesi “Son Derece Önemli” olup, kriter ağırlık hesaplamasında kullanılacak bulanık sayı karşılıkları Tablo 3.6’da da gösterildiği gibi (0,7-0,9-0,9) olarak belirlenmiştir.

Ardından uzmanlar, yine Tablo 3.6’da yer alan dilsel değişkenleri baz alarak her bir alternatifi her bir kriteri göz önünde bulundurarak değerlendirmiştir. Buna göre Tablo 3.7’de karar vericilerin alternatiflerin, ilk kriter olan TE01’e göre dilsel değişkenlerle değerlendirmelerine yer verilmiştir. Bu çalışmada yer alan kriter ve alternatif sayılarının fazla olması nedeniyle analiz tablolarının boyutları oldukça büyüktür; bu nedenle örnek gösterilmesi adına sadece birinci kritere ait dilsel değerlendirmelere yer verilmiştir. Dilsel değerlendirmelerin kısaltmalarında, analiz kısmındaki kodlamada karışıklık yaşanmaması adına bazı değişiklikler yapılmıştır. Soru formunda yer alan “Önemsiz” ifadesi aynı zamanda “Önemli Değil” anlamına geldiği için kısaltması ÖD olarak, “Son Derece Önemli” ifadesi de aynı zamanda “Çok Önemli” anlamına geldiği için kısaltması ÇÖ olarak kullanılmıştır. Diğer ifadeler soru formundaki halleriyle uyumlu olacak şekilde (AÖ-Az derecede önemli, OÖ-Orta derecede önemli, Ö-Önemli) kısaltılmıştır.

Tablo 3.7 Karar Vericilerin TE01 Kriterine Göre Alternatifleri Dilsel Değişkenlerle Değerlendirmesi

Kriter	Alternatifler	U1	U2	U3	U4	U5
TE01	TES01	Ö	Ö	Ö	ÇÖ	ÇÖ
	TES02	Ö	Ö	ÇÖ	ÇÖ	ÇÖ
	SÜS03	Ö	ÇÖ	Ö	ÇÖ	ÇÖ
	TZS04	ÇÖ	OÖ	Ö	ÇÖ	ÇÖ
	MTS05	ÇÖ	ÇÖ	ÇÖ	ÇÖ	ÇÖ
	SOS06	OÖ	ÇÖ	Ö	ÇÖ	ÇÖ
	SOS07	ÇÖ	Ö	ÇÖ	ÇÖ	ÇÖ
	SOS08	Ö	ÇÖ	ÇÖ	ÇÖ	ÇÖ
	DKS09	ÇÖ	ÇÖ	ÇÖ	ÇÖ	Ö
	DKS10	Ö	Ö	ÇÖ	ÇÖ	Ö
	DKS11	ÇÖ	ÇÖ	ÇÖ	ÇÖ	Ö
	DKS12	OÖ	ÇÖ	ÇÖ	ÇÖ	Ö

Kaynak: Tablo, yazar tarafından oluşturulmuştur.

Uzmanların dilsel ifadelerde görüşlerini belirttiği değerler, Tablo 3.6'da yer alan stratejilerin, yani alternatiflerin ikili karşılaştırması için gösterilen bulanık sayılar ile bulanıklaştırılmıştır. Tablo 3.8'de, yine yalnızca TE01 kriterine ait alternatiflerin dilsel değerlendirme sonuçlarının üçgen bulanık sayılar şeklinde ifadesine yer verilmiştir.

Tablo 3.8 TE01 Kriterine Göre Alternatiflerin Değerlendirme Sonuçlarının Üçgen Bulanık Sayı Karşılıkları

Kriter	Alternatif	KV01			KV02			KV03			KV04			KV05		
TE01	TES01	5	7	9	5	7	9	5	7	9	7	9	9	7	9	9
	TES02	5	7	9	5	7	9	7	9	9	7	9	9	7	9	9
	SÜS03	5	7	9	7	9	9	5	7	9	7	9	9	7	9	9
	TZS04	7	9	9	3	5	7	5	7	9	7	9	9	7	9	9
	MTS05	7	9	9	7	9	9	7	9	9	7	9	9	7	9	9
	SOS06	3	5	7	7	9	9	5	7	9	7	9	9	7	9	9
	SOS07	7	9	9	5	7	9	7	9	9	7	9	9	7	9	9
	SOS08	5	7	9	7	9	9	7	9	9	7	9	9	7	9	9
	DKS09	7	9	9	7	9	9	7	9	9	7	9	9	5	7	9
	DKS10	5	7	9	5	7	9	7	9	9	7	9	9	5	7	9
	DKS11	7	9	9	7	9	9	7	9	9	7	9	9	5	7	9
	DKS12	3	5	7	7	9	9	7	9	9	7	9	9	5	7	9

Kaynak: Tablo, yazar tarafından oluşturulmuştur.

BTOPSIS yönteminde tüm kriterler ve alternatifler için bulanık değerlere ulaşıldıktan sonra, n kriter ve m alternatiften oluşan bir Bulanık Karar Matrisi ($\tilde{D}$) (Tablo 3.9) ile kriter ağırlıklarını içeren vektör ($\tilde{W}$) yapılandırılır.

Tablo 3.9 Örnek Bulanık Karar Matrisi ($\tilde{D}$)

	C_1	C_2	$\dots$	C_n
A_1	$\tilde{x}_{11}$	$\tilde{x}_{12}$	$\dots$	$\tilde{x}_{1n}$
A_2	$\tilde{x}_{21}$	$\tilde{x}_{22}$	$\dots$	$\tilde{x}_{2n}$
$\vdots$	$\tilde{x}_{i1}$	$\tilde{x}_{i2}$	$\dots$	$\tilde{x}_{in}$
A_m	$\tilde{x}_{m1}$	$\tilde{x}_{m2}$	$\dots$	$\tilde{x}_{mn}$

Kaynak: Tablo, yazar tarafından oluşturulmuştur.

Burada, K'ncı karar vericinin i'inci alternatifin j'inci kritere göre değerlendirmesinin hesaplanması formül 5'e göre gerçekleştirilir:

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{1}{K} [\tilde{x}_{ij}^1 + \tilde{x}_{ij}^2 + \dots + \tilde{x}_{ij}^K] \quad (5)$$

Daha önce belirtildiği üzere bu çalışmada sabit kriter ağırlığı (0,7-0,9-0,9) kullanılmıştır. Buna göre elde edilen bulanık karar matrisinin TE01 kriterine ait kesiti Tablo 3.10'da gösterilmiştir. İlerleyen tablo gösterimlerinde tutarlılığı sağlamak adına TE01 kriterine ait değerler gösterilmeye devam edilecektir.

Tablo 3.10 Bulanık Karar Matrisi

		TE01 Kriteri		
Alternatifler	TES01	5,80	7,80	9,00
	TES02	6,20	8,20	9,00
	SÜS03	6,20	8,20	9,00
	TZS04	5,80	7,80	8,60
	MTS05	7,00	9,00	9,00
	SOS06	5,80	7,80	8,60
	SOS07	6,60	8,60	9,00
	SOS08	6,60	8,60	9,00
	DKS09	6,60	8,60	9,00
	DKS10	5,80	7,80	9,00
	DKS11	6,60	8,60	9,00
	DKS12	5,80	7,80	8,60

Kaynak: Tablo, yazar tarafından oluşturulmuştur.

Bulanık karar matrisinin oluşturulmasının ardından, bir sonraki adım bu matrisin normalize edilmesidir. Normalize etme işlemi, her bir sütundaki büyük ya da küçük değerlerin kendi içinde orantılanarak [0–1] aralığına indirgenmesini sağlar. Aşağıda verilen formül (6) kullanılarak, bulanık karar matrisi normalize edilir ve elde edilen normalize edilmiş bulanık karar matrisi $\{\tilde{R}\}$ ile ifade edilir.

$$\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]_{m \times n} \quad ; \quad i=1, 2, \dots, m, \quad j=1, 2, \dots, n \quad (6)$$

Bu formülün uygulanması sonucu elde edilen normalize edilmiş bulanık karar matrisi Tablo 3.11'de gösterilmektedir.

Tablo 3.11 Normalize Edilmiş Bulanık Karar Matrisi

		TE01 Kriteri		
Alternatifler	TES01	0,64	0,87	1,00
	TES02	0,69	0,91	1,00
	SÜS03	0,69	0,91	1,00
	TZS04	0,64	0,87	0,96
	MTS05	0,78	1,00	1,00
	SOS06	0,64	0,87	0,96
	SOS07	0,73	0,96	1,00
	SOS08	0,73	0,96	1,00
	DKS09	0,73	0,96	1,00
	DKS10	0,64	0,87	1,00
	DKS11	0,73	0,96	1,00
	DKS12	0,64	0,87	0,96

Kaynak: Tablo, yazar tarafından oluşturulmuştur.

Karar kriterleri genellikle alternatifin puanı arttıkça performansın iyileştiği fayda kriterleri (örneğin, kâr) ve alternatifin puanı azaldıkça performansın iyileştiği maliyet kriterleri (örneğin, fiyat) olmak üzere iki kategoriye ayrılır (Roy, 1996: 272; Cinelli vd., 2014: 139; Al Mohamed vd., 2023: 4). Fayda (B) (formül 7) ve maliyet (C) (formül 8) kriterleri aşağıdaki formüllerle hesaplanmaktadır:

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j}, \frac{b_{ij}}{c_j}, \frac{c_{ij}}{c_j} \right), \quad j \in B, \quad c_j^+ = \max_i c_{ij} \quad (7)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_j^-}{c_{ij}}, \frac{a_j^-}{b_{ij}}, \frac{a_j^-}{a_{ij}} \right), \quad j \in C, \quad a_j^- = \min_i a_{ij} \quad (8)$$

Formül sözel olarak ifade edilirse; normalize edilmiş bulanık karar matrisi, eğer ilgili kriter bir fayda kriteri ise, her sütundaki bulanık elemanların, o sütundaki üçüncü bileşenler (yani maksimum değerler) arasından en büyüğüne bölünmesiyle elde edilir. Eğer kriter bir maliyet kriteri ise, normalize işlemi her sütundaki elemanların, o sütundaki birinci bileşenler (yani minimum değerler) arasından en küçüğüne bölünmesi yoluyla gerçekleştirilir. Normalize edilmiş bulanık karar matrisinin oluşturulmasının ardından, her bir karar kriterinin farklı önem derecelerine sahip olabileceği göz önünde bulundurularak, ağırlıklı normalize bulanık karar matrisi elde edilir:

$$\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}]_{m \times n} \quad i=1, 2, \dots, m \quad j=1, 2, \dots, n \quad (9)$$

Ağırlıklı normalize bulanık karar matrisinin elemanları şu şekilde (10) hesaplanır:

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{x}_{ij} \times \tilde{w}_j \quad (10)$$

Bu formüller ve sabit kriter ağırlığı göz önünde bulundurularak elde edilen Ağırlıklı Normalize Edilmiş Bulanık Karar Matrisi Tablo 3.12’de gösterilmektedir:

Tablo 3.12 Ağırlıklı Normalize Edilmiş Bulanık Karar Matrisi

		TE01 Kriteri		
Alternatifler	TES01	0,45	0,61	0,90
	TES02	0,48	0,64	0,90
	SÜS03	0,48	0,64	0,90
	TZS04	0,45	0,61	0,86
	MTS05	0,54	0,70	0,90
	SOS06	0,45	0,61	0,86
	SOS07	0,51	0,67	0,90
	SOS08	0,51	0,67	0,90
	DKS09	0,51	0,67	0,90
	DKS10	0,45	0,61	0,90
	DKS11	0,51	0,67	0,90
	DKS12	0,45	0,61	0,86

Kaynak: Tablo, yazar tarafından oluşturulmuştur.

Başka bir deyişle, ağırlıklı normalize edilmiş bulanık karar matrisi; normalize edilmiş bulanık karar matrisindeki her bir değerin, ait olduğu karar kriterinin bulanık ağırlığıyla çarpılması sonucu elde edilmektedir. Bu matris içerisinde her $\tilde{v}_{ij}$ elemanı, $[0, 1]$ aralığında yer alan normalize edilmiş pozitif üçgen bulanık bir sayıdır ve tüm i, j değerleri için geçerlidir. Buna göre FPIS (A^+) ve FNIS (A^-) şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$A^+ = \{\tilde{v}_1^+, \tilde{v}_2^+, \dots, \tilde{v}_m^+\}$$

$$A^- = \{\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_j^-, \dots, \tilde{v}_m^-\}$$

Burada $\tilde{v}_j^+ = (1, 1, 1)$ ve $\tilde{v}_j^- = (0, 0, 0)$ olarak tanımlanır. Her bir alternatifin pozitif ve negatif ideal çözümlere olan uzaklıkları, sırasıyla $\tilde{v}_j^+$ ve $\tilde{v}_j^-$ değerlerine göre hesaplanır:

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^n d_v(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+) \quad (11)$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n d_v(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-) \quad (12)$$

Tablo 3.13 Pozitif İdeal Çözümlere Olan Uzaklıklar

FPIS	Alternatifler											
	TES01 ⁺	TES02 ⁺	SÜS03 ⁺	TZS04 ⁺	MTS05 ⁺	SOS06 ⁺	SOS07 ⁺	SOS08 ⁺	DKS09 ⁺	DKS10 ⁺	DKS11 ⁺	DKS12 ⁺
TE01	0,3941	0,3694	0,3694	0,3982	0,3202	0,3982	0,3447	0,3447	0,3447	0,3941	0,3447	0,3982

Kaynak: Tablo, yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 3.14 Negatif İdeal Çözümlere Olan Uzaklıklar

FNIS	Alternatifler											
	TES01 ⁻	TES02 ⁻	SÜS03 ⁻	TZS04 ⁻	MTS05 ⁻	SOS06 ⁻	SOS07 ⁻	SOS08 ⁻	DKS09 ⁻	DKS10 ⁻	DKS11 ⁻	DKS12 ⁻
TE01	0,6786	0,6951	0,6951	0,6611	0,7295	0,6611	0,7120	0,7120	0,7120	0,6786	0,7120	0,6611

Kaynak: Tablo, yazar tarafından oluşturulmuştur.

Ardından her alternatifin FPIS(A⁺) ve FNIS (A⁻) olan uzaklıkları sırasıyla hesaplanmıştır. Burada d(..., ...), iki bulanık sayı arasındaki mesafe köşe noktası (Vertex) yöntemi ile hesaplanır. Buna göre elde edilen alternatiflerin uzaklık değerleri Tablo 3.15'te gösterilmiştir.

Tablo 3.15 Alternatiflerin FPIS ve FNIS'ue Olan Uzaklıkları

Alternatifler	D ⁺	D ⁻
TES01	4,9508	8,8513
TES02	5,205	8,5791
SÜS03	5,1236	8,7362
TZS04	5,4188	8,3513
MTS05	5,219	8,6017
SOS06	5,2392	8,6027
SOS07	5,3961	8,3967
SOS08	5,4798	8,386
DKS09	5,2136	8,5912
DKS10	5,1983	8,5968
DKS11	5,2467	8,5837
DKS12	5,2966	8,533

Kaynak: Tablo, yazar tarafından oluşturulmuştur.

Pozitif ve negatif ideal çözümlere olan uzaklıkların hesaplanmasının ardından, alternatiflerin öncelik sıralamasını belirlemek amacıyla her alternatif için yakınlık katsayısı (CC_i) formül 13 ile hesaplanır. Yakınlık katsayısı, bir alternatifin FPIS A⁺ ve FNIS A⁻ noktalarına olan uzaklıklarını eş zamanlı olarak dikkate alır. Her alternatifin yakınlık katsayısı aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$CC_i = d^-_i / (d^+_i + d^-_i) \quad (13)$$

Burada;

d_i⁺: i. alternatifin pozitif ideal çözüme uzaklığı

d_i⁻: i. alternatifin negatif ideal çözüme uzaklığı

CC_i: i. alternatifin ideal çözüme göreceli yakınlığı

CC_i değeri [0, 1] aralığındadır ve 1'e ne kadar yakınsa o kadar tercih edilebilir. Alternatiflerin sıralaması, yakınlık katsayısı (CC_i) değerlerine göre azalan şekilde yapılır. En iyi alternatif, FPIS noktasına en yakın, FNIS noktasına ise en uzak olan alternatiftir. (Junior vd., 2014: 198). Buna göre, sıralanan hesaplamaların uygulanması sonucunda bu çalışmada elde edilen alternatif sıralaması Tablo 3.16'da gösterilmiştir.

Tablo 3.16 Bulanık TOPSIS'e Göre Çeviklik Stratejileri Alternatiflerinin Sıralaması

Alternatif/Strateji Kodları	CC _i	Sıralama
TES01	0,641302	1
SÜS03	0,630329	2
DKS10	0,623179	3
TES02	0,622394	4
MTS05	0,622380	5
DKS09	0,622335	6
SOS06	0,621497	7
DKS11	0,620642	8
DKS12	0,617007	9
SOS07	0,608772	10
TZS04	0,606481	11
SOS08	0,604797	12

Kaynak: Tablo, yazar tarafından oluşturulmuştur.

Sonuç olarak, yapılan hesaplamalar Tablo 3.16'da sunulan üstünlük sıralamasını ortaya koymuştur. Buna göre, TES1 stratejisi en iyi alternatif olarak belirlenmiş; SOS08 ise en düşük CC_i ile son sırayı almıştır. Hem BDELPHI hem de BTOPSIS hakkındaki bulgular ve görüşler bir sonraki bölümde detaylı bir şekilde ele alınacaktır.

3.6. Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde, analizlerde elde edilen bulgular sunulmakta ve bu bulguların kavramsal çerçeve ile ilişkisi tartışılmaktadır. Her bir bulgu hem kendi bağlamı içinde değerlendirilmiş hem de literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Böylece araştırmanın, literatüre katkısı ve uygulama alanına yansımaları bütüncül bir biçimde ele alınmıştır. Bu bölümde önce BDELPHI ardından BTOPSIS bulguları yorumlanacak olup ardından Sonuç bölümüne geçilecektir.

Bu çalışma, İDA üretim süreçlerinin çevik üretim yaklaşımıyla gerçekleştirilebilmesi ve daha sürdürülebilir bir hale gelebilmesi için işletmelerin hedeflemeleri gereken ÇS'lerin öncelikli sıralamalarının elde edilmesi; bu ÇS'leri hayata geçirebilmek için sahip olunması uzmanlarca görüş birliği ile önerilen ÇYG'lerin belirlenmesi amacıyla birbirini takip eden BDELPHI ve BTOPSIS analizleriyle gerçekleştirilmiştir. Soru formunda yer alan ifadelerin her biri literatür taraması sonucunda elde edilmiş; ilgili ifadelerin hangi kaynaklardan temin edildiğine dair bilgiler Birinci Bölüm'de sunulmuştur.

Analizin hem birinci aşamasında hem de ikinci aşamasında birbirinden farklı işletmelerde farklı pozisyonlarda (mühendis, tasarımcı, yönetici, araştırmacı vb.) çalışan uzmanların görüşlerine yer verilmiştir. BTOPSIS'te yer alan 5 uzmandan 4'ü BDELPHI yönteminde de yer almıştır. Bu farklılıkların araştırmanın çok yönlülüğü ve bütünleştirici yapısı

ile uyum göstermekte olduğu ve konunun değişik bakış açılarıyla farklı koşullar altında değerlendirilmesine yardımcı olduğu düşünülmektedir. Böylece daha geniş çerçevede bir uzlaş sağlanması hedeflenmiştir.

3.6.1. Bulanık Delphi Bulguları

BDELPHI sonuçları göz önünde bulundurulduğunda bazı ÇYG kategorilerinde hiç ifade kalmadığı, bazılarında hepsinin ikinci analize kabul edildiği görülebilir. Öncelikle Teknoloji ve Endüstri 4.0 kategorisi incelenmiş, bu kategoride yer alan 13 ifadenin yalnızca 3'ünün kabul edildiği tespit edilmiştir. Kabul edilen ifadeler şu şekildedir:

- Teknolojik yeniliklerin takip edilmesi, erken benimsenmesi ve uygulanması.
- Otonom, çevik ve proaktif hiper-bağlantılı bir üretim ekosistemi geliştirmek için eklemeli üretim, artırılmış gerçeklik, CPS, bilişsel/otonom robotlar, dijital ikiz, gömülü IoT, uç bilişim ve akıllı sensörlerin kullanılması.
- İnsansız deniz araçlarının; istihbarat, gözetleme, keşif devriyesi ve kıyı limanı savunma gibi görevlerini yerine getirmek için aktif bir veri/iletişim bağlantısına sahip olması.

BTOPSIS analizinden bağımsız olarak, yüksek teknoloji odaklı sektörlerden biri olan İDA, yeniliklerin erken benimsenmesini ve uygulanmasını gerektiren bir sektör olduğu için bu kategori için elde edilen sonuçların beklentiye uygun olduğu söylenebilir. Özellikle insansız sistemlerin ihtiyaç duyduğu otonomi, dijital ikiz, AR ve sensör teknolojisi gibi Endüstri 4.0 teknolojilerinin kullanılması konusunda görüş birliğinin olması diğer ifadedeki kabul durumunu da doğrular niteliktedir. Ayrıca İDA kapsamındaki yayınlardan edinilen ifadenin kabul edilirken, denizcilik kapsamındaki yayınlardan edinilen ifadenin kabul edilmemesi, bu iki alanın çok ortak noktası olmasına rağmen üretim süreçleri ve teknoloji bağlamında oldukça farklılaştıklarının bir göstergesi olabilir. Ek olarak, kabul edilen ifadelerin ortak noktası genellikle teknolojinin ve Endüstri 4.0'ın görece olgunlaşmış kavram ve olgularına dayanması olduğu söylenebilir. Bu durum, her ne kadar kategorideki çoğu ifade reddedilse de teknoloji bileşenlerinin çevikliğe katkısı konusunda uzmanlar arasında anlamlı bir uzlaş olduğu gösterebilir. Üzerinde uzlaş sağlandığı düşünülen yeni nesil robot özelliklerinin üretim süreçlerini daha otonom, esnek ve iş birliğine açık hâle getirdiği görülmektedir (Rüßmann vd., 2015: 56). Otonom sistemler ve entegre robotlar insanlarla güvenli şekilde çalışabilmekte ve onlardan AI yetenekleri sayesinde iş süreçleri hakkında bir şeyler öğrenebilmektedir. Artık bu robotlar daha düşük maliyetle daha geniş bir yetenek yelpazesi sunmaktadır. Dolayısıyla bu şekilde üretim süreçlerinin çevik ve sürdürülebilir bir nitelik kazanması beklenebilir. Reddedilen ifadeler değerlendirildiğinde, bu ifadelerin bazılarının çok spesifik özelliklere

vurgu yaptığı, bazılarının ise ileri düzey entegrasyon ve sistemsel dönüşüm içerdiği düşünülebilir. Bu nedenle bu ifadelerin bazı uzmanlar için yeterince kritik olmadığı ya da tüm İDA projelerine uygulanabilir algılanmadığı söylenebilir.

Kategori bazında değerlendirmek gerekirse, sektörün teknoloji ve Endüstri 4.0 ile bağlantısı düşünüldüğünde, uzmanların bu kategorideki bütün ifadelerin sadece %23'ünde uzlaşma sağlanmasının bu kategoriye şaşırtıcı bir şekilde mesafeli bir yaklaşım sergilediklerinin göstergesi olduğu söylenebilir. Yani “Teknoloji ve Endüstri 4.0” ifadelerinin çeviklikle ilişkilendirilmesinde hâlâ seçici veya bağlamsal bir bakış açısının geçerli olduğu düşünülmektedir. Öte yandan, bu kategori altındaki ifadelerin bir kısmının fazla soyut veya fazla geniş tanımlanmış olabileceğinden dolayı sonuçların bu şekilde elde edilmiş olabileceği ihtimal dahilindedir. Sonuç olarak kurumsal çeviklik, sadece insan becerilerine ya da süreç tasarımına değil; aynı zamanda teknolojik altyapılara da bağlıdır. İş süreçlerinde esneklik ve hızlı karar alma gibi kurumsal yeteneklerin birbirine uyumlu hâle getirilmesi, işletmenin teknolojiye nasıl faydalandığını ortaya koyması açısından önemlidir. Teknolojinin kurumsal yeteneklere entegre edilmesi ister içsel bir motivasyonla ister küresel bir kriz ya da müşteri talebi gibi dış çevre baskısıyla oluşmuş olsun her durumda kurumsal çevikliğin şekillenmesinde aktif bir rol oynayacaktır (Crick ve Chew, 2017: 635). Öte yandan bu etkinin uzun vadeli görülebilmesi için iş süreçlerinin ve bu yeteneklerin ne kadar örtüştüğüne bakılması gereklidir.

Bu araştırmanın çıkış noktasını, çevik üretimin Endüstri 4.0 teknolojileri sayesinde aynı zamanda sürdürülebilir bir yapıya kavuşup kavuşamayacağına ilişkin bir değerlendirme yapmak oluşturmuştur. Araştırma süreci ilerledikçe çalışma hem kapsam olarak genişlemiş hem de özellikle İDA sektörüne odaklanarak daha özgün ve spesifik bir çerçeveye oturmuştur. Bu temel amaç doğrultusunda yürütülen ilk analiz olan BDELPHI analizinin sonuçları incelendiğinde, “sürdürülebilirlik” kategorisinde yer alan hiçbir ifadenin uzman uzlaşmasına ulaşamaması; aynı zamanda ÇS’lerdeki sürdürülebilirlik kategorisinde ise yalnızca bir ifadenin kabul edilmiş olması, bu temel araştırma sorusunu desteklemeyen bir bulgu olarak öne çıkmaktadır. Uzlaşının olmaması elbette işletmelerin ve uzmanların bu konuda herhangi bir faaliyet göstermediği anlamına gelmemekle birlikte, yeterli bilinç düzeyinin ya da ortak aklın hala oluşmadığının bir göstergesi olarak düşünülmektedir.

Sanayi üretiminin dönüşümü, sürdürülebilir kalkınma için en dirençli zorluklardan biri olup; teknolojik gelişmelerin sürdürülebilirlik anlamında olumlu etki edeceği düşünülse de literatürde Endüstri 4.0’ın bu dönüşüme ne ölçüde katkı sağlayacağıyla ilgili tartışmalar mevcuttur (Beier vd., 2020: 11). Birçok çalışmada Endüstri 4.0’ın bir sonucu olarak kaynak verimliliğinin ve dolayısıyla çevreci yaklaşımların arttığı iddia edilmekte ancak bu

kazanımların hangi koşullar altında bekleneceği ve hangi seviyede gerçekleşeceği açıklığa kavuşturulmamıştır (Hickel ve Kallis, 2020: 470).

Birbirine bağlı bir üretime katılan tüm işletmelerin Endüstri 4.0'ı mümkün kılmak için özellikle modern bilgi ve iletişim teknolojilerinde aşama kat etmesi gerekmektedir. Her ne kadar BM, Avrupa Birliği ve OECD (Ekonomik Kalkınma ve İş birliği Örgütü) gibi iklim değişikliği, sürdürülebilir enerji ve sanayi kalkınmasının kesişiminde faaliyet gösteren hükümetler arası kuruluşlar sanayi süreçlerinin dijital dönüşümünü iklim değişikliğiyle mücadele çerçevesinde değerlendirmeye başlamışlarsa da bu durumun iş dünyasında aynı çerçeveye sahip olmadığı düşünülebilir. Bu kuruluşların sanayi sektörünün daha iklim dostu ve sürdürülebilir üretim modellerine dönüşümünde dijital teknolojilerin rolüne ilişkin bir söylem geliştirmekte olduğunu ileri süren çalışmalar literatürde mevcuttur (Fritzsche vd., 2018: 2); ancak Endüstri 4.0'ın hala gelişmeye açık bir konumda olması ve faydalarıyla ilgili kanıtların değişkenliği bu söylemlerin pratikte karşılık bulmasını zorlaştırabilmektedir. Bir başka ifadeyle, Endüstri 4.0 teknolojilerinin sanayide enerji ve kaynak verimliliğini artırma ve yenilenebilir enerjilerin elektrik üretimine entegrasyonuna katkı sağlama gibi potansiyellerine dikkat çekilmekte, ancak bu potansiyellerin sonuçları hakkında somut görüşler değişkenlik yaratmakta ve bu nedenle sürecin akıbeti belirsiz kalmaktadır.

Sonuç olarak; bulgular uzmanların sürdürülebilirlik kategorisindeki ÇYG'lerin İDA üretim süreçlerinde çeviklik açısından belirleyici olmadığını düşündüklerini işaret ediyor olabilir. Bu durum, İDA sektörünün hâlen verimlilik ve teknik uygunluk gibi konuları önceliklendirdiğini, sürdürülebilirlik temelli çeviklik göstergelerine ise sınırlı önem verdiğini düşündürülebilir. Endüstri 4.0 teknolojileri çeviklikle sıkı ilişkilidir; ancak bu teknolojilerin doğrudan sürdürülebilirlik bağlamında etkisi henüz tüm uzmanlarca güçlü bir çeviklik belirleyicisi olarak görülüyor olabilir. Özellikle İDA gibi proje bazlı üretimlerde, çevresel ya da sosyal sürdürülebilirlik göstergeleri ikinci planda tutulabilir. Bu durum sektörde çeviklik ve sürdürülebilirlik ilişkisi açısından boşluklar olabileceğini göstermektedir.

Bir sonraki ÇYG kategorisi olan Tedarik Zinciri hem dijitalleşmenin hem de sürdürülebilirliğin çeviklik bağlamında somutlaştığı kritik bir alan olarak değerlendirilebilir. Ancak bu kategorideki 4 ifadenin hiçbirinin uzman uzlaşısına ulaşamaması, bu değerlendirmenin sektör bazında bir karşılığının olmadığına işareti sayılabilir. Çeviklik ve tedarik zinciri arasında var olması beklenen ilişkinin, İDA sektöründeki uzmanlar açısından anlamsız ya da zayıf kaldığı düşünülebilir. Oysa Shekarian vd. (2020), Mubarik vd. (2021) ve Ghobakhloo vd. (2025) gibi çalışmalarda, Endüstri 4.0 uygulamalarının tedarik zincirinin çevikliğinde önemli işlevsel ilişkiler yarattığı; özellikle görünürlük, esneklik ve yanıt

verebilirlik gibi kavramlar arasında nedensel bağlar oluşturduğu belirtilmektedir. Bu çalışmanın örnek verilen çalışmalardan farklı sonuçlar elde etmesinin nedeni İDA üretiminin genellikle özelleştirilmiş ve proje bazlı bir yapıya sahip olması nedeniyle tedarik zinciri entegrasyonu veya çevik lojistik gibi etmenlerin bu sektörde henüz kurumsallaşmamış olması şeklinde yorumlanabilir.

Sonuç olarak BDELPHI analizinde tedarik zinciri kategorisinde yer alan hiçbir ifadenin uzman uzlaşısına ulaşamaması, İDA sektörü bağlamında çevikliğin tedarik zinciri unsurlarıyla olan ilişkisinin henüz netleşmediğinin göstergesi olabilir. Tedarik zinciri, çevik üretimin yapı taşlarından biri olarak literatürde geniş yer bulmasına rağmen, sonuçlar İDA sektöründe tedarik zincirinin çeviklik üzerindeki etkisinin ya yeterince fark edilmediğini ya da henüz kurumsal düzeyde yaygınlaşmadığını düşündürmektedir. Dolayısıyla, bu alan İDA sektörü için Endüstri 4.0 ve sürdürülebilirlik entegrasyonu açısından hâlen gelişime açıktır.

Bir sonraki kategori olan Müşteri talebi odaklı ÇYG'lerin, kategoride yer alan ve kabul edilen ifade sayıları oranı düşünüldüğünde önceki kategorilere göre daha yüksek düzeyde uzman uzlaşısına ulaştığı görülmektedir. Bir sonraki analiz için bu kategoriden kabul edilen ifadeler şu şekildedir:

- Çalışanlara, değişimlere hızlı adapte olmalarını sağlayacak esnek ve uyarlanabilir çalışma mantığının kazandırılması.
- Deniz aracı siparişi veren kurumsal ya da bireysel müşterilerin zamanla güncellenen ve özelleşen gereksinimlerine (teslim tarihi, ürün kalitesi vb.) hızlı yanıt verilebilmesi.

Her iki kabul de, çevikliğin hem içsel organizasyonel kabiliyetler (esnek iş gücü, adaptasyon becerisi) hem de dışsal müşteri odaklılık (hızlı yanıt verme, bireyselleştirilmiş hizmet) boyutunda desteklendiğini göstermektedir. Bu, çevikliğin sadece teknik sistemlerle değil, aynı zamanda insan kaynağı ve müşteriyle kurulan ilişkinin niteliğiyle doğrudan bağlantılı olduğunu teyit eder niteliktedir. Nitekim literatüre göre, çalışan düzeyindeki adaptasyon kabiliyeti çevik üretimin başarısı için kritik bir unsur olup, bireysel öğrenme, esneklik ve teknolojiye entegrasyon yeteneğiyle doğrudan ilişkilidir (Yusuf vd., 1999: 38; Swafford vd., 2006: 186). Ayrıca, müşteri gereksinimlerine hızlı ve etkili biçimde yanıt verebilme yeteneği, çevik üretim sistemlerinin rekabet avantajı elde etmesinde de belirleyici bir faktördür (Christopher, 2000; Sharifi ve Zhang, 2001). Kabul edilen ifadeler, çevikliğin yalnızca teknolojik uygulamalarla değil; aynı zamanda insan kaynağının dönüşüm yeteneği ve müşteriyle kurulan etkileşim üzerinden de sürdürülebilir hâle getirilebileceğini göstermektedir. Bu durum, çevik üretim stratejilerinin Endüstri 4.0 bağlamında daha bütüncül ve çok katmanlı ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Ancak kategorideki diğer üç ifadenin kabul edilmemesi, müşteri temelli çeviklik göstergeleri arasında sektöre özgü bir önceliklendirme yapılabildiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, yüksek özelleştirme içeren mühendislik tabanlı üretim ortamları olan İDA sektöründe müşteri taleplerine duyarlılığın önemli görülmekle birlikte, yalnızca belirli koşullarda stratejik bir öncelik hâline geldiğini düşündürmektedir (Gunasekaran ve Yusuf, 2002; Dombrowski ve Mielke, 2014). Uzman uzlaşısına ulaşamayan ifadelerin, çevikliğin daha yapısal, öngörüye dayalı ve stratejik yönlerini temsil ettiği söylenebilir. Üretim kapasitesinin ölçeklenebilirliği ile çalışan adaptasyonunun birlikte ele alınması, ölçülebilir hedeflerle günlük kararların planlanması ve pazar taleplerinin tahmini gibi öneriler, çevikliğin sadece tepkisel değil, aynı zamanda proaktif biçimde yönetilmesini öngörmektedir. Ancak bu ifadelerin reddedilmesi, İDA sektöründe çeviklik uygulamalarının daha çok kısa vadeli, operasyonel esneklikle sınırlandırıldığını ve stratejik öngörü kapasitesinin henüz çeviklik algısı içinde yeterince yer bulmadığını göstermektedir. Bu durum, Endüstri 4.0'ın sunduğu veri temelli karar destek sistemlerinin müşteri talebine yönelik üretim süreçlerine sistematik biçimde entegre edilmesi gerektiğini gösterebilir.

Beşinci kategori olan Stratejik ve Operasyonel ÇYG'lere ilişkin BDELPHI sonuçlarında dikkat çeken nokta, kısaca ürün geliştirmede stratejik düzeyde iş birliği ve çalışanların anlık takibi için kısa vadeli hedefleme anlamına gelen iki ifade hariç tüm çeviklik göstergelerinin uzman uzlaşısına ulaşmış olmasıdır. Kabul edilen ifadeler aşağıda belirtilmiştir:

- Maliyet hedef ve amaçlarının belirlenmesi, kesinleştirilmesi ve bunlara ulaşılması
- Liderin duyarlılığı.
- Sürekli öğrenme ve eğitim.
- Çalışanların işbirliği.
- Açık, şeffaf iletişim ve bilgi paylaşımı.
- Değişimlere hızla adapte olabilmek için süreç bilgisi ve ileri dijital teknolojiler gibi temel operasyonlarda geliştirilen kurum içi kaynakların varlığı.

Etkili bir eğitim ortamı ve insan yetkinliğinin geliştirilmesi, çevik işletmelerde hem çalışanların hem de yöneticilerin güçlendirilmesini amaçlar; iş birliği ise içsel olarak, ortak bir hedef doğrultusunda birlikte çalışan fonksiyonlar arası ekipler aracılığıyla sağlanır. Sürdürülebilirlik çıktılarının iyileştirilmesi, kademeli öğrenmeye ve çalışma yöntemlerinin uyarlanmasına olanak tanıyan adım adım bir yaklaşım gerektirir. Sürekli eğitim ve insan merkezli bir yaklaşım, çevikliğin önündeki engellerin aşılmasına katkı sunar ve değişimi benimseyen daha sağlıklı bir iş kültürünün gelişmesini destekler. Sonuç olarak, Etkili bir eğitim ortamı ve fonksiyonlar arası iş birliği, çevik işletmelerde hem içsel dirençlerin aşılmasını hem

de sürdürülebilirliğe yönelik davranışsal dönüşümün gerçekleşmesini desteklemektedir (Douglas vd., 2020: 633).

Buna karşın reddedilen ifadeler, sektörde çevikliğin hâlâ içe kapalı, merkezi ve çoğunlukla bireysel performans denetimine odaklı şekilde algılandığını düşündürmüştür. Özellikle İDA gibi stratejik sektörlerde, geliştirici ekiplerin öncelikleri çoğu zaman acil görev ihtiyaçlarına yanıt verecek şekilde yapılandığından, uzun vadeli ortaklıklar veya iş birliği modelleri sistematik biçimde göz ardı edilebilmektedir. Oysa literatür, çevik yapılarda sadece teknoloji değil, aynı zamanda kurum içi sosyal mimarinin de yeniden tasarlanması gerektiğini vurgular (Doz ve Kosonen, 2010: 380; Conboy ve Fitzgerald, 2004: 42). Özetle Stratejik ve Operasyonel ÇYG kategorisinde elde edilen bu sonuçlar, çeviklik ve sürdürülebilirlik stratejilerinin yalnızca süreç yönetimiyle değil, aynı zamanda öğrenen organizasyon, etkileşimli liderlik ve çok paydaşlı yapıların tasarımı ile desteklenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

ÇYG'ler içindeki son kategori, 2 ifadeyle soru formuna dahil edilen Diğer Koşullar Altındaki ÇYG ifadelerinin tamamı kabul edilmiştir. Bu iki ifade, %94,12 oranında güçlü bir uzman uzlaşısına ulaşmıştır. Bu ifadeler aşağıda belirtilmiştir:

- Teşvik paketleri ve kriz kurtarma planlarının etkilerini en üst düzeye çıkarmak için hükümetlerle işbirliği yapılması.
- Siyasi istikrarsızlık, ekonomik dalgalanma, yakın coğrafyamızdaki savaşlar, göçmen krizleri, iklim değişikliği kaynaklı doğal afetler, yoksulluk, su ve gıda kıtlığı gibi küresel ve toplumsal zorluklarla daha iyi mücadele etmek için iş modellerini dönüştürebilmek amacıyla yeni teknolojiler edinilmesi.

Bu ifadelerin ilki, kriz dönemlerine yönelik devlet desteklerinin etkin kullanımı için hükümetlerle işbirliği yapılmasını; ikincisi ise küresel düzeydeki toplumsal, politik ve çevresel sorunlara karşı iş modellerinin dönüşümünü teknoloji temelli çözümlerle desteklemeyi önermektedir. Her iki ifade de çevik üretimin yalnızca içsel süreçlere değil, dış çevreye karşı kurumsal duyarlılıkla bütünleşmesi gerektiğine işaret etmektedir. Bu sonuç, pandemi sonrası literatürde giderek güçlenen “çevik dayanıklılık (agile resilience)” kavramıyla doğrudan ilişkilidir. İşletmelerin değişen jeopolitik ve iklimsel koşullara uyum sağlayabilmesi, yalnızca çevikliğin değil aynı zamanda kurumsal adaptasyon yeteneğinin sistematik olarak yapılandırılmasını gerektirmektedir (Ivanov, 2022: 1415; Wieland ve Durach, 2021: 320).

Dahası, bu iki ifadenin güçlü biçimde kabul edilmiş olması, İDA sektöründe artık yalnızca teknolojik kabiliyetlerin değil, makro koşullarla etkileşim kurabilen yönetim stratejilerinin de çeviklik kapsamında değerlendirildiğini göstermektedir. Bu bulgu, çevikliğin sadece üretim sahasında değil, aynı zamanda kriz yönetimi, devlet ilişkileri ve sosyo-ekonomik

öngörü bağlamlarında da yer bulmaya başladığını işaret etmektedir. Özellikle çevresel sürdürülebilirlik, göç hareketleri ve iklim temelli afetler gibi karmaşık risklerin, artık stratejik planlamada hesaba katıldığı ve çevik yaklaşımın bu değişkenliği fırsata çevirmek için kullanıldığı görülmektedir. Bu durum, yalnızca Endüstri 4.0 araçlarıyla değil; aynı zamanda kurumların kamu politikalarıyla eşgüdüm içinde hareket etmesini gerektiren çok düzlemli ÇS'lerin gündeme geldiğini göstermektedir.

BDELPHI kapsamında değerlendirilen ÇYG ifadeleri ile ilgili sonuçlar yukarıda detaylı bir şekilde incelenmiştir. Analiz sonucunda soru formunda yer alan 39 ÇYG ifadesinden 13 tanesi üzerinde uzman görüşü sağlanmış ve bu ifadeler bir sonraki aşamada değerlendirilmek üzere yeni soru formuna eklenmiştir. BDELPHI ile değerlendirilen ÇS ifadeleri ile ilgili sonuçlar ilerleyen paragraflarda incelenecektir.

Endüstri 4.0'ın öncülüğünde şekillenen dijital dönüşüm, günümüz işletmeleri için yalnızca teknolojik bir ilerleme değil; aynı zamanda stratejik bir kırılma noktasıdır. Bu kapsamda dijitalleşme, firmaların üretim yapısından iş modellerine kadar pek çok düzeyde yeniden yapılanmalarına neden olmaktadır. Nitekim Verhoef vd. (2021: 889), dijital teknolojilerin sadece edinimi değil, aynı zamanda bu teknolojilerin yenilikçi kullanım biçimleriyle firmalar için yeni değer yaratma potansiyelini vurgulamaktadır. Sebastian vd. (2020: 197) ise dijital dönüşümün, dijital teknolojilerin uygulanması sonucunda iş modellerinde yapılan stratejik değişikliklerle doğrudan ilişkili olduğunu belirtmektedir. Bu kategori kapsamında belirlenen dört ÇS ifadesinden ikisi yeterli uzman uzlaşısı ile kabul edilmiştir. İfadeler, oluşturulan teorik arka plan doğrultusunda değerlendirilmiştir. Kabul edilen ifadeler aşağıda belirtilmiştir:

- Finansal Güç ve Teknolojik Yetenekler: Güçlü bir teknolojik altyapı ile verilerin analiz edilebilmesi ve böylece faydalı içgörülerini paydaşlarla paylaşarak daha iyi, akıllı ve hızlı kararlar alınabilmesi için yeterli finansal güce sahip olmak.
- Teknoloji Edinimi: Pazara sunma süresini kısaltma ve kalitesizlik maliyetini düşürme ihtiyacıyla yeni teknolojileri keşfetmek ve/veya dışarıdan tedarik etmek.

Finansal Güç ve Teknolojik Yetenekler stratejisi, kabul edilen diğer stratejiye göre çok daha yüksek bir uzlaşya sahiptir. Bu strateji yalnızca teknolojik altyapının varlığına değil, aynı zamanda bu altyapının akıllı karar destek sistemlerine nasıl entegre edildiğine odaklanmakta; bu entegrasyon sonucunda elde edilmesi hedeflenen finansal güce atıfta bulunmaktadır. İfade, teknolojik yeniliklerin çeviklikle doğrudan bağını kurarak zaman, kalite ve maliyet etkenlerine somut biçimde temas etmektedir. Bu yönüyle, uzmanlar tarafından yüksek düzeyde kabul gördüğü ve uygulanabilir bulunduğu tahmin edilmektedir. Kabul edilen diğer ifade ise

teknolojik yeniliklerin çeviklikle doğrudan bağı kurarak zaman, kalite ve maliyet etkenlerine somut biçimde temas etmektedir. Görece düşük bir uzlaşıya sahip olsa da ilk ifadeyle ortak yönlerinin bu uzlaşıda rol oynadığı düşünülmektedir. Öte yandan, kategori teknoloji odaklı olsa da finansal içerikli bir ifadenin kabul edilmesi mevcut ekonomik koşullar göz önünde bulundurulduğunda oldukça manidar ve anlaşılır bulunmuştur.

Reddedilen ifadeler incelendiğinde kabul edilenlere kıyasla bu ifadelerin uzmanlar tarafından görece daha genel, pasif ve belirsiz bulunmuş olabileceği düşünülmektedir. Her ne kadar dijitalleşmenin çevik stratejilere yön vermesi kaçınılmaz bir gereklilik olarak görünse de, bir stratejinin teknoloji trendlerinin yalnızca “benimsenmesini” hedeflemesi yüzeysel kalabilmektedir. Çünkü çeviklik açısından adaptasyon yerine aktif bir dönüşüm beklentisi öne çıkmaktadır. Ek olarak, Endüstri 4.0’ın etkileriyle birimlerin bağımsız karar alma özelliklerine sahip olabilme potansiyeli İDA gibi sektörler için tehlikeli bulunabilmektedir. Bilgi paylaşımı çevik sistemler için temel bir önkoşul olsa da bir İDA üretim sürecinde ademi merkeziyetin uygulanmasının bazı güvenlik sorunları nedeniyle mümkün olmayacağı düşünülmektedir.

İkinci kategori olarak ele alınan sürdürülebilirlik temelli ÇS’ler, artık her bireyin karşı karşıya olduğu en büyük küresel sorunlardan biri olan iklim krizi etkisiyle her bir işletmenin dikkate almak zorunda olduğu stratejilerdir. Sürdürülebilirlik temelli stratejiler, kurumsal söylemlerde geçmişe nazaran daha fazla yer bulmasına rağmen uygulamada henüz yeterli düzeye ulaştığı söylenemez. Delmas ve Burbano’ya (2011: 67) göre birçok işletme, sürdürülebilirlik faaliyetlerini ya maliyet unsuru olarak değerlendirmekte ya da yalnızca pazarlama aracı olarak kullanmaktadır. Bu durum, analiz kapsamında değerlendirilen ifadelerde de açıkça görülmektedir. Sürdürülebilirlik kategorisindeki Üç ÇS ifadesinden yalnızca biri kabul edilmiş, ÇYG’lerden aynı kategoride yer alan ifadelerden ise hiçbir ifade uzmanlar tarafından kabul edilmemiştir. Bu sonuçlar, sürdürülebilirlik temelli ÇS’lerin hem literatürde hem de uygulamada ne yazık ki hâlen yeterince olgunlaşmadığını ortaya koymaktadır. Bu kategoride kabul edilen tek ifade aşağıda belirtilmiştir:

- Çevik ve Çevreci Üretim: Teknolojik yeniliklerle ve dijital dönüşümle üretim sistemini hem çevikleştirmek hem de sürdürülebilir hale getirmek.

Kabul edilen bu ifadeden de görülebileceği üzere, sürdürülebilirlik tek başına bir hedef oluşturmak için yeterli görülmemekte; başka kavramlarla birlikte anıldığında ya da ana amacın yanında ikinci planda ek bir getiri gibi değerlendirildiğinde kabul görmektedir. Reddedilen ifadelerin ise sürdürülebilirlik için çok daha somut bir uygulama alanı önerebilme potansiyeline rağmen dikkate alınmadığı söylenebilir. Bu durumda, işletmelerin sürdürülebilirlik konusunda

“göstermelik” uygulama ve söylemlere sahip olduğunu ve çevreci bir amaçla gerçek adımlar atmak konusunu geri planda tuttuğunu düşünmek kaçınılmazdır.

İşletmelerin ve aslında gezegenimizin dijitalleşme ile çevresel hedeflerin birlikte yürütülebileceği bütüncül stratejik yaklaşımlara ihtiyacı vardır. Literatürde Blome vd. (2014: 466) tarafından da vurgulandığı üzere, çevikliğin sürdürülebilirlikle birleşmesi stratejik bir kaldıraç işlevi görebilir. Bu bağlamda, teknolojik adaptasyon yalnızca verimlilik değil, çevresel duyarlılık odağında da tanımladığı zaman yüksek düzeyde fayda sağlayabilmektedir. Ancak sürdürülebilirlik ve çeviklik arasındaki ilişki yalnızca kısa vadeli çevresel çözümlerle sınırlı değildir; aynı zamanda uzun vadeli değer üretimi hedefini de içermektedir. Ancak analiz sonuçları, sürdürülebilirlik temelli ÇS’lerin uygulamada hâlâ kavramsal düzeyde kaldığını ve uzman görüşleriyle yeterince desteklenmediğini göstermektedir. Bu durum, çevik üretim anlayışının sürdürülebilirlik ekseninde geliştirilmesi gerektiğine ve bu konuda literatürün derinleştirilmesine duyulan ihtiyaca işaret etmektedir.

ÇYG değerlendirmelerinde hiçbir ifadesinin kabul edilmediği kategorilerden biri olan Tedarik Zinciri kategorisi, ÇS odaklı analizde de sınırlı düzeyde uzman uzlaşısı alabilmiştir. Üç ifadeden yalnızca biri kabul edilmiş; bu durum, stratejik düzeyde çevikliği sağlamaya yönelik bazı önerilerin uygulama gerçekliğine ne derece karşılık geldiği konusunun belirsiz olduğunu düşündürmüştür. Kabul edilen ifade aşağıda belirtilmiştir:

- Hammadde Temini: Hayati önem taşıyan malzemelerin eksikliği durumunda operasyonları yeni bir üretim türüne adapte edebilmek.

Kabul edilen ifadenin çok yüksek bir uzlaşma değerine sahip olmamakla birlikte özellikle üretim sürecinin, kritik hammaddelerin tedarik edilemediği senaryolarda farklı bir forma adapte edilmesini konu alması nedeniyle somut ve uygulanabilir bulunduğu düşünülmektedir. Bu tür senaryolara yönelik stratejiler, Covid-19 döneminde geçici üretim dönüşümleriyle örneklendirilmiş; analiz sonucundan da tahmin edilebileceği üzere o dönemde yaşananların uzman görüşlerine yansıdığı görülmüştür. Hem pandemi bağlamında hem de bağlamdan bağımsız düşünüldüğünde, kabul edilen ifadenin doğrudan operasyonel dönüşüm kapasitesiyle ilişkilendirildiği söylenebilir. Kritik malzemelerin temininde yaşanacak aksamlar karşısında üretim yapısının çevik biçimde dönüştürülebilmesi, uzmanlar tarafından üretim süreçlerine esneklik kazandırması ve stratejik etki potansiyelini artırması açısından anlamlı bulunmuş olabilir. Örneğin, pandemi döneminde maske ve medikal malzeme gibi acil ihtiyaçlara yanıt veren geçici üretim hatlarının kurulması, bu tür bir çeviklik yaklaşımının başarılı örneklerinden biri olarak değerlendirilmektedir (3M Company, 2020). Literatürde çevik yaklaşımların malzeme akışı, stok seviyeleri ve yanıt süresi gibi dinamiklerle tedarik zinciri yapısını

belirleyici şekilde dönüştürebildiği görülmektedir (Christopher ve Towill, 2000: 206). Endüstri 4.0'ın etkisi ile veri analitiği ve sensör teknolojileri sayesinde uçtan uca görünürlük elde edilmekte; bu da arz-talep dengesizliklerine çevik yanıt verebilme kapasitesini artırmaktadır (Ivanov vd., 2019: 829). Bütün bu mantık çerçevesi düşünüldüğünde kabul edilen maddenin kabul edilme nedenine dair bir öngörü oluşturulabilmektedir.

Reddedilen ifadeler değerlendirildiğinde, tedarik zinciri üzerinde belki de Endüstri 4.0'ın en etkin olduğu yapı konusunda uzlaşma sağlanamadığı görülmüştür. Klasik tedarik zinciri yapılarını Dijital Tedarik Ağı (DSN) mantığıyla yeniden kurgulamayı öneren ifade uzmanlar tarafından soyut bulunmuş ya da pratikte yeterli düzeyde uygulanabilir görülmemiş olabilir. Benzer şekilde, yeni ürün tasarımları doğrultusunda tedarik zincirinin yeniden yapılandırılmasını konu eden ifadenin de çeviklik açısından stratejik bir düzleme oturtulamadığı düşünülebilir. Bu durum, ifadelerin kapsamındaki potansiyel soyutluk ve genel ifadelerin, uzmanlarca doğrudan yanıt üretilebilirliği düşük bulunmasından kaynaklanmış olabilir.

Çalışmanın genelinde vurgulanan tedarik zinciri çevikliği, yalnızca üretici firma düzeyinde değil, tüm tedarik ağı boyunca karşılıklı uyum, güven ve hızla yeniden yapılanma kapasitesi gerektirmektedir. Bu bağlamda tedarik zinciri ortaklarının teknolojik yeniliklere hızlı entegre olabilmeleri, esnek lojistik yapılar kurabilmeleri ve talep değişimlerine anlık yanıt verebilmeleri büyük önem taşımaktadır. Ancak analiz sonuçları, bu tür stratejilerin sadece teorik değil, aynı zamanda açıkça ölçülebilir ve eyleme geçirilebilir biçimde tanımlanmasının gerekli olduğunu göstermektedir.

Bir sonraki kategori olan Müşteri Talebi, çeviklik kavramının temel dayanaklarından biri olarak literatürde geniş şekilde ele alınmasına rağmen, analiz sonuçlarının bu beklentiyi tam olarak yansıtamadığı söylenebilir. Kategoride yer alan dört ifadeden yalnızca biri kabul edilmiştir:

- Müşteri Memnuniyeti: Üretim ve teslimat süresini kısaltmak, ürün geliştirme döngüsünü azaltmak, sipariş doğruluğunu artırmak ve müşteri iletişimini ve memnuniyetini iyileştirmek için dahili ve iş birliğine dayalı operasyonlarını yeniden düzenleme yeteneğine sahip olmak.

Bu durum, müşteri odaklı stratejilerin her zaman doğrudan çeviklik çerçevesine oturtulamayabileceğini göstermektedir. Müşteri talepleri doğrultusunda oluşturulan stratejiler, yalnızca son kullanıcıya hitap eden yapılarla sınırlı değildir; kurumsal satış yapan işletmelerde dahi değer algısı ve müşteri memnuniyeti üzerinde doğrudan etkilidir (Gligor vd., 2020: 725).

Ancak bu teorik kabulün uygulamada hangi koşullarda stratejiye dönüşebileceği, uzman değerlendirmelerinden faydalanılarak net bir şekilde anlaşılamamaktadır.

Kabul edilen ifade, doğrudan üretim ve teslimat süreçlerine müdahale ederek müşteri memnuniyetini artırmaya odaklanmaktadır. Sipariş doğruluğu, teslimat süresi ve ürün geliştirme döngüsü gibi somut metriklere odaklanması, ifadenin çeviklikle net ve uygulanabilir bir bağ kurmasını sağlamıştır. Bu tür stratejiler, yalnızca hızlı yanıt verme kapasitesini değil; aynı zamanda dahili süreçlerin işbirliğine dayalı yeniden yapılandırılabilirliğini de esas almaktadır. Mirando ve Herath'ın (2024: 1) vurguladığı güven temelli müşteri ilişkileri inşası, bu bağlamda yalnızca pazarlama avantajı değil; çeviklikle doğrudan ilintili bir kurumsal refleks olarak yorumlanabilir.

Buna karşılık, müşteri odaklı yenilikçilik, fire azaltımı ya da değişiklik taleplerine tepki gibi başlıklar altında sunulan diğer ifadeler, uzmanlar tarafından ya fazla genel ya da fazlasıyla teknik-operasyonel olarak değerlendirilmiş olabilir. Özellikle müşteri taleplerindeki değişimlere düşük maliyetle uyum sağlama gibi öneriler, uygulamada kontrol edilemeyen birçok dışsal değişkenle karşı karşıya kalabilmektedir. Bu nedenle uzmanlar, bu tür ifadeleri çevikliğin stratejik yönüyle yeterince ilişkilendirememiş olabilir. Ayrıca işletme düzeyinde alınan stratejik kararlarla ön saflardaki müşteri yanıtları arasında bütünsel bir bağlantı kurulamaması, bu ifadelerin zayıf kabul oranlarıyla sonuçlanmasına neden olmuş olabilir.

Sonuçlar, müşteri odaklı ÇS'lerin yalnızca müşteri deneyimiyle sınırlı görülmemesi, bunun ötesinde işletmenin genel pazar uyum kapasitesine katkı sunacak biçimde yapılandırılması gerektiğine işaret etmektedir. Bu bağlamda Gligor vd. (2020: 725) tarafından vurgulanan sadakat-memnuniyet ilişkisi ve pazar avantajı yaratımı, çevikliğin sürdürülebilir biçimde müşteriye entegre edilebilmesinin ancak yapısal bütünlükle mümkün olabileceğini ortaya koymaktadır. Bir sonraki bölüm olan Stratejik ve Operasyonel ÇS'ler, bu bütünlüğün nasıl sağlanabileceğine ve çeviklik kavramının organizasyonun tüm seviyelerine nasıl yayılabileceğine ışık tutacaktır.

Stratejik ve operasyonel ÇS'lerin yönelik analiz bulguları, bu alandaki uygulamaların uzmanlar tarafından sınırlı ölçüde benimsendiğini göstermektedir. Analiz sonucunda göre yedi ifadeden üçü kabul edilmiştir:

- Çalışan Yetkinliği: Değer yaratmak ve rekabet avantajı oluşturmak için yeni süreçleri öğrenme, uyarlama, uygulama ve rol ve sorumlulukları genişletme becerilerine sahip insan kaynağı oluşturmak.
- Rekabet Avantajı: Endüstri 4.0 uygulamaları sayesinde üretim sistemlerini geliştirerek maliyet liderliği elde etmek ve rekabet avantajı kazanmak.

- Risk Yönetimi: Tüketici talebi tahminlerinde artan belirsizlik, paydaşlar arası bilgi aktarımındaki gecikmeler ve çarpıklıklar gibi beklenmedik risklere yanıt veren uygun bir üretim sistemi oluşturmak.

Diğer kategorilerle benzer şekilde; kabul edilen ifadelerin daha doğrudan ve ölçülebilir çıktılar sunduğu; reddedilenlerin ise ya soyut kaldığı ya da çeviklik bağlamıyla yeterince net ilişkilendirilmediği tahmin edilmektedir. Bu durum, çevikliğin işletme düzeyinde kavramsal olarak benimsenmiş olsa da uygulamada sınırlı düzeyde karşılık bulduğunu ya da hâlâ seçici bir çerçevede değerlendirildiğini göstermektedir.

Kabul edilen ifadeler, doğrudan operasyonel etkinliğe ve belirsizlikle baş etme kapasitesine odaklanmaktadır. Örneğin, çalışan yetkinliğine dair ifade, çevikliğin insan kaynağı boyutunu ön plana çıkararak stratejik dönüşümün yalnızca sistem ve süreçlerle değil, aynı zamanda bireylerin öğrenme ve uyum sağlama kapasitesiyle mümkün olabileceğini vurgulamaktadır. Çeviklik yalnızca kavramsal düzeyde değil; tüm paydaşlar ve organizasyonel yapılar tarafından özümsemiğinde stok yönetimi, hizmet esnekliği ve müşteri memnuniyeti gibi alanlarda somut fayda yaratabilmektedir.

Kabul gören ifadelerden biri rekabet avantajına yönelik olup, çevikliğin Endüstri 4.0 teknolojileriyle bütünleştiğinde yalnızca adaptasyon değil, aynı zamanda maliyet liderliği gibi doğrudan performans çıktıları sağlayabileceği yönünde bir sonuç elde edilmesini sağlamıştır. Panigrahi vd. (2023: 7), çevikliğin operasyonel performansla doğrudan katkısını vurgularken, bunun dolaylı etkilerinin maliyet verimliliği üzerinden stratejik avantajlara dönüştüğünü belirtmektedir. Bu ifade, tam da bu dönüşüm mekanizmasına işaret etmektedir.

Risk yönetimi başlıklı stratejinin kabul edilmesi ise özellikle dikkat çekicidir. Bu ifade, tahmin edilemeyen talep değişimleri ve bilgi aktarımındaki gecikmeler gibi belirsizlikleri merkeze alarak, çevikliğin öngörülemeyen durumlara karşı sistematik bir yanıt üretme aracı olarak görülmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Tallon'un (2003: 76) dikkat çektiği gibi, stratejik uyum yalnızca sabit planlarla değil, işletmenin ani değişikliklere ne ölçüde esnek yanıt verebildiğiyle ölçülmektedir. Bu bağlamda, çeviklik kavramı stratejik planlama döngülerine entegre edildikçe kurumsal esneklik yapısal bir özellik hâline gelmektedir.

Öte yandan, “etkili eğitim ortamı”, “paydaş değeri”, “üretim süreçleri” ve “insansız sistemler” gibi ifadeler uzmanlardan yeterli düzeyde destek görememiştir. Bu ifadelerden bazıları çevikliğin kapsamı dışında değerlendirilmiş; bazıları ise bağlamdan kopuk ya da fazla soyut bulunmuş olabilir. Özellikle kültürel dönüşüm ya da dijitalleşme temelli önerilerin, doğrudan ÇS’ler ile ilişkisi yeterince güçlü kurulamadığında, uzman uzlaşısı zayıflama sözü konusu olabilir. Bu durum, işletmelerin stratejik dönüşüm süreçlerinde yalnızca ileri teknoloji

ya da vizyoner söylemlerle değil, somut ve hızlı etkiler yaratacak eylemlerle çeviklik inşa etmesi gerektiğini göstermektedir.

Sonuçlar, stratejik ve operasyonel çevikliğin sadece içsel süreç iyileştirmeleriyle değil; aynı zamanda birey, sistem ve organizasyon üçgeninde çok katmanlı bir yapı içinde düşünülmesi gerektiğine işaret etmektedir. Bu bütünlük sağlanmadığında, ÇS'lerin uzun vadeli ve sürdürülebilir etkiler yaratması güçleşmektedir. Bir sonraki bölüm olan Diğer Koşullar, bu sürdürülebilirliğin olağandışı durumlar karşısında nasıl korunabildiğine odaklanacak; bu son değerlendirmeye BDELPHI analizleri tamamlanacaktır.

Diğer Koşullar kategorisi, olağan dışı durumlar karşısında işletmelerin çevikliğini sürdürebilme yetkinliğini sorgulayan stratejiler üzerine kuruludur. Analiz sonuçları, kategoride yer alan sekiz ifadenin yarısının uzmanlar tarafından kabul edildiğini göstermektedir. Kabul edilen ifadeler şu şekildedir:

- Dayanıklılık: Organizasyona ve çalışanlara belirsizliklerle başa çıkma ve bu belirsizliklerden kurtulma konusunda çeşitli beceriler kazandırmak.
- Ekonomik Etkililik: Ekonomik gerileme dönemlerinde iş gücünü yavaşlatmadan firma harcamaları üzerinde mutlak kontrol ve görünürlük sağlamak.
- Düşük Gecikme Süresi: Herhangi bir üretim yapılandırmasında gecikmeleri ve bu gecikmelerden kaynaklı iş yükünü minimize etmek.
- Üretim Sistemi: Çevik bir üretim sistemi kurarak, sosyo-politik değişimlerden doğal afetlere veya ekonomik krizlere kadar çeşitli nedenlerden kaynaklanan olası kesintilerden tamamen kaçınmak için çevreyi sürekli izlemek; bu kesintilerin olası etkilerinden kurtulmak için kendini en uygun şekilde yeniden yapılandırabilmek; kesinti yaşandıktan sonra optimum operasyonel performansı hızlı bir şekilde sağlamak; böylece kesintilerin etkisini proaktif olarak en aza indirebilmek.

Kabul edilen ifadelerin ortak noktası, belirsizlik ve kesinti koşullarına karşı doğrudan, pratik ve bütüncül tepkiler üretmeye odaklanmalarıdır. Bu sonuç, ÇS'lerin yalnızca günlük operasyonel başarıya değil, aynı zamanda olağanüstü durumlara karşı kurumsal hazırlığa da hizmet etmesi gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Kabul edilen stratejilerden ilki olan dayanıklılık ifadesi hem çalışanların hem de organizasyonun belirsizliklere karşı direnç geliştirmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Bireylerin ve örgütlerin kriz anlarında hayatta kalabilmesi için yalnızca psikolojik değil, örgütsel ve sistem düzeyinde destekleyici bir çeviklik yapısına ihtiyaç duyulmaktadır (Liu vd., 2019: 1228; Liu vd., 2020: 278). Bu bağlamda dayanıklılık, çevikliğin bir tamamlayıcısı değil, onunla iç içe geçmiş bir sürdürülebilirlik koşulu olarak değerlendirilmektedir.

İkinci kabul edilen ifade olan ekonomik etkililik, çevikliğin yalnızca kaynak tahsisiyle değil; ekonomik daralma koşullarında bile kaynaklar üzerinde mutlak kontrol sağlama becerisiyle ilişkilendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu yönüyle çeviklik, dışsal kriz koşullarında iş gücü dengesini bozmadan operasyonel sürekliliği koruma aracı olarak görülmektedir. Bu hem çalışan bağlılığı hem de organizasyonel direnç açısından kritik bir işlev yüklenmektedir.

Üçüncü olarak, gecikme sürelerinin ve buna bağlı iş yükünün minimize edilmesine yönelik strateji, kriz anlarında yalnızca stratejik değil, mikro seviyede de çevik reflekslerin devreye girmesi gerektiğine işaret etmektedir. Bu ifade, üretim yapılandırmasındaki kesintilerin önlenebilirliğini değil, bu kesintilere ne kadar hızlı ve etkili tepki verilebildiğini ön plana çıkararak çevikliğin doğrudan performansla ilişkilendirilmesini sağlamıştır.

En kapsamlı ve dikkat çekici kabul edilen ifade ise çevik üretim sistemi kurarak sosyo-politik, ekonomik veya doğal kaynaklı kesintilerden proaktif biçimde korunmayı amaçlayan Üretim Sistemi stratejisidir. Bu ifade, çevikliğin kriz sonrası iyileştirme süreciyle sınırlı olmadığını; kriz öncesi erken uyarı mekanizmaları, kriz anında yeniden yapılandırma kabiliyeti ve kriz sonrası optimum performansa dönüş kapasitesiyle çok aşamalı bir sistem olarak kurgulanması gerektiğini göstermektedir. Bu yaklaşım, Fahimnia vd. (2018: 143) tarafından önerilen, dağıtık üretim tesisleri kurarak kriz etkisini yayma ve dayanıklılığı artırma stratejileriyle benzerlik gösterdiği söylenebilir.

Buna karşılık, üretim planlaması, kapasite planlaması, tesis kapasitesi ve işbirliği stratejileri reddedilen dört ifade olarak belirlenmiştir. Bu ifadelerden bazılarının teknik karmaşıklığı, bazılarında sektörel farklılıklara göre değişken uygulanabilirliği, çeviklikle doğrudan ilişkilendirilmelerini güçleştirmiş olabilir. Diğer stratejilerde olduğu gibi stratejik araçların çevikliğe katkısı, doğrudan sonuç üretmediği sürece bu araçlar ikincil öncelikli olarak değerlendirilmektedir.

Genel olarak bu kategori, çevikliğin yalnızca performans artışı değil; aynı zamanda kriz zamanlarında varlığını sürdürebilme yeteneği anlamına geldiğini göstermektedir. Bu da tüm strateji kategorilerinin bütünleşik biçimde ele alınmasını ve kurumun içsel yapısı kadar dışsal koşulların da stratejik planlama süreçlerine entegre edilmesini gerektirmektedir.

Bu çalışmada BDELPHI bir ön analiz olarak uygulanmış olup; literatür taraması, akademisyen ve sektör profesyonellerinin görüşleri çerçevesinde hazırlanan soru formunda yer alan ifadelerin uzmanlar tarafından değerlendirilerek görece önemsiz olanların formdan çıkarılmasını sağlamıştır. Bu ön seçimden geçen ifadeler, sürdürülebilir bir ortamda çevik üretim stratejilerinin önceliklendirilmesinde değerlendirilmiştir.

3.6.2. Bulanık TOPSIS Bulguları

BTOPSIS sonuçları incelendiğinde CCI değerlerinin tamamı 0,60–0,64 bandında yer aldığı görülmektedir. Bu durum, uzmanların görüşlerinde keskin ayrışmaların bulunmadığına ve stratejilerin görece dengeli bir biçimde ele alındığına işaret ediyor olabilir. Öte yandan, küçük farklarla öne çıkan stratejilerin, sektörde kritik başarı faktörlerine dair ipuçları sunduğu düşünülebilir.

Alternatifler arasındaki sıralama değerlendirildiğinde ise (Bkz: Tablo 3.16) en yüksek CCI değerinin 0,641302 ile TES01 kodlu (Finansal Güç ve Teknolojik Yetenekler) ÇS'ye ait olduğu belirlenmiştir. Bu ÇS, pozitif ideal çözüme en yakın, dolayısıyla uzmanlar tarafından en kritik ve öncelikli görülen ÇS olarak değerlendirilmiştir. Bu sonuç, İDA gibi yüksek teknoloji odaklı sektörlerde işletmelerin yeterli finansal güç elde edebilmesi için, daha iyi, akıllı ve hızlı kararlar almayı mümkün kılan güçlü teknolojik altyapılara sahip olmasının uzmanlar tarafından öncelikli görüldüğünü ortaya koymaktadır. Onu SÜS03 (0,630329 / Çevik ve Çevreci Üretim) ve DKS10 (0,623179 / Ekonomik Etkililik) takip etmekte olup, bu ÇS'lerin aralarındaki farkın çok da büyük olmadığı görülmektedir. Bu durum, ilk üç stratejinin birbirine yakın derecede önemli algılandığını göstermektedir. Sürdürülebilirlik kategorisi her ne kadar BDELPHI'de ÇYG kapsamında değerlendirme dışında kalsa da bu sonuç, çevre konularının stratejik anlamda uzmanların göz önünde bulundurduğu bir vizyon olduğu söylenebilir. Böylece uzmanların sürdürülebilirlik anlamında bir ÇYG'ye sahip olmakla ilgili yönelimleri olmasa da sürdürülebilirliği en azından strateji oluşturulurken dikkate alınan bir değer olarak gördükleri düşünülebilir. Öte yandan, bu durum uzmanların ve dolayısıyla işletmelerin göstermeci bir tutum sergilediklerine de kanıt olabilir. Şöyle ki, uzmanlar sürdürülebilirliği en önemli stratejilerinden biri haline getirseler de bununla ilgili somut yetenek ve göstergelere sahip olmadıkları sürece oluşturdukları stratejinin gerçekleşme olanağı bulunmayacaktır. Dolayısıyla bu konuda kesin yorum yapılabilmesi için daha detaylı bir analize ihtiyaç vardır. Bir sonraki ÇS olan Ekonomik Etkililik'in ilk üçte yer alması özellikle son yıllarda Türkiye'nin içinde bulunduğu ekonomik koşullardan dolayı oldukça anlaşılır ve tutarlı bir sonuç olarak görülmektedir. Listenin devamında TES02 (Teknoloji Edinimi), MTS05 (Müşteri Memnuniyeti) ve DKS09 (Dayanıklılık) stratejilerinin yer alması ise üst sıralarda kümelenen ÇS'lerin genel anlamda teknoloji odaklı, sürdürülebilirlik tabanlı ve çeviklik yönelimli olduğunun göstergesi olabilir. Buradan hareketle, çeviklik için yalnızca teknoloji ve sürdürülebilirlik değil, aynı zamanda dışsal veya bağlamsal koşulların da (ör. düzenleyici ortam, küresel belirsizlikler, politik/ekonomik faktörler) belirleyici olduğu söylenebilir.

Üst-orta sıralarda yer alan ÇS'ler detaylı incelendiğinde TES02 (Teknoloji Edinimi), MTS05 (Müşteri Memnuniyeti), DKS09 (Dayanıklılık), SOS06 (Çalışan Yetkinliği) ve DKS11 (Düşük Gecikme Süresi) başlıklı ÇS'lerin sırasıyla 4'üncüden 8'inci sıraya olmak üzere sıralamada yer aldığı görülmektedir. Bu çalışmaya kaynaklık eden ana makalelerden biri olan Agarwal ve diğerlerinin (2023) çalışmasında alternatiflerin sıralamasında en üstte yer alan "Dayanıklılık" başlıklı ÇS'nin bu çalışmada oldukça farklı bir sonuçla altıncı sırada yer alması beklenmedik sonuçlardan biridir. Burada araştırmaların gerçekleştirildiği sektör farklılıkları bu sonucun temel nedeni olarak görülebilir. İDA sektörü, otomotiv sektörüne kıyasla daha fazla teknoloji odaklı bir yapıya sahip olduğu için buna yönelik ÇS'lerin üst sıralarda yer alması beklenen bir durumdur. Öte yandan yine bu çalışmadan farklı olarak Agarwal ve diğerlerinin çalışmasında elde edilen CCI değerleri 0,446-0,284 bandında yer almaktadır. Bu aralık, değerlerin alt-orta seviyede yoğunlaştığını göstermekte; yani hiçbir alternatifin "çok güçlü şekilde ideal" ya da "çok zayıf şekilde negatif ideal" çıkmadığı şeklinde yorumlanabilmektedir. CCI değerleri arasındaki farklar çok geniş olmaması ise stratejiler bazında dramatik bir ayrışmanın olmadığı anlamına gelebilmektedir. Bu da uzman görüşlerinin stratejiler arasında kesin bir üstünlük tanımlamadığını, alternatiflerin birbirine görece yakın bulunduğunu gösterebilir. Yani stratejilerin hiçbirisi tam anlamıyla ideal değil, ancak bazıları görece daha avantajlıdır. Bu anlamda her iki çalışmanın benzerlik gösterdiği düşünülebilir.

Alternatiflerin sıralamasında DKS12 (Üretim Sistemi), SOS07 (Rekabet Avantajı), TZS04 (Hammadde Temini) ve SOS08 (Risk Yönetimi) kodlu ÇS'lerin listenin sonunda yer aldığı görülmektedir. Bu ÇS'ler arasında oldukça şaşırtıcı bulunabilecek bir sonuç göze çarpmaktadır. İkinci en düşük öncelikli ÇS, 0,606481 CCI değeriyle TZS04 (Hammadde Temini) olarak bulunmuştur. Çevik üretimin ve çevikliğin belki de en önemli ön koşullarından biri olan tedarik zinciri çevikliğinin bu sıralamada geri planda tutulması, genel kanının aksine bir sonuç olarak değerlendirilmektedir. İDA işletmeleri üretimlerini kendileri gerçekleştirse de üretim süreçlerinde dış kaynaklardan temin etme zorunluluğu bulunan ham madde ve ara mamüller yer almaktadır. Bu nedenle herhangi bir malzeme tedarikinde eksiklik yaşanması durumunda üretim süreçlerinin yeni bir yapıya entegre veya adapte olabilmesi üretimin sekteye uğramaması açısından oldukça önemlidir. Öte yandan elde ettiği CCI değerinin (0, 606481) 0,5'in üzerinde yer alması, aslında bu ÇS'nin uzmanlarca "önemsiz" olarak algılanmadığının göstergesidir. Pozitif ideal değere daha yakın tarafta yer alan bu değer, ilgili ÇS'nin önemsiz olmadığını; belirlenen kriterler (ÇYG'ler) göz önünde bulundurularak gerçekleştirilen önem sıralamasında bu ÇS'ye öncelik verilmediğini göstermektedir. Dolayısıyla TZS04'ün öncelikli görülmemesi, bu stratejinin önemsiz olduğu anlamına gelmemektedir. Aksine, hammadde

temini ve tedarik zinciri çevikliği, üretimin sürdürülebilirliği açısından kritik bir rol oynamaktadır. Ancak analizde diğer stratejilerin daha yüksek öncelik alması, uzmanların mevcut kriterlerde ve koşullarda farklı unsurları daha belirleyici görmelerinden kaynaklanmış olabilir. Bu bağlamda TZS04'ün arka planda kalması, stratejinin değerini yitirdiğini değil, göreceli olarak daha az öne çıktığını göstermektedir. Özellikle İDA işletmelerinde dış kaynaklı hammadde ve ara mamul temininde yaşanabilecek herhangi bir aksama, üretim süreçlerini doğrudan etkileyebileceğinden, bu stratejinin önemi göz ardı edilmemelidir. Benzer şekilde, hem TZS04'ün üzerinde yer alan DKS12 (Üretim Sistemi), SOS07 (Rekabet Avantajı) hem de en alt sırada yer alan SOS08 (Risk Yönetimi) stratejisi de TZS04'e çok yakın olan CCI değerleriyle pozitif ideal değere yakınsamaktadır. Şüphesiz ki İDA üretim süreçlerinde bu ÇS'ler de gereklidir ancak diğer stratejilerle birlikte tamamlayıcı bir işlev olarak görüldüğü için ya da kendisinden daha kritik etkiye sahip stratejiler olduğu için son sıralarda yer almış olabilir.

Sonuç olarak, BTOPSIS analizinden elde edilen bulgular genel olarak değerlendirildiğinde, çeviklik stratejilerinde teknoloji, finansal güç, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik verimlilik boyutlarının ön plana çıktığı görülmektedir. Özellikle “Diğer Koşullar” kategorisinin içindeki ekonomik etkililik stratejisinin üst sıralarda yer alması, günümüzün dalgalı piyasa koşullarında giderek daha fazla önem kazanan bir hususu vurgulamaktadır. Buna karşılık, müşteri memnuniyeti, risk yönetimi ve hammadde temini gibi stratejiler sıralamada daha geri planda kalsa da çevikliğin çok boyutlu yapısı içinde tamamlayıcı bir işlev üstlenmekte; işletmelerin yalnızca kısa vadeli rekabet avantajı değil, aynı zamanda uzun vadeli direnç ve sürdürülebilirlik kazanmasına katkı sunmaktadır. Bu tablo, çevik üretim için en kritik stratejilerin seçilmesinin yanında, bütünsel bir çeviklik yaklaşımının vazgeçilmezliğini de ortaya koymaktadır.

SONUÇ

Küresel ısınma, doğal kaynakların tükenmesi, çevre kirliliği, yoksulluk, derinleşen eşitsizlikler, otoriter yönetimlerin yaygınlaşması, jeopolitik gerilimler, terör ve savaş gibi dünya genelinde var olan çevresel ve toplumsal tehditler insanlığın refahını ve gelecek nesillerin varlığını ciddi şekilde tehlikeye atmaktadır. Bu bağlamda bireylerin, işletmelerin ya da ülkelerin çabaları tek başına yeterli olamamakta; bütünleşik olarak ağlarda yer alan tüm aktörlerin sürdürülebilir kalkınmayı garanti altına alacak yeni sistemler geliştirmeleri zorunlu hâle gelmektedir. Son yıllarda pandemi, dijitalleşme ve yeşil dönüşüm gibi dinamikler bu geçişi hızlandırmış; teknolojilerin toplumsal ve çevresel fayda üretme potansiyeli üzerine yürütülen akademik ve uygulamalı tartışmalar yoğunlaşmıştır (Priyadarshini vd., 2022: 567; Carayannis vd., 2023: 6695). Örneğin Covid-19 salgını ve Rusya-Ukrayna savaşı, ülkelerin özellikle fosil yakıt bağımlılığını azaltmak adına yerli temiz teknoloji kapasitelerini güçlendirmeleri gerektiğini açık biçimde ortaya koymuştur. Bu gibi gereklilikler göz önünde bulundurulduğunda, 2011'den itibaren artarak etkileri gözlemlenen Endüstri 4.0'ın ileri teknolojileri sanayi sektöründeki köklü değişimlerin temelini oluşturmuştur. AI, IoT, robotik sistemler, bulut altyapısı ve blokzincir gibi teknolojilerle otomasyona ve ölçeklenebilir sistemlere sahip olan işletmeler çevikleşirken, aynı zamanda inovasyon kapasitesini artırarak rekabet avantajlarını pekiştirmiştir. Artık sayısız ağdan oluşan küresel tedarik zincirlerinde işletmeler, toplumlar ve hükümetler başta olmak üzere bütün aktörlerin birbirlerine olan bağımlılıklarının ve buradan beslenen çatışmaların zaman içerisinde azalması beklenmektedir.

Üretim süreçlerinde ve sistemlerinde farklı alanlarda farklı amaçlara hizmet eden gelişmeler ve iyileşmeler kat ediliyor olsa da küresel çapta hala birçok farklı boyutta krizle karşı karşıyayız. Süregelen yıllar boyunca bu krizlerin çözümü için farklı modeller denenmiş, farklı görüşler ortaya atılmış ancak genellenebilir bir yol haritası ortaya çıkarılamamıştır. Muhtemelen bu sorun da tam olarak bu “genellenebilir” bakış açısından beslenmektedir. Literatürde bahsi geçen konular hakkında sayısız tanım ve sınıflandırma mevcuttur. Ancak bunların belki de çok az bir kısmı genellenebilir olmayan, bütünleşik bir bakış açısıyla ortaya konulmuştur. Ancak sorun sadece bu bakış açısıyla oluşturulan çalışmaların azlığı değil, bu çalışmalardan alınan öğretilerin de doğru bir şekilde uygulanmamasından kaynaklanıyor olabilmektedir. Yani, bu bütünleşik bakış açısının da genellenmemesi, her oluşumun kendi özelliklerine ve koşullarına göre edindiği öğretiyi şekillendirmesi gerekecektir. Buradan yola çıkarak bu çalışmada çevik üretimin Endüstri 4.0'ın etkisiyle daha sürdürülebilir bir şekilde uygulanabilir olup olmadığını irdelemek amacıyla İDA sektöründe bir uygulama yapılmasına

karar verilmiştir. Uygulama yapılmadan önce; çevik üretim, Endüstri 4.0, sürdürülebilirlik ve İDA kavramlarının mümkün oldukça kapsamlı bir şekilde ele alındığı bir literatür taraması gerçekleştirilmiş, bu kavramların İDA üretim süreçlerine olan etkileri hakkında fikir elde edilmeye çalışılmıştır. Literatür taraması bahsi geçen kavramlar çerçevesinde gerçekleştirilmiş; olabildiğince bütünsel bir bakış açısıyla soru formları oluşturulmuş ve veriler toplanmıştır. Toplanan veriler BDELPHI ve BTOPSIS yöntemleri ile analiz edilmiş ve sonuç olarak bulgular yorumlanmıştır.

Bu çalışmanın temelini oluşturan literatür taraması, çeviklik ve çevik üretim kavramının tanımında fikir birliği bulunmadığını göstermektedir. Çeviklik kavramı bazen esneklik (flexibility) bazen de dayanıklılık (resilience) kavramlarıyla aynı anlamda gibi kullanılabilir (Akpınar ve Özer-Çaylan, 2022: 297; Chervenкова ve Ivanov, 2023: 9). Ayrıca çeviklik kavramının esnek üretim, yalın üretim, hızlı inovasyon gibi diğer yaklaşımlarla iç içe geçtiği görülmektedir (Vázquez-Bustelo vd., 2007: 1303). Oysa çeviklik, dayanıklılık ya da esneklikten daha kapsamlı ve bütünsel bir yaklaşımı ifade etmektedir. Esneklik ve dayanıklılık belirli bir faaliyet ya da unsurun niteliği olarak değerlendirilirken, bu faaliyetlerin esnek ve dayanıklı olması çevikliğe katkı sağlayabilir; ancak bir sistemin çevikliği yalnızca tekil faaliyetlerin niteliklerinden değil, sistemin genel esneklik ve dayanıklılık düzeyinden kaynaklanabilir. Örneğin, yalnızca tek bir işlevi yerine getiren bir makinenin, birden fazla işlevi gerçekleştirebilen bir makine ile değiştirilmesi üretim sürecinde esnekliği artırabilir. Ancak bu durum, sistemin bütünüyle esnek veya çevik hale geldiği anlamına gelmez. Bir sistemin gerçekten çevik olabilmesi, yalnızca üretim süreçlerinin değil, aynı zamanda tüm paydaşların, tedarikçilerin ve diğer ilgili aktörlerin de bu esnekliğe uyum sağlayabilmesini gerektirir. Dolayısıyla, çeviklik ile esneklik arasındaki bu ayrımın netleştirilememesi, literatürde çevik üretim kavramının çoğu zaman farklı yaklaşımlarla karıştırılmasına ve kavramsal bir belirsizlik oluşmasına neden olmuştur. Bir başka görüş de Qamar ve diğerlerinin (2020) çalışmasında yer alan esneklik ve kalite arasında ters ilişki olduğu iddiasıdır. Çevikliğin üretim sistemine getirdiği esnekliğin kaliteyi düşüreceğini; yani yüksek kalitenin düşük esneklik, yüksek esnekliğin düşük kalite getireceğini öne süren Qamar ve diğerleri, her iki parametrede de istenen düzeye gelinebilmesi için yalın üretimin sisteme entegre edilmesi gerektiğini belirtmiştir. Kısmen doğru sayılabilecek bu önermede, bahsi geçen kavramların belli bir seviyede hayata geçirilebilmesi için sektör ihtiyaçlarına göre adaptasyon ve entegrasyonlarının gerekli görülebileceği vurgulanmak istenmiş olabilir. Dolayısıyla eğer bir işletmenin çevik olması ve kaliteli ürünler üretmesi yalın üretimin bu işletmenin sistemine entegre edilmesiyle mümkün olabiliyorsa, burada herhangi bir olumsuzluk ya da anlamsızlık söz konusu değildir.

Ancak bu bilgiyi, çevre ve piyasa koşulları göz önünde bulundurulmadan bütün sektörlerde genellenebilir olarak nitelendirmek maalesef başarısızlığa sebep olacaktır. Bu nedenle Qamar ve diğerlerinin çalışması gibi kavramları ayrıştıran ve genelleyen uygulamalar yerine; bu çalışmanın bulguları ve sonuçlarının gösterdiği gibi her işletmenin ve her sektörün kendi özel ihtiyaçlarına göre strateji ve teori benimsenmesi önerilmektedir.

Çeviklik hakkındaki bu fikir ayrılıklarının bir başka nedeni olarak kavramın hem literatürde hem de iş dünyasında kuramsal bir temellendirmeden yoksun olarak hızlı bir şekilde gelişim göstermesi öne sürülmektedir. Çevikliğe olan ilginin son on yılda hız kazandığı, bu artışın özellikle Endüstri 4.0, iklim krizi ve ardından pandemi koşullarıyla birlikte dijitalleşmede yakalanan ivmeyle paralel gerçekleştiği ve bu alanda yapılan araştırma ve uygulamaların sayısının artış gösterdiği gerçekleştirilen literatür taramasında gözlemlenmiştir. Çevik üretim, sürdürülebilirlik ve Endüstri 4.0 arasındaki bu ilişki ağı neticesinde literatürde farklı yorumlama ve sınıflandırmaların ortaya çıkması kaçınılmazdır. Örneğin, bazı çalışmalar çevikliğin aşırı üretim ve tüketimi tetikleyerek çevresel maliyetleri artırabileceğini belirtirken (Beier vd., 2020: 10), bazı çalışmalar ise Endüstri 4.0 teknolojilerinin getirdiği yenilikler sayesinde dijitalleşme ve kaynak verimliliği yoluyla çevresel sürdürülebilirliğin destekleyebileceğini öne sürmektedir (Gabriel ve Pessl, 2016: 134). Bu çelişkili görüşlerden hareketle, bu çalışmada çevikliğin yalnızca hız ve esneklik değil, aynı zamanda sürdürülebilirlik ilkeleriyle de uyumlu olacak biçimde yapılandırılması gerektiği vurgulanmıştır.

Sürdürülebilirlik konusu, aslında bu araştırmaya konu olan kavramlar içerisinde en köklü ve belki de en kapsamlı olandır. Bu nedenle diğer kavramlardan ayrıştırılarak detaylı irdelenmesi gereken bir konudur. Sürdürülebilirlik literatüründeki geleneksel bakış açısına göre, sürdürülebilirliğin yönetilebilmesi tedarik zincirleri ve ağlardaki aktörlerin sahip olduğu eşitsizlikler nedeniyle mümkün değildir. Ancak bu bakış açısının değiştiği; tedarik zincirlerinin toplumsal ve çevresel reform için bir alan oluşturabileceği görülmektedir (Bush vd., 2015: 8). Artık üretim ve tüketim faaliyetleri geçmişte olduğu gibi belirli sınırlar içerisinde gerçekleştirilmemekte, giderek daha fazla sınır aşan bir nitelik kazanmaktadır. Tedarik zinciri yönetimi, sınır tanımayan üretim ve tüketim faaliyetlerinin anlaşılmasını ve organize edilmesini sağlayan en önemli yapılardan biridir. Ancak kuruluşlar küreselleşen üretim ve tüketimin sürdürülebilirliğini tek başlarına düzenleme ve yönetme konusunda giderek yetersizleşmektedir. Dolayısıyla birincil üreticiler, perakendeciler ve tüketiciler başta olmak üzere süreçteki bütün aktörleri kapsayacak yeni düzenlemelerin hayata geçirilmesi gerekmektedir (Silva-Castaneda, 2012: 362).

Küresel üretim ve tüketim faaliyetlerinde sürdürülebilirlik geçmişten farklı olarak ekonomik pratiğin ötesine geçmiş; toplumsal hareketler, uluslararası sivil toplum kuruluşları, özel şirketler ve devletler başta olmak üzere etkileşim halindeki bütün aktörler tarafından yürütülen “siyasal bir uzlaşma ve kurumsallaşma projesi” olarak değerlendirilebilecek bir yapıya dönüşmüştür (McCarthy vd., 2012: 564). Bu noktada bir işletmenin sürdürülebilir olabilmesi için, temas halinde olduğu bütün aktörler arasındaki ilişkileri ve bu aktörlerin birbirlerine olan etkilerini anlamak ve buna uygun stratejiler geliştirmek durumundadır (Bush vd., 2015: 9).

Bir tekil örgüt ile gezegensel sürdürülebilirlik arasındaki ilişkiyi doğrudan kurmak neredeyse imkânsızdır; çünkü bu ilişkiyi belirleyen ağlar ve karşılıklı bağımlılıklar son derece karmaşıktır. Dahası, sürdürülebilirlik kavramının örgüt düzeyinde somut ve ölçülebilir bir karşılığı olduğunu varsaymak, aslında kavramın özünü göz ardı etmek anlamına gelir (Gray, 2010: 48). Sürdürülebilirlik, aslında tek bir kurum ya da küçük bir toplulukla açıklanabilecek bir şey değildir; daha geniş sistemlerle ilgilidir. Çevresel açıdan bakıldığında da sürdürülebilirlik, ancak ekosistem düzeyinde gerçek bir anlam kazanır. Yani, ormanlar, okyanuslar ya da iklim sistemleri gibi bütünsel yapılar üzerinden anlaşılabilir. Bu nedenle kavramı ekosistemlerden daha küçük ölçekte, örneğin sadece bir şirket ya da tek bir tür üzerinden ele almak çoğu zaman yanıltıcıdır ve kavramın bütünlüğünü yansıtmaz. Öte yandan işletmelerin sürdürülebilirlik söylemlerinin gün geçtikçe daha baskın hale gelmesi nedeniyle karşı anlatılara ihtiyaç vardır. Kapitalizm ve işletmeler çoğunlukla ekolojik tahribatın başlıca sorumluları olarak görülmektedir. Bu nedenle, örgütsel düzeyde dahi alternatif sürdürülebilirlik anlatılarının geliştirilmesi kaçınılmaz bir gereklilik haline gelmiştir (Gray, 2010: 57).

Sürdürülebilirlik söylemlerinin kurumsal düzeyde sıklıkla çarpıtıldığı görülmektedir. İş dünyasında “sürdürülebilirlik” kavramı çoğu zaman sosyal sorumluluk ya da çevre yönetimiyle eşanlamlı biçimde kullanılmakta, bu da kavramın daraltılarak asıl içeriğinin zayıflamasına yol açmaktadır. Şirketlerin sürdürülebilirlik raporları incelendiğinde, kavramın çoğunlukla işletmenin kendi sürekliliğiyle özdeşleştirildiği ve raporların etkileyici bir söylemle sunulmasına rağmen somut ve kanıtlanabilir içerikten yoksun olduğu görülmektedir. Bu nedenle söz konusu raporların önemli bir kısmı, gerçekte sürdürülebilirlik hesapları olmaktan çok, güçlü fakat temelsiz “kurumsal masallar” niteliği taşımaktadır (Gray, 2010: 50). Sonuç olarak sürdürülebilirlik, moderniteyle çelişkili bir ilişkiye sahiptir; bir yandan aydınlanmanın ideallerini taşıırken, diğer yandan ilerleme mitini sorgular. Bu nedenle sürdürülebilirlik bilgisi yalnızca bilimsel temellere değil, aynı zamanda estetik, ahlaki ve kültürel bir algıya da dayanmaktadır.

Sürdürülebilirliğin literatürdeki farklı tanımları; ekonomik, çevresel ve sosyal boyutların birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ve sürdürülebilirliğin bu boyutların kesişiminde var olduğunu vurgular (Seuring ve Müller, 2008: 1706). Ancak işletmeler için genellikle ekonomik boyut ağır basmakta, sosyal ve çevresel boyut geri planda kalmaktadır (Ly ve Cope, 2023: 4). Bunun nedeni olarak mevcut modellerin sürdürülebilirliği sağlayacak kapasitede olmadığı söylenebilir. Bu nedenle bütünsel bir sistem yaklaşımı benimsenmelidir. Örneğin Hariram ve diğerleri (2023: 19), “Sustainalism” adını verdikleri yeni bir model önermektedir. Bu model, bütünsel bir paradigma olarak önerilmekte; birey, kurum ve devletlerin birlikte hareket etmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Hariram vd., 2023: 24). Ayrıca yaşam kalitesi, eşitlik, kültür, barış, sosyal adalet ve ekolojik restorasyon gibi olgular bu kavramın temelini oluşturmaktadır.

Literatürde sürdürülebilirliğin Endüstri 4.0 ile olan ilişkisi incelendiğinde bu ilişkinin farklı bakış açılarıyla tartışıldığı görülmektedir. İnternetin ortaya çıkışından itibaren yaşanan teknolojik gelişmeler, özellikle iletişim alanında toplumsal altyapının oluşmasını sağlamış; bu gelişmelerin bireyler, hükümetler ve uluslararası kuruluşlar için pek çok sorunun çözümünde kilit rol oynayacağı vurgulanmıştır. Örneğin, Samsung’a göre (2020:12); 5G ve dijitalleşmenin birleşiminin 2030 yılına kadar sera gazı emisyonlarını %15 oranında azaltabileceği beklenmektedir. Sosyal boyuttan düşünüldüğünde ise 5G ağları uzaktan eğitimi mümkün kılarak eğitim eşitliğinin artırılmasına katkı sağlayabilecektir. Ancak, bütün yeniliklere ve diğer önlemlere rağmen, bölgesel ve toplumsal eşitsizlikler genişlemeye devam etmektedir. Bu tür toplumsal sorunların temelden çözülmesi amacıyla işletmelerin bütün faaliyetlerini SKA’lar çerçevesinde gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

Sürdürülebilirlik hedefiyle Endüstri 4.0’ın başarılı bir şekilde uygulanması için literatürde bazı kritik faktörler yer almaktadır (Sony ve Naik, 2020: 799). Öncelikle işletmeler Endüstri 4.0 girişimlerini kurumsal stratejileri ile uyumlu hale getirmelidir. Endüstri 4.0’ın heterojen ve bütünsel yapısı nedeniyle strateji geliştirme aşamasında bu faktöre dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu aşamada üst yönetimin güçlü desteği süreci kolaylaştıracaktır. Ancak Endüstri 4.0’ın başarısı için sadece üst yönetimin katkısı yeterli olmayacak; tüm çalışanların ortak paydada bulunduğu bir yapılaşma gerekecektir. Bu yapılaşma gereğince ürün veya hizmetler akıllı hale getirilecek, tedarik zincirini dijitalleştirmek için çaba sarf edilecek, kurumsal dijitalleşme ve değişim yönetimi gibi konulara odaklanılacaktır. Her süreç proje yönetimi mantığı ile tasarlanacak, bu tasarımlarda siber güvenlik başta olmak üzere tüm koruma mekanizmaları aktifleştirilecektir. Güvenlik, çok fazla gündem olmamasına rağmen ciddi tehlikeler yaratabilecek bir konudur. Örneğin, 2023 tarihli ThreatLabz raporuna göre, 2022

yılına kıyasla IoT hedefli siber saldırılarda %400'lük bir artış yaşanmıştır. En fazla hedef alınan sektör ise üretim sektörü olmuş; bildirilen saldırıların %54,4'ü bu alana yönelmiştir. Dolayısıyla Endüstri 4.0'ın getirdiği teknolojilerin üst düzey güvenlik sistemleriyle üretim süreçlerine entegre edilmesi gerekmektedir. Kabaca aşamaları tasfir edilen bu dönüşümün sonucunda Endüstri 4.0 teknolojileri sayesinde sürdürülebilir bir sistem elde edilebilecektir.

Sürdürülebilirlik, teknolojik girişimlerin en önemli itici güçlerinden biri olarak görülmektedir. Örneğin Christian (2024), IoT hakkındaki 2023 tarihli haberleri derlerken, sürdürülebilirlik ve çevresel-sosyal-yönetişim konularının, o yıl IoT girişimlerini en fazla hızlandıran faktörler olduğunu tespit etmiştir. Bu ivmenin arkasındaki temel etkenler ise, Birleşik Krallık'ın Sürdürülebilirlik Açıklama Standartları, Hindistan'ın Yeşil Kredi Kuralları ve AB'nin Yenilenebilir Enerji Direktifi gibi ülke ve bölgesel düzeyde yürürlüğe giren iklim ve sürdürülebilirlik yasalarıdır. Bu düzenlemelerin kurumsal düşünce tarzını da etkilediği görülmektedir: 2019 ikinci çeyrek ile 2024 ikinci çeyrek arasında, yönetim kurulu düzeyindeki toplantılarda sürdürülebilirliğe ilişkin konuşmaların oranı %9,4'ten %23,6'ya yükselmiştir. Yani süreç sadece teknoloji ediniminin çok ötesine geçmiş; işletmeler, çalışanlar, toplum ve hükümet başta olmak üzere küresel çapta aktörlerin yer aldığı sistemsel bir yapıya ulaşmıştır.

Endüstri 4.0 sürdürülebilirlik ve çeviklik anlamında daha birçok kolaylaştırıcı etmene sahiptir. Örneğin, enerji sayaçları, su kalitesi sensörleri ve hava kirliliği izleme cihazları gibi donanımların sistemlere entegre edilebilmesiyle sürdürülebilirlik raporlamasının otomasyonu ve sadeleştirilmesi sağlanabilmektedir (Sinha, 2024). Enerji sayaçları gerçek zamanlı elektrik tüketimini izleyip raporlayabilmekte, böylece şirketlerin enerji kullanımını takip edip optimize etmesine yardımcı olabilmekte; su kalitesi sensörleri pH, sıcaklık ve bulanıklık gibi parametreleri ölçerek, su kullanımı ve bertarafının çevresel standartlara uygunluğunu sağlayabilmektedir.

Dijitalleşme, Endüstri 4.0 ve özellikle AI artık şirket yöneticilerinin öncelikli gündem maddesi konumundadır. 2023'ün ilk çeyreğinden bu yana yapılan kazanç toplantılarında diğer tüm teknoloji konularından daha fazla AI'nın gündeme geldiği; bu oranın 2024 ikinci çeyreğinde görüşmelerin %34'üne ulaştığı belirtilmektedir (Sinha, 2024). Bu durum üretim süreçlerine de sirayet etmektedir. Bunun önemli örneklerinden biri, Siemens'in (2025) "Industrial Copilot" ürününü piyasaya sürmesidir. Siemens'in Industrial Copilot ürünü, Microsoft iş birliğiyle geliştirilen, generatif yapay zekâ destekli bir endüstriyel asistan olarak tanıtılmıştır. Bu asistan mühendislerin ve operatörlerin otomasyon kodu yazma, hata ayıklama, bakım ve operasyon süreçlerinde hız kazanmasını, hataları azaltmasını ve verimliliği artırmasını sağlamaktadır. Aynı zamanda bakım süreçlerini öngörücü hale getirerek maliyet ve duruş sürelerini azaltmayı

hedeflemektedir. Henüz pilot uygulamalarda olsa da Industrial Copilot, üretimden bakım-onarıma kadar geniş bir alanda kullanılmaya başlanmış durumdadır.

Bir başka örnek olarak Oxford Üniversitesi'nden akademisyenlerin, ABD'deki işlerin %47'sinin otomasyon tehdidi altında olduğunu savunmaları gösterilebilir. Öte yandan, teknolojik ilerlemelerin ve bilgisayarlı sistemlerin işsizliği net olarak artırıp artırmadığı konusunda geniş bir tartışma bulunmaktadır. Endüstri 4.0'ın bu konudaki etkilerine dair görüşler iki yönlüdür. Bunlardan biri otomasyonu bir tehditten ziyade bir fırsat olarak görmektir. Yeni teknolojiler birçok “düşük değerli” işi insan gücünün yerine getirirken, çalışanlar enerjilerini katma değer yaratabilecekleri alanlara yönlendirme ve yeteneklerini geliştirerek yüksek değerli beceriler kazanma özgürlüğüne sahip olurlar. Dolayısıyla mevcut işlerin iyileştirileceği ya da yeni işler yaratılacağı ileri sürülmektedir. Daha kötümser görüşlere göre, dijital teknolojilerin ağırlıklı olarak bazı işlerin ortadan kalkmasına yol açacağı savunulmaktadır. Endüstri 4.0 kapsamında AI ve büyük veri, makinelerin daha insan benzeri yetenekler kazanmasını sağlamakta; bu da tekrarlayan ve standartlaşmış işlerin makineler tarafından ikame edilmesine yol açmaktadır. Bu işleri yapan çalışanların başka herhangi bir yetisi olmaması durumunda işsiz kalma riski ortaya çıkmaktadır. Özetle Endüstri 4.0 teknolojileri, yüksek vasıflı çalışanlar için yeni iş fırsatları yaratabilirken; orta ve düşük vasıflı çalışanlar için yeni görevleri üstlenebilmeleri amacıyla ek beceriler edinmeleri gerektiğini ortaya çıkmaktadır (Carayannis vd., 2023: 6697).

Yöneticiler Endüstri 4.0 teknolojilerini süreç izlemeyi kolaylaştıran bir teknolojiler demeti olarak algılamaktadır. Yöneticilerin Endüstri 4.0'a yönelik, müşteriler için değer yaratan çözümler geliştirebileceğine dair bir beklentisi bulunmamaktadır (Calabrese vd., 2021: 213). Bu da Endüstri 4.0 uygulama yapılan en büyük hatalardan biri olarak yorumlanabilir. Ayrıca şirketlerin büyüklüğüne bağlı olarak bu teknolojileri benimseme oranlarının farklılaştığı saptanmıştır. Küçük ölçekli işletmelerin önündeki engeller olarak yüksek yatırım maliyetleri ve düzenleyici çerçeve sorunları öne çıkarken; büyük ölçekli işletmeler için bu gibi durumlar çok büyük bir engel teşkil etmemekte ve dolayısıyla bu işletmelerin teknolojileri benimseme oranları daha yüksek olmaktadır (Calabrese vd., 2021: 219). Bu gibi dengesizlikler tedarik zinciri süreci başta olmak üzere bütün üretim sürecinin çevik ve sürdürülebilir nitelikte gerçekleştirilememesine neden olmaktadır. Çeviklik kavramı yalnızca içsel süreçlerin değil, aynı zamanda tüm değer zincirinin birlikte hareket etmesini gerektiren sistemsel bir özellik olarak ele alınmalıdır. Özellikle Covid-19 gibi kriz dönemlerinde geçici ve çevik tedarik zincirleri kurarak hızlı tepki verebilen firmaların, aksaklıkların etkilerini azaltmada başarılı olduğu görülmüştür (Müller vd., 2023: 426). Literatürde tedarik zinciri çevikliği kavramı;

yalnızca talep değişimlerine değil, aynı zamanda kesintilere karşı da hızlı yanıt verebilme kapasitesi olarak tanımlanmıştır (Gligor, 2014: 578; Udenio vd., 2018: 17). Dolayısıyla bu araştırmada da çeviklik, yalnızca işletme içi süreçlere özgü bir olgu değil, aynı zamanda bütün değer zincirinin eşgüdüm içinde çalışmasını zorunlu kılan bütüncül bir sistem özelliği olarak değerlendirilmiştir.

Tedarik zincirinin dijitalleşmesi, İDA sektörü gibi rekabet güçlerini ve kârlılıklarını artırmaya çalışan, siparişe göre mühendislik endüstrilerinde faaliyet gösteren şirketler için kritik bir rol oynamaktadır (Centobelli vd., 2023: 1). Gemi inşa endüstrisi, tek bir nihai ürünün teslimi için birkaç ay ile birkaç yıl arasında değişebilen uzun süreçleri kapsayan, gemilerin tasarımını, inşasını ve kurulumunu içeren karmaşık bir değer zincirine sahiptir (Lee vd., 2020: 627). Buna karşılık, İDA'ların üretim süreci çok daha kısa sürelerde tamamlanabilmektedir. Bu farklılık, İDA üretiminde rekabetçi baskının daha yoğun yaşanmasına yol açmakta; işletmelerin, teknolojik güncellemeleri yakalayabilmek ve pazarın değişen taleplerine uyum sağlayabilmek için yüksek hızda hareket etmelerini zorunlu kılmaktadır.

Nitekim bu çalışmada İDA sektörü özelinde sürdürülebilirlik ve Endüstri 4.0 kavramları göz önünde bulundurularak belirlenen ÇYG'ler ve ÇS'ler BDELPHI yöntemiyle analiz edilmiş; çevikliği stratejik bir hedef olarak benimseyen İDA firmalarının hangi çeviklik göstergeleri ve yeteneklerine öncelik vermesi gerektiği, uzman görüşlerine ve literatüre dayandırılarak ortaya konmuştur. Sonuç olarak İDA üretimi gibi yüksek teknolojili, özelleştirilmiş ve hızlı yanıt gerektiren sektörlerde çevikliğin hem operasyonel hem de stratejik düzeyde vazgeçilmez olduğu anlaşılmıştır. İDA üretiminin kısa döngülü, teknoloji yoğun ve savaş gibi kriz ortamlarında hızla güncellenebilir özellikte olması, işletmeleri sürekli yenilik ve adaptasyon arayışına itmektedir. Ancak bu özellikler aynı zamanda sürdürülebilirlik açısından zorlukları da beraberinde getirmektedir. Bu çalışma, bu gerilimi anlamaya ve denge kurmaya yönelik ilk adımlardan biri sayılabilir. Aslında İDA üretim süreçlerinin çevik ve teknoloji odaklı olması olağan karşılanırken, yıkıcı bir amaçla üretilmiş bu aracın çevre koruma konusunda hassas özelliklere sahip olması tezat bulunabilmektedir. Çünkü mevcut kullanım alanları genellikle askeri operasyonlar olan İDA'ların görevlerini yerine getirirken sürdürülebilir olmaları ironik görünebilir. Öte yandan bu çalışma kapsamında İDA sektör uzmanlarıyla gerçekleştirilen görüşmelerde, özellikle Avrupalı müşteriler için çevre ile ilgili yaptırımların, yönetim sistemlerinin ve standartların oldukça önemli olduğu bilgisine ulaşılmıştır. Dolayısıyla bu üreticilerin ilgili gerekleri yerine getirme konusunda diğer sektörlerle kıyasla daha dikkatli olduğu düşünülmektedir. Gerçekleştirilen analizlerde ÇYG'lerde hiçbir ifadenin bir sonraki aşamaya geçmezken, Sürdürülebilirlik konusundaki ÇS'lerden bir tanesinin ileri analize

geçmesi ve analiz sonucunda yüksek skorla üst sıralarda yer alması bu durumun göstergesi olarak sunulabilir. Öyle ki aslında işletmelerin sürdürülebilirlik kapsamında somut bir ÇYG'si olmamasına rağmen başarıyı yakalayabilmeleri için bu alanda bir stratejiyi benimsemeleri kaçınılmazdır. Ek olarak İDA'nın potansiyel kullanım alanlarına bakıldığında, üretim süreçlerinin çevreci bir yapıda olmasının gelecek açısından umut vaat eden bir öngörü olduğu savunulabilir. Örneğin gelecek yıllarda toplu taşımaya ya da kargo ve lojistik sistemlerine entegre edilecek bir İDA'nın sürdürülebilir kalkınma amaçlarıyla örtüşen bir yapıya sahip olması, yalnızca çevresel etkilerin azaltılmasına değil, aynı zamanda toplumsal refahın artırılmasına ve ekonomik verimliliğin güçlendirilmesine de katkı sağlayacaktır. Uluslararası kargo taşımacılığının büyük ölçüde deniz taşımacılığına bağlı olduğu göz önünde bulundurulduğunda (Saini vd., 2021: 393) İDA'ların bu süreçlere dahil edilmesi azımsanmayacak ölçüde katkılar sunacaktır.

Özetlemek gerekirse bu çalışmada, yukarıda bahsi geçen bütün kavramlar ve bu kavramların tanımlamaları, ilişkileri ve birbirlerine olan etkileri değerlendirilmiş, kapsamlı ve bütünlük bir çerçeve sunulmaya çalışılmıştır. Ne çevik üretim ne Endüstri 4.0 ne de sürdürülebilirlik için ortak bir tanım, uygulama formülasyonu ya da kılavuz oluşturulması söz konusu değildir. Tam aksine bu ortaksızlığın olağan bir durum olduğu değerlendirilmektedir; zira bu kavramlar çok boyutlu, çok faktörlü ve geniş kapsamlı bir yapıya sahiptir. Dolayısıyla bu çalışmada vurgulanmak istenen nokta, söz konusu kavramların üzerinde fikir birliği sağlanmış tanımlarının bulunmaması değil, bu belirsizliğin doğasının onların bütünlük ve çok yönlü yapılarından kaynaklandığıdır.

Bu çalışmanın bulgularının, özellikle İDA sektör uzmanlarının çeviklik, sürdürülebilirlik ve Endüstri 4.0 kavramları arasındaki bütünlük ilişkisi kavrayabilmesine katkıda bulunduğu umulmaktadır. Hem işletmelerdeki karar vericilerin hem de ulusal politika yapıcılarının gerçekleştirilen analizler neticesinde belirlenen kritik stratejilere odaklanmaları ve bu stratejileri etkin şekilde uygulayabilmeleri için sahip olmaları gereken yeteneklere yatırım yapmaları önerilmektedir. Çevik organizasyonlar, sadece kendi içsel dinamiklerine odaklanmak yerine, müşteri odaklı net hedeflerle tanımlanmış ve amaca yönelik işleyen ekosistemler içerisinde daha etkin şekilde faaliyet gösterebilir. Belirsizliğin yüksek olduğu ve karmaşıklaşan çevresel koşullarda, öngörülemeyen ve plansız değişimlere karşı hızlı tepki verebilme yeteneği hayati önem taşımaktadır. Bu çalışma, aynı zamanda işletmelere yüksek belirsizlik içeren iş ortamlarında çeviklikle ilgili yetenek ve göstergeleri kavrama, edinme ve uygulama gerekliliğini anlama konusunda bir fırsat sunabilir.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen literatür taramasında denizcilik alanına ilişkin yayınların büyük ölçüde ticari faaliyetlere odaklandığı görülmektedir. Bu durum, çalışmanın özgün katkısını daha görünür kılmaktadır; zira mevcut araştırma, ticari temelli yaklaşımlardan farklı olarak çeviklik, sürdürülebilirlik ve Endüstri 4.0 ekseninde ele alınmış ve böylece literatürde azınlıkta kalan bir perspektif sunmuştur. Ticari faaliyetlerin sürdürülebilirliği hâlen alanın temel ilgi alanlarından biri olarak öne çıkarken, İDA'ların bu bağlamda yaratabileceği yenilikçi dönüşüm, literatüre yalnızca ek bir boyut kazandırmakla kalmayıp aynı zamanda mevcut ticaret odaklı yaklaşımlara alternatif bir bakış açısı da getirmektedir.

Son yıllarda uluslararası güvenlik ortamında yaşanan gelişmeler İDA konusunun önemine işaret etmektedir. Özellikle Ukrayna savaşında ortaya çıkan deneyimler, birçok ülkenin savunma stratejilerini yeniden gözden geçirmesine yol açmıştır. Ukrayna'nın Karadeniz'de insansız deniz araçlarıyla gerçekleştirdiği saldırıların etkili sonuçlar doğurması, bu sistemlerin harp sahasındaki rolünü öne çıkarmıştır. Nitekim İDA'lardan ateşlenen füzelerle iki helikopterin etkisiz hale getirilmesi, literatürde “ilklerden” biri olarak anılmaktadır (Yücel, 2024).

Küresel anlamda dikkat çeken bu alana karşı Türkiye de duyarsız kalmamış, insansız hava araçlarında kaydettiği ilerlemenin ardından, insansız deniz araçları alanında da çeşitli yatırımlar ve projeler başlatmıştır. Savunma literatüründe yer alan güncel paylaşımlara göre Türk Deniz Kuvvetleri'nin “Proje ve Etüt Faaliyetleri” kapsamında 2025 yılı itibarıyla İDA Grup Komutanlığı'nın kurulmasını teklif edilmiştir (Işık, 2025). Bu çerçevede söz konusu komutanlığın Aydın'ın Didim ilçesinde tesis edilmesi planlanmakta olup, gerekli altyapı ve üstyapı çalışmalarının yürütüldüğü bildirilmektedir. Ayrıca İDA'ların farklı bölgelerde konuşlandırılmasına dönük hazırlıkların sürdürülmesi de öngörülmektedir. Bu doğrultuda Aksaz, Foça, Çanakkale, Gölcük, Mersin ve Karadeniz Ereğli gibi stratejik bölgelerde İDA altyapı ihtiyaçlarının karşılanmasına yönelik çalışmaların yürütülmesi planlanmaktadır. Bu gelişmelere ek olarak Türkiye uluslararası bağlamda da adımlar atmaktadır. ASELSAN ile Sefine Tersanesi iş birliğiyle geliştirilen MARLİN SİDA'nın ve ARES Tersanesi ile Meteksan ortaklığında geliştirilen ULAQ SİDA'nın NATO tatbikatlarında yer alması, Türkiye'nin bu alanda ulaştığı seviyeyi göstermesi açısından dikkat çekmektedir (Işık, 2025). Ayrıca ULAQ SİDA'nın ihracat başarısı, İDA ve savunma sanayi uygulamalarında ortaya çıkan potansiyeli somutlaştırmaktadır. Önümüzdeki dönemde hem Türkiye'de hem de dünyada farklı türde İDA'ların değişen konseptlerle geliştirilmesi ve sahaya sürülmesi de muhtemel görünmektedir.

Bir diğer katkı olarak bu çalışmanın ÇKKV yöntemleri açısından da bir yenilik taşıdığı düşünülmektedir. Literatürde gerçekleştirilen BDELPHI uygulamalarında eşik değeri

hesaplaması konusunda, detayları bu çalışmanın analiz bölümünde de verildiği üzere birbirinden farklı görüşler yer almaktadır. Literatürde eşik değeri genellikle fikir birliğine varılmış değerler olarak seçilebilmekte ya da o analize özgü olarak hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada her iki yöntemin de yeterli hassasiyeti sağlayamayacağı düşünülmüştür. Çünkü bu çalışmada 6'şar kategori içerisinde farklı sayılarda ifadeler yer almaktadır. Örneğin 2 ifadenin yer aldığı bir kategorinin etkisi ile 8 ifadeli kategorinin etkisinin genel eşik değerini aynı derece etkilemeyeceği düşünülmüştür. Bu nedenle literatürde kabul edilen ya da bütün ifadeler üzerinden hesaplanan bir eşik değeri yerine kategorik eşik değeri hesaplaması gerçekleştirilmiştir. Yani, Tedarik Zinciri kategorisinde yer alan ÇYG'ler için ayrı, Sürdürülebilirlik kategorisinde yer alan ÇYG'ler için ayrı eşik değerleri hesaplanmış ve bu değerlere göre her bir kategoride bir sonraki aşamaya geçen ifadeler belirlenmiştir. BDELPHI süreci sonrasında bazı kategorilerde hiç gösterge kalmadığı durumlarda, ilgili kategorilerin sistem dışı bırakılması gerekmektedir; çünkü bu durumda herhangi bir veri temeli bulunmamaktadır. Bazı kategorilerde ise yalnızca bir ÇYG kaldığı durumlarda BTOPSIS analizinde kategorik denge aranmaksızın değerlendirme yapılması gerekmiştir. Bu nedenle BDELPHI sonrasında kategoriler tamamen kaldırarak göstergelerin doğrudan kriter olarak ele alınması BTOPSIS'in yapısına daha uygun bir yaklaşım sunmaktadır. Böylelikle tüm kriterler eşit düzlemde analiz sürecine dâhil edilebilmektedir. Ayrıca bu yapı değişikliğinin BDELPHI aşamasından sonra gerçekleştirilmiş olması, karar verme sürecine esneklik ve gerçekçilik kazandırmakta; bu da yöntemin bilimsel niteliğini desteklemektedir.

Bununla birlikte, bu çalışma belirli bir sektörde uygulanmış ilk örneklerden biri olması açısından özgünlük taşımaktadır. Gelecek çalışmalarda farklı sektör ve coğrafyalarda benzer analizlerin yapılması; böylece sektörel ve bölgesel düzeyde farklılaşan çeviklik stratejilerinin ve yeteneklerinin karşılaştırmalı olarak ortaya konması önerilmektedir. Ayrıca, farklı karar verme yöntemleriyle (örneğin DEMATEL, ANP, AHP gibi) yapılacak analizler ile elde edilen bulguların tutarlılığı test edilebilir. Nihayetinde sürdürülebilir bir gelecek için çevik üretim stratejilerinin yalnızca teknolojiyle değil, aynı zamanda politika yapıcıların yönlendirici çabalarıyla da desteklenmesi gerektiği açıktır (Fagerberg, 2018: 1573).

Bu çalışma kapsamında bazı değerli bulgular elde edilmiş olsa da, gelecekteki çalışmalarda daha fazla dikkat edilmesi gereken bazı hususlar da tespit edilmiştir. İlk olarak, farklı paydaşların İDA'lara yönelik tutum ve algılarına ilişkin kendi bildirdikleri veriler, paydaşların doğru cevap verme istekliliğine bağlı olarak yanıltıcı olabilmektedir. Hedef kitle, İDA'larla ilgili bilgi eksikliği, hükümet tarafından kendilerine karşı dava açılması ihtimali veya

bireysel tepkiler nedeniyle gerçek bilgileri bildirmeye istekli olmayabilmektedir. Bu nedenle sonuçların geçerliliğinin tespiti için farklı yöntemler uygulanması önerilmektedir.

Bu çalışmadaki en önemli kısıtlardan bir diğeri, detaylı ve kapsamlı bir literatür taramasından elde edilmiş olmalarına rağmen soru formunda yer alan ÇYG ve ÇS'lerin bir kısmının ilk defa bir analize konu olmasıdır. Kimisi farklı çalışmalardan alınan, kimisi yazar tarafından oluşturulan bu ifadelerin nasıl algılandıklarına yönelik uzmanlardan görüş alınmasına rağmen ifadelerin daha önce bir analizde değerlendirilmemiş olması sonuçları etkilemiş olabilir.

Yöntemsel olarak, çalışmada kullanılan BDELPHI yöntemi ve BTOPSIS yaklaşımı, karar verici uzmanların görüşlerine dayalı esnek ve uygulama odaklı bir yapı sunmuştur. Ancak BDELPHI sonrası bazı kategorilerde hiç ifade kalmaması, araştırmanın amaçları düşünüldüğünde istenmeyen sonuçlarla karşılaşılması anlamına gelebilir. Her ne kadar soru formlarında yer alan ifadeler literatür taraması sonucunda belirli kavramsal çerçeveler dahilinde belirlendiyse de literatürün bu anlamda yetersiz olma ihtimali bu araştırmanın kısıtlarından biridir. Bu nedenle bu çalışma yeni literatür taramalarıyla, farklı yöntemlerle ve farklı sektörlerle tekrarlanabilir.

Bu çalışmada BTOPSIS analizinde kriter katsayıları uzman görüşü doğrultusunda belirlenmemiştir. Bu durum kimi çalışmalarda bir kısıt olarak görülürken kimi çalışmalarda tam tersi bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır. Karar vericilerin uzmanlığına dayalı olarak belirlenen ya da model kurucusu tarafından oluşturulan sabit ağırlık sistemleri çoğunlukla belirsizlik ve muğlaklık yaratmakta; dolayısıyla kesin ve sağlam kararların elde edilmesini zorlaştırmaktadır (Rahman vd., 2024: 2). Bu nedenle bu çalışmada bütün kriterler için tek bir katsayı belirlenmiş; uzman pozisyonlarındaki farklılıklardan kaynaklı olarak önem derecelerinin objektif değerlendirilmemesi ihtimali minimize edilmiştir. Öte yandan kriter ve alternatif sayılarının görece yüksek olması, elde edilen sonuçların birbirine oldukça yakın değerler sergilemesine yol açmış olabilir. Bu durum bulguların geçerliliğini zayıflatmamakta; ancak ölçüm hassasiyetinin artırılması için ek analizler gerçekleştirilmesi ihtiyacını ortaya çıkarabilmektedir. Bu nedenle analizin geliştirilmesi için ek katsayılar kullanılması ya da Delphi sürecinin bir tur daha yürütülmesi de sonuçların farklılaşmasına katkı sağlayabilecek bir yöntem olarak değerlendirilebilir.

Araştırma yöntemi bağlamında incelendiğinde bu çalışmayı kısıtlayan bir diğer olgu İngilizce'de "Rank Reversal" olarak geçen sıralama tersinmesidir. Sıralama tersinmesi, ÇKKV yöntemlerinde ortaya çıkan ve mevcut alternatiflerin sıralamasının, yalnızca sisteme yeni bir alternatif veya kriter eklenmesi ya da mevcutlardan birinin çıkarılması sonucunda, herhangi bir

mantıklı gerekçe olmaksızın değişmesi durumunu ifade eder. Başka bir deyişle, başlangıçta daha iyi olarak değerlendirilmiş bir alternatif, yalnızca sisteme eklenen veya çıkarılan öğe nedeniyle alt sıralara düşebilmektedir. Bu durum, yöntemin istikrarı ve güvenilirliği açısından bir zayıflık olarak kabul edilmektedir. Zanakis ve diğerleri (1998: 527) tarafından gerçekleştirilen simülasyon karşılaştırmalarında, TOPSIS'in incelenen sekiz yöntem arasında en az sıralama tersinmesi yaşayan yöntem olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, TOPSIS literatürde çoğu zaman geliştirilen yöntemlerin temel yapısı olarak tercih edilmektedir. Ek olarak bu çalışmada yöntem bulanıklaştırılarak hassasiyetinin artırılması amaçlanmıştır.

Çalışmanın bir diğer kısıtı olarak, uygulamanın gerçekleştirildiği sektör ele alınabilir. İDA henüz kendisinin ortaya çıkmasının üzerinden kısıtlı zaman geçmiş bir olgu olarak hakkında doğru ve detaylı bilgiye ulaşmanın zor olabileceği bir sektördür. Ayrıca çoğunlukla askeri amaçlarla kullanıldığı için nitelikli veriye ulaşmak, ülke gizlilikleri açısından sorun teşkil edebilmektedir. Yine bu sebepten, İDA üretim sürecinin son derece niş bir alan teşkil ettiği açıkça anlaşılmaktadır. Buradan hareketle, İDA'lar her ne kadar teknoloji ve çeviklik odaklı yapılarıyla öne çıksalar da bu çalışma kapsamında ele alınmaları araştırma bağlamı açısından tartışmalı bir tercih olabilir. Örneğin, standart bir gemi inşa tedarik zincirinde, müşteriden sipariş alındıktan sonra tasarım, mühendislik, satın alma ve üretim süreçleri gerçekleştirilmektedir. Gemi inşa süreçleri binlerce mühendislik saati gerektiren büyük, son derece özelleştirilmiş ve karmaşık ürünlerin üretimini içerdiği için en karmaşık üretim türlerinden biri olarak kabul edilebilir. Üretim süreci büyük ölçüde müşteri gereksinimlerine bağlı olarak planlanmaktadır. Ayrıca gemi inşa operasyonları nadiren tekrarlanabilir olduğundan üretim süreçlerinde standardizasyon oldukça sınırlıdır. Dolayısıyla bu son derece özelleştirilmiş üretim, verimli ve uygun maliyetli otomasyon elde etmeyi de zorlaştırmaktadır (Centobelli vd., 2023: 3). Bu bağlanda gemi inşa sektörü adına bir gelişme kat edilmesi amaçlansaydı Endüstri 4.0'ın gemi inşa süreci üzerindeki çeviklik ve sürdürülebilirlik etkilerinin ölçülmesi daha anlamlı olabilirdi. Ancak belki de geleneksel gemi inşa süreçlerini bile etkileyecek bir teknoloji olan İDA nispeten kısa üretim döngüleri ve yüksek teknoloji entegrasyonu sayesinde çeviklik, Endüstri 4.0 uygulamaları ve sürdürülebilirlik boyutlarının birlikte incelenmesine elverişli bir bağlam sunmaktadır. İDA üretimi, standart gemi inşasına kıyasla daha kısa sürede tamamlanabilen ve fiziksel boyutları itibarıyla daha kolay organize edilebilen bir süreçtir. Ancak İDA'ların yüksek teknolojiye dayalı otonom kontrol sistemleri, sensör entegrasyonu ve siber güvenlik altyapısı gerektirmesi, üretim sürecini karmaşıklastırmaktadır. Bu nedenlerle “Çeviklik, Endüstri 4.0 ve Sürdürülebilirlik”

bağlamlarına uygunluğundan dolayı İDA üretimi yapan işletmelerin bu araştırmanın öznesi olarak kullanılmasına karar verilmiştir.

Son olarak ele alınan kısıt ise incelenen kavramların etkileri ile uygulama biçimlerinin farklı ortam koşullarında değişiklik gösterebilme olasılığının dikkate alınmamış olmasıdır. İşletmelerin bulunduğu coğrafya ve bu coğrafyanın kendine özgü koşulları, elde edilen analiz sonuçlarında ve dolayısıyla bunların yorumlanmasında farklılıklar yaratacaktır. Yani bu çalışma Türkiye yerine ABD’de gerçekleştiriliyor olsaydı araştırma kapsamında belirtilen görüşlerin önem sıralamalarında değişiklikler olması beklenen bir sonuç olurdu. Öte yandan bu çalışmanın bir genelleme yapma amacıyla gerçekleştirmemesi bu kısıttan kaçınılması konusunda bir gerekçe sunmaktadır. Öyle ki eğer bahsi geçen farklılıklar üzerine bir araştırma gerçekleştiriliyor olsaydı iki farklı bölgeden veri toplanarak ya da kategoriler farklılaştırılarak karşılaştırmalı analizler uygulanabilirdi. Ancak bu çalışmada, ulaşılabildiği kadarıyla bu alanda ve bu bağlamda gerçekleştirilen ilk ve tek çalışma olması sebebiyle bir kıyaslama yapmak yerine mevcut durumun yorumlanması üzerine analizler gerçekleştirilmiştir. Gelecekteki çalışmalarda bu araştırmanın kapsamı genişletilerek farklı bölgelerde ve farklı sektörlerde değerlendirmeler yapılması önerilmektedir.

Bulgular ve çalışmanın sınırlılıklarına ilişkin değerlendirmelerin ardından, bundan sonraki araştırmalara ışık tutabilecek öneriler sunmak mümkündür. Unutulmamalıdır ki Endüstri 4.0 kavramının bazı teknolojik unsurları sanayi sektöründe hâlihazırda yaygın şekilde kullanılmakta olsa da, ürün yaratım sürecinin tamamı boyunca dijitalleştirilmiş ve birbirine bağlı süreçlerin her bölgede ve her sektörde kapsamlı şekilde uygulanması mevcut sanayi yapısında hâlen istisnai bir durumdur (Fritzsche vd., 2018: 2). Bu bağlamda simbiyotik ilişkiler kurulmasını sağlayacak endüstriyel yaşam alanları oluşturulması konusunda araştırmaların yapılması önerilmektedir.

Kısıtlarda bahsedildiği üzere, bu çalışmada hedef çalışma alanı olarak Türkiye’ye odaklanılmıştır. Amaç her ne kadar genelleme yapmak olmasa da bölgesel faktörleri inceleyebilmek adına örneğin Akdeniz ülkeleri arasında yeni bir çalışma yürütülmesi planlanabilir.

Çevikliğin yalnızca üretim alanında değil; aynı zamanda organizasyonel yapı, stratejik planlama ve çevresel sorumluluk alanlarında da karşılık bulması gerektiği düşünülmektedir. Bu bağlamda Endüstri 4.0’ın dar bir verimlilik anlayışına sıkışmaması; insan merkezli, esnek ve sürdürülebilir bir yapıya dönüşmesi elzemdir. Nitekim Avrupa Komisyonu tarafından da Endüstri 5.0 paradigması, daha dirençli ve insan odaklı sanayileşme vizyonunun temeli olarak

tanımlanmıştır (Carayannis vd., 2023: 6697). Bu nedenle gelecek çalışmaların yönelimi bu paradigmların göz önünde bulundurulmasıyla şekillendirilmelidir.

Kirlilik, iklim değişikliği, arazi bozulması, biyoçeşitlilik kaybı, su ve gıda kıtlığı ile atık yönetimi gibi konular, özellikle Türkiye’de sıklıkla göz ardı edilen gündemler olmakla birlikte, sonuçlarının toplumsal ve ekonomik yaşam üzerinde kaçınılmaz etkiler doğuracağı açıktır. Carayannis ve diğerlerinin (2024: 6696) belirttiği üzere, bir grup genç aktivistin uçağa binmeyi reddetmesinde ilham verici bir yan vardır; ancak herkesin o aktivistler gibi davranması mümkün değildir. Orta yolun bulunması hem üreticilerin hem de tüketicilerin sağduyulu, gerçekçi tercihler yapması gerekmektedir. Bu nedenle sürdürülebilirlik, çeviklik ve teknoloji kavramlarını kapsayan alternatif stratejilerin oluşturulmasına yönelik çalışmalar gerçekleştirilmelidir.

Bu araştırmanın sonucunda İDA üretiminde faaliyet gösteren işletmelerin hem sürdürülebilir hem çevik olması için hangi stratejileri izlemesi gerektiği, bu stratejilere ulaşmada hangi yetenek ve göstergelere sahip olmasının önemli olduğu konusunda bir ipucu sunulması amaçlanmıştır. Ek olarak gelecekteki çalışmalarda bu araştırma için oluşturulan soru formunun farklı sektörlere uyarlanması; böylece sektör bazında farklılık gösteren çeviklik stratejilerinin saptanması, sektör özelliğine göre elde edilmesi gereken çeviklik yetenekleri ve göstergelerinin belirlenmesi hedeflenmektedir.

Son olarak, sürdürülebilirlik kavramının ne denli köklü, çok boyutlu ve kapsamlı bir yapıya sahip olduğu konusunda bu çalışmanın önemli noktalara temas ettiği düşünülmektedir. Buradan hareketle, literatürde çoğunlukla yalnızca bir nitelik ya da tamamlayıcı unsur olarak ele alınan sürdürülebilirliğin, aslında çeviklikten Endüstri 4.0’a uzanan tüm kavramların üstünde yer alan bir çatı yaklaşımı olup olmadığı yönünde değerlendirmeler yapılabilir. Böyle bir bakış açısı, sürdürülebilirliğin yalnızca ekonomik, çevresel ve sosyal boyutlarıyla sınırlı kalmadığını göstermektedir. Aynı zamanda üretim sistemlerinin tasarım ilkelerinden stratejik yönetim anlayışına, tedarik zincirinden dijital dönüşüme, örgüt kültürünün şekillenmesinden coğrafi koşulların üretim süreçleri üzerindeki etkilerine kadar geniş bir alanı kapsayan bütüncül bir paradigma olarak düşünülmesini de mümkün kılmaktadır. Bu nedenle sürdürülebilirliğin konumlandırılması, gelecek araştırmaların yönünü ve odak noktalarını belirleyecek kritik bir tartışma alanı haline gelmektedir.

İnsanlık, olağanüstü hızlı ve köklü bir dönüşüm süreci yaşamaktadır. Covid-19 pandemisi; yıllardır Filistin, İsrail, İran, ABD, Rusya ve Ukrayna gibi ülkeler arasında süregelen savaşlar, iklim değişiklikleri ve ekonomik krizler mevcut kalkınma modellerinin etkinliğine dair acil bir sorgulamayı ve radikal bir yeniden değerlendirmeyi gerekli kılmaktadır.

Uzun yıllar boyunca Endüstri 4.0 paradigması, daha yüksek verimlilik ve üretkenlik hedeflerine sürdürülebilir süreçlerle ulaşmanın ve işletmelerin çevikleşerek küresel pazardaki rekabet avantajını güçlendirmesinin temel dayanaklarından biri olarak görülmüştür. Ancak hem bu çalışmanın hem de literatürün geldiği nokta göz önünde bulundurulduğunda Endüstri 4.0 uygulamalarının insan ve çevre odaklı bir girişim olamadığı söylenebilir. Bunun nedeni Endüstri 4.0'ın sadece teknoloji odaklı olması değil; öyleymiş gibi uygulamaya geçirilmeye çalışılması olabilir. İçinde bulunduğumuz bu devrimsel süreçte birçok işletme tarafından sadece teknolojik yetkinlikler sağlandı ve süreç optimizasyonlarında insani ve çevresel maliyetler göz ardı edildi. Bu durumun getirdiği iş kaybı, iş gücü piyasasının dönüşümü, dijital uçurum, dijital dışlanma ve çevresel zararlar gibi olumsuzluklar akademisyenler ve uygulayıcılar arasındaki tartışmaları körükledi. Halbuki sorun, kavramın algılanışının ve dolayısıyla uygulandığının boyutsuz olarak gerçekleştirilmesinden kaynaklanıyor olabilir. Bu nedenle yeni kavramlar ya da paradigmlar oluşturmak yerine işletmelerin hem kendilerini hem de çevrelerini en iyi şekilde analiz ederek mevcut yöntemleri kendilerine uyarlaması bir çözüm olabilir. Bu uyarlama tek bir kavram üzerinden değil; bütünlük ve her yönden objektif değerlendirmelerle yapılandırılmalıdır. İnsanlığın karşı karşıya olduğu acil sorunlarla başa çıkabilmek için dönüşümün ya da uyanışın hızlandırılması gerektiği konusunda bir uzlaşma olduğu söylenebilir. Ancak buna karşın, teknoloji merkezli ve insan merkezli yeniliklerin nasıl birleştirilebileceği ve bunun sürdürülebilir sosyoekonomik yeşil büyümeyi nasıl destekleyeceği konusunda hâlâ birçok soru işareti bulunmaktadır. En önemlisi, bu çabanın topyekün bir mücadeleye dönüşmemesi; hala bireylerde ya da tekil kurum ve kuruluşlarda hayat bulmaya çalışmasıdır. Bu çalışmayla, tıpkı bahsi geçen kavramların bütünleştirildiği gibi toplumların, ülkelerin ve endüstrilerin bütünlük olarak daha fazla zaman kaybetmeden harekete geçmesi adına geleceğe yönelik bir tohum atıldığı umulmaktadır.

KAYNAKÇA

- 3M Company. (2020). 3M's response to the coronavirus (COVID-19) pandemic. Erişim Tarihi: 05.05.2025 https://www.3m.com/3M/en_US/company-us/coronavirus/us-policy-creation-supply-chain/
- ABB. *Dual-arm YuMi® - IRB 14000*. Erişim Tarihi: 06.07.2025 <https://new-abb-com.translate.goog/products/robotics/robots/collaborative-robots/yumi/dual-arm? x tr sl=en& x tr tl=tr& x tr hl=tr& x tr pto=tc>
- Abdirad, M., ve Krishnan, K. (2021). Industry 4.0 in logistics and supply chain management: a systematic literature review. *Engineering Management Journal*, 33(3), 187-201.
- Abideen, A. Z., Sundram, V. P. K., Pyeman, J., Othman, A. K., ve Sorooshian, S. (2021). Digital twin integrated reinforced learning in supply chain and logistics. *Logistics*, 5(4), 84.
- Adler, M., ve Ziglio, E. (1996). Gazing into the oracle: The Delphi method and its application to social policy and public health. Jessica Kingsley Publishers.
- Agarwal, V., Hameed, A. Z., Malhotra, S., Mathiyazhagan, K., Alathur, S., ve Appolloni, A. (2023). Role of Industry 4.0 in agile manufacturing to achieve sustainable development. *Business Strategy and the Environment*, 32(6), 3671-3688.
- Agarwal, V., Malhotra, S., ve Singh, T. (2021). "Assessing challenges in the implementation of sustainable human resource management using the fuzzy DEMATEL approach". *Multi-criteria Decision Modelling*. CRC Press. 107-120.
- Ageron, B., Bentahar, O., ve Gunasekaran, A. (2020, July). Digital supply chain: challenges and future directions. In *Supply Chain Forum: An International Journal* (Vol. 21, No. 3, pp. 133-138). Taylor ve Francis. doi: 10.1080/16258312.2020.1816361
- Ajaegbu, B. C. (2022). Digital transformation and supply chain efficiency: A case of Amazon Inc. *International Journal of Research and Innovation in Social Science (IJRISS)*, 6(5), 364-371.
- Akins, R. B., Tolson, H., ve Cole, B. R. (2005). Stability of response characteristics of a Delphi panel: application of bootstrap data expansion. *BMC Medical Research Methodology*, 5, 1-12.
- Akter, S., Wamba, S. F., Gunasekaran, A., Dubey, R., ve Childe, S. J. (2016). How to improve firm performance using big data analytics capability and business strategy alignment?. *International Journal of Production Economics*, 182, 113-131. doi: 10.1016/j.ijpe.2016.08.018
- Al Mohamed, A. A., Al Mohamed, S., ve Zino, M. (2023). Application of fuzzy multicriteria decision-making model in selecting pandemic hospital site. *Future Business Journal*, 9(1), 14.
- Alam, T. (2018). A Reliable Communication Framework and Its Use in Internet of Things (IoT). *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*. Vol 3(5)
- Aljamal, M. S., Ashcroft, D., ve Tully, M. P. (2016). Development of indicators to assess the quality of medicines reconciliation at hospital admission: an e-Delphi study. *International Journal of Pharmacy Practice*, 24(3), 209-216.
- Allam, Z., ve Jones, D. S. (2021). Future (post-COVID) digital, smart and sustainable cities in the wake of 6G: Digital twins, immersive realities and new urban economies. *Land Use Policy*, 101, 105201.
- Almada-Lobo, F. (2015). The Industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems (MES). *Journal of Innovation Management*, 3(4), 16-21.

- Alter, C. (2020, March 24). 'It's mass confusion.' *Small manufacturers look for leadership as they make medical supplies to fight coronavirus*. Time. <https://time.com/5808500/small-manufacturers-coronavirus/> (Erişim Tarihi: 05.05.2025)
- Ananthram, S., ve Nankervis, A. (2013). Strategic agility and the role of HR as a strategic business partner: An Indian perspective. *Asia Pacific Journal of Human Resources*, 51(4), 454–470.
- Aravind Raj, S., Sudheer, A., Vinodh, S., ve Anand, G. (2013). A mathematical model to evaluate the role of agility enablers and criteria in a manufacturing environment. *International journal of production research*, 51(19), 5971-5984. doi: 10.1080/00207543.2013.825381
- Arena, F., Collotta, M., Pau, G., ve Termine, F. (2022). An overview of augmented reality. *Computers*, 11(2), 28.
- ASELSAN. (2023). *İnsansız Deniz Araçları*. (Erişim tarihi: 02.03.2025) <https://www.aselsan.com/tr/blog/detay/387/insansiz-deniz-aracлари>
- Asghar, J., Kanbach, D. K., ve Kraus, S. (2025). Toward a multidimensional concept of organizational agility: a systematic literature review. *Management Review Quarterly*, 1-27.
- Baştuğ, S., Akgül, E. F., Haralambides, H., ve Notteboom, T. (2024). A decision-making framework for the funding of shipping decarbonization initiatives in non-EU countries: insights from Türkiye. *Journal of Shipping and Trade*, 9(1), 12.
- Baştuğ, S., Arabelen, G., Vural, C. A., ve Deveci, D. A. (2020). A value chain analysis of a seaport from the perspective of Industry 4.0. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, 12(4), 367-397.
- Bechtsis, D., Tsolakis, N., Vlachos, D., ve Srai, J. S. (2018). Intelligent Autonomous Vehicles in digital supply chains: A framework for integrating innovations towards sustainable value networks. *Journal of Cleaner Production*, 181, 60-71.
- Behzadian, M., Otaghsara, S. K., Yazdani, M., ve Ignatius, J. (2012). A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with applications*, 39(17), 13051-13069.
- Beier, G., Ullrich, A., Niehoff, S., Reißig, M., ve Habich, M. (2020). Industry 4.0: How it is defined from a sociotechnical perspective and how much sustainability it includes—A literature review. *Journal Of Cleaner Production*, 259, 120856.
- Belhadi, A., Kamble, S., Jabbour, C. J. C., Gunasekaran, A., Ndubisi, N. O., ve Venkatesh, M. (2021). Manufacturing and service supply chain resilience to the COVID-19 outbreak: Lessons learned from the automobile and airline industries. *Technological forecasting and social change*, 163, 120447. doi: 10.1016/j.techfore.2020.120447
- Bendoly, E., Chandrasekaran, A., Lima, M. D. R. F., Handfield, R., Khajavi, S. H., ve Roscoe, S. (2023). The role of generative design and additive manufacturing capabilities in developing human–AI symbiosis: Evidence from multiple case studies. *Decision Sciences*. doi: 10.1111/dec.12619
- Ben-Zion, R., Pliskin, N., ve Fink, L. (2014). Critical success factors for adoption of electronic health record systems: literature review and prescriptive analysis. *Information Systems Management*, 31(4), 296-312.
- BM Türkiye. (2024). *Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları Türkiye: Göstergeler ve ilerlemeler*. <https://turkiye.un.org/tr/sdgs>
- BM Türkiye. (t.y.). *Türkiye Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları çalışmalarımız*. Erişim Tarihi: 19 Nisan 2025, <https://turkiye.un.org/tr/sdgs>
- BM. (2000). *Birleşmiş Milletler Binyıl Bildirgesi (A/RES/55/2)*. Erişim Tarihi: 18 Nisan 2025, <https://digitallibrary.un.org/record/422015>
- BM. (t.y.). *İnsan Çevresi Üzerine Birleşmiş Milletler Konferansı, Stockholm 1972. Birleşmiş Milletler*. Erişim tarihi: 17 Nisan 2025, <https://www.un.org/en/conferences/environment/stockholm1972>

- Blome, C., Schoenherr, T., ve Eckstein, D. (2014). The impact of knowledge transfer and complexity on supply chain flexibility: A knowledge-based view. *International Journal of Production Economics*, 147, 307-316.
- Bown, C. P. (2022). How COVID-19 medical supply shortages led to extraordinary trade and industrial policy. *Asian Economic Policy Review*, 17(1), 114-135.
- Braunscheidel, M. J., ve Suresh, N. C. (2009). The organizational antecedents of a firm's supply chain agility for risk mitigation and response. *Journal of operations Management*, 27(2), 119-140. doi: 10.1016/j.jom.2008.09.006
- Brown, J. L., ve Agnew, N. M. (1982). Corporate agility. *Business Horizons*, 25(2), 29-33. doi: 10.1016/0007-6813(82)90101-X
- Burgess, T. F. (1994). Making the Leap to Agility: Defining and Achieving Agile Manufacturing through Business Process Redesign and Business Network Redesign. *International Journal of Operations & Production Management*, 14(11), 23-34.
- Calabrese, A., Levialdi Ghiron, N., ve Tiburzi, L. (2021). 'Evolutions' and 'revolutions' in manufacturers' implementation of industry 4.0: a literature review, a multiple case study, and a conceptual framework. *Production Planning & Control*, 32(3), 213-227.
- Campbell, S. M., Cantrill, J. A., ve Roberts, D. (2000). Prescribing indicators for UK general practice: Delphi consultation study. *BMJ*, 321(7258), 425.
- Cantrill, J. A., Sibbald, B., ve Buetow, S. (1998). Indicators of the appropriateness of long-term prescribing in general practice in the United Kingdom: consensus development, face and content validity, feasibility, and reliability. *BMJ Quality & Safety*, 7(3), 130-135.
- Carayannis, E. G., Canestrino, R., ve Magliocca, P. (2023). From the dark side of industry 4.0 to society 5.0: looking "beyond the box" to developing human-centric innovation ecosystems. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 71, 6695-6711.
- Carmigniani, J., Furht, B., Anisetti, M., Ceravolo, P., Damiani, E., ve Ivkovic, M. (2011). Augmented reality technologies, systems and applications. *Multimedia Tools and Applications*, 51, 341-377.
- Carvalho, H., Duarte, S., ve Machado, V. C. (2011). Lean, agile, resilient and green: divergencies and synergies. *International Journal of Lean Six Sigma*, 2(2), 151-179.
- Cassar Flores, A., Marshall, S., ve Cordina, M. (2014). Use of the Delphi technique to determine safety features to be included in a neonatal and paediatric prescription chart. *International Journal of Clinical Pharmacy*, 36, 1179-1189.
- Castro, G. D. R., Fernandez, M. C. G., ve Colsa, A. U. (2021). Unleashing the convergence amid digitalization and sustainability towards pursuing the Sustainable Development Goals (SDGs): A holistic review. *Journal of Cleaner Production*, 280, 122204.
- Cegarra-Navarro, J. G., Papa, A., Garcia-Perez, A., ve Fiano, F. (2019). An open-minded strategy towards eco-innovation: A key to sustainable growth in a global enterprise. *Technological Forecasting and Social Change*, 148, 119727.
- Centobelli, P., Cerchione, R., Maglietta, A., ve Oropallo, E. (2023). Sailing through a digital and resilient shipbuilding supply chain: An empirical investigation. *Journal of Business Research*, 158, 113686.
- Chan, A., Tan, S. H., Wong, C. M., Yap, K. Y. L., ve Ko, Y. (2009). Clinically significant drug—drug interactions between oral anticancer agents and nonanticancer agents: a delphi survey of oncology pharmacists. *Clinical Therapeutics*, 31, 2379-2386.
- Chang, C. H., Kontovas, C., Yu, Q., ve Yang, Z. (2021). Risk assessment of the operations of maritime autonomous surface ships. *Reliability Engineering & System Safety*, 207, 107324.
- Chatterjee, S., ve Chakraborty, S. (2024). A study on the effects of objective weighting methods on TOPSIS-based parametric optimization of non-traditional machining processes. *Decision Analytics Journal*, 11, 100451.

- Chatzigiannakis, I., ve Tselios, C. (2021). Internet of everything. In *Intelligent Computing for Interactive System Design: Statistics, Digital Signal Processing, and Machine Learning in Practice* (pp. 21-56).
- Chaurasia, S. S., Kaul, N., Yadav, B., ve Shukla, D. (2020). Open innovation for sustainability through creating shared value—role of knowledge management system, openness and organizational structure. *Journal of Knowledge Management*, 24(10), 2491–2511.
- Chen, C. T. (2000). Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems*, 114(1), 1–9. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(98\)00377-1](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(98)00377-1)
- Chen, C. T., Lin, C. T., ve Huang, S. F. (2006). A fuzzy approach for supplier evaluation and selection in supply chain management. *International Journal of Production Economics*, 102(2), 289-301.
- Chen, Q., Lau, Y. Y., Zhang, P., Dulebenets, M. A., Wang, N., ve Wang, T. N. (2023). From concept to practicality: Unmanned vessel research in China. *Heliyon*, 9(4).
- Chervenkova, T., ve Ivanov, D. (2023). Adaptation strategies for building supply chain viability: A case study analysis of the global automotive industry re-purposing during the COVID-19 pandemic. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 177, 103249. doi: 10.1016/j.tre.2023.103249
- Christian, C. (2024). IoT 2023 in review: The 10 most relevant IoT developments of the year. *IoT Analytics*. Erişim Adresi: <https://iot-analytics.com/iot-2023-in-review/> Erişim Tarihi: 07.07.2025
- Christopher, M. (2000). The agile supply chain: competing in volatile markets. *Industrial marketing management*, 29(1), 37-44. doi: 10.1016/S0019-8501(99)00110-8
- Christopher, M., ve Towill, D. (2001). An integrated model for the design of agile supply chains. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 31(4), 235–246.
- Christopher, M., ve Towill, D. R. (2000). Supply chain migration from lean and functional to agile and customised. *Supply Chain Management: an international journal*, 5(4), 206-213.
- Chu, H. C., ve Hwang, G. J. (2008). A Delphi-based approach to developing expert systems with the cooperation of multiple experts. *Expert systems with applications*, 34(4), 2826-2840.
- Cinelli, M., Coles, S. R., ve Kirwan, K. (2014). Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. *Ecological Indicators*, 46, 138-148.
- Climate Impact Partners. (2024). *Fortune Global 500 climate commitments: How are the world's biggest companies responding to the climate crisis?* <https://www.climateimpact.com/news-insights/fortune-global-500-climate-commitments/> Erişim tarihi: 20 Nisan 2025
- Conboy, K., ve Fitzgerald, B. (2004). Toward a conceptual framework of agile methods: A study of agility in different disciplines. In *Proceedings of the 2004 ACM workshop on Interdisciplinary software engineering research* (pp. 37–44).
- Copernicus Climate Change Service. (2025). *Copernicus: 2024 is the first year with all days over 1.5°C warmer than pre-industrial levels*. European Union. (Erişim Tarihi: 25.03.2025) <https://climate.copernicus.eu/copernicus-2024-first-year-exceed-15degc-above-pre-industrial-level>
- Cordon, C., ve Bris, A. (2019). Is blockchain all hype? A financier and supply chain expert discuss. *International Institute for Management Development*. Erişim Tarihi: 06.07.2025. <https://imd.widen.net/view/pdf/3ydph3g6v9/tc0017-19-print.pdf>
- Crick, C., ve Chew, E. K. (2017). Business processes in the agile organisation: a socio-technical perspective. *Software & Systems Modeling*, 16(3), 631-648.

- Çelikkilek, Y., ve Tüysüz, F. (2020). An in-depth review of theory of the TOPSIS method: An experimental analysis. *Journal of Management Analytics*, 7(2), 281-300.
- Çorum, H. (2025). Uluslararası Deniz Güvenliği Hukuku Bağlamında İnsansız Deniz Araçları Aracılığıyla İşlenen Suçlar. *Yıldırım Beyazıt Hukuk Dergisi*(1), 3-46. <https://doi.org/10.33432/ybuhukuk.1570414>
- Dagher, G. K., Chapa, O., ve Junaid, N. (2015). The historical evolution of employee engagement and self-efficacy constructs: An empirical examination in a non-western country. *Journal of Management History*, 21(2), 232-256.
- Dalkey, N., ve Helmer, O. (1963). An experimental application of the Delphi method to the use of experts. *Management Science*, 9(3), 458-467.
- Dangelico, R. M., ve Pujari, D. (2010). Mainstreaming green product innovation: Why and how companies integrate environmental sustainability. *Journal of Business Ethics*, 95, 471-486.
- Dapari, R., Ismail, H., Ismail, R., ve Ismail, N. H. (2017). Application of fuzzy Delphi in the selection of COPD risk factors among steel industry workers. , 16(1), 46.
- de Oliveira-Dias, D., Maqueira-Marin, J. M., Moyano-Fuentes, J., ve Carvalho, H. (2023). Implications of using Industry 4.0 base technologies for lean and agile supply chains and performance. *International Journal of Production Economics*, 262, 108916. doi: 10.1016/j.ijpe.2023.108916
- Dean, B., Barber, N., ve Schachter, M. (2000). What is a prescribing error?. *BMJ Quality & Safety*, 9(4), 232-237.
- Delbecq, A. L., Van de Ven, A. H., ve Gustafson, D. H. (1975). *Group techniques for program planning: A guide to nominal group and Delphi processes*. Scott, Foresman and Company.
- Del Giudice, M., Khan, Z., De Silva, M., Scuotto, V., Caputo, F., ve Carayannis, E. (2017). The microlevel actions undertaken by owner-managers in improving the sustainability practices of cultural and creative small and medium enterprises: A United Kingdom–Italy comparison. *Journal of Organizational Behavior*, 38(9), 1396–1414.
- Delmas, M. A., ve Burbano, V. C. (2011). The drivers of greenwashing. *California management review*, 54(1), 64-87.
- Dennehy, D., Oredo, J., Spanaki, K., Despoudi, S., ve Fitzgibbon, M. (2021). Supply chain resilience in mindful humanitarian aid organizations: The role of big data analytics. *International Journal of Operations & Production Management*, 41(9), 1417–1441.
- Denning, S. (t.y.). *It's time to re-imagine management*. World Agility Forum. Erişim tarihi 9 Haziran 2023, <https://www.worldagilityforum.org/>
- Deutschland.de. (2014). *Industry 4.0 at Hannover Messe*. <https://www.deutschland.de/en/topic/business/globalization-world-trade/industry-40-at-hannover-messe> Erişim Tarihi: 13.06.2025
- Di Vaio, A., Palladino, R., Hassan, R., ve Escobar, O. (2020). Artificial intelligence and business models in the sustainable development goals perspective: A systematic literature review. *Journal of Business Research*, 121, 283-314.
- Di Vaio, A., Palladino, R., Pezzi, A., ve Kalisz, D. E. (2021). The role of digital innovation in knowledge management systems: A systematic literature review. *Journal of Business Research*, 123, 220–231.
- Dombrowski, U., ve Mielke, T. (2014). Lean leadership–15 rules for a sustainable lean implementation. *Procedia Cirp*, 17, 565-570.
- Douglas, A., Mazzuchi, T., ve Sarkani, S. (2020). A stakeholder framework for evaluating the-ilities of autonomous behaviors in complex adaptive systems. *Systems Engineering*, 23(5), 633-655.

- Doz, Y. L., ve Kosonen, M. (2010). Embedding strategic agility: A leadership agenda for accelerating business model renewal. *Long Range Planning*, 43(2-3), 370–382.
- Dubey, R., Bryde, D. J., Foropon, C., Tiwari, M., Dwivedi, Y., ve Schiffeling, S. (2021). An investigation of information alignment and collaboration as complements to supply chain agility in humanitarian supply chain. *International Journal of Production Research*, 59(5), 1586–1605.
- Dubey, R., Gunasekaran, A., Bryde, D. J., Dwivedi, Y. K., ve Papadopoulos, T. (2020). Blockchain technology for enhancing swift-trust, collaboration and resilience within a humanitarian supply chain setting. *International Journal of Production Research*, 58(11), 3381–3398.
- Dutta, G., Kumar, R., Sindhwani, R., ve Singh, R. K. (2021). Digitalization priorities of quality control processes for SMEs: A conceptual study in perspective of Industry 4.0 adoption. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32(6), 1679-1698.
- Ecer, F. (2006). Bulanik Ortamlarda Grup Kararı Vermeye Yardımcı Bir Yöntem: Fuzzy Topsis ve Bir Uygulama. *Dokuz Eylül Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi*, 7(2), 77-96.
- Ekşi, G. (2019). *Temiz üretim uygulamaları: Antalya organize sanayi bölgesinde ISO 14001 çevre yönetim sistemi uygulayan firmalar üzerine bir araştırma* (Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü).
- Elkington, J., ve Rowlands, I. H. (1999). Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business. *Alternatives Journal*, 25(4), 42.
- Ellingsen, O., ve Aasland, K. E. (2019). Digitalizing the maritime industry: A case study of technology acquisition and enabling advanced manufacturing technology. *Journal of Engineering and Technology Management*, 54, 12-27.
- ElMassah, S., ve Mohieldin, M. (2020). Digital transformation and localizing the sustainable development goals (SDGs). *Ecological Economics*, 169, 106490.
- Erol, S., Jäger, A., Hold, P., Ott, K., ve Sihm, W. (2016). Tangible Industry 4.0: a scenario-based approach to learning for the future of production. *Procedia CiRp*, 54, 13-18.
- Eşkinat, R. (2016). Binyıl kalkınma hedeflerinden sürdürülebilir kalkınma hedeflerine. *Anadolu Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi*, 2(3), 267-282.
- Fahed-Sreih, J., ve El-Kassar, A. N. (2017). Strategic planning, performance and innovative capabilities of non-family members in family businesses. *International Journal of Innovation Management*, 21(7), 1750052. <https://doi.org/10.1142/S1363919617500529>
- Fahimnia, B., Jabbarzadeh, A., ve Sarkis, J. (2018). Greening versus resilience: A supply chain design perspective. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 119, 129-148. doi: 10.1016/j.tre.2018.09.005
- Fan, C., Montewka, J., ve Zhang, D. (2022). A risk comparison framework for autonomous ships navigation. *Reliability Engineering & System Safety*, 226, 108709.
- Fatorachian, H., ve Kazemi, H. (2021). Impact of Industry 4.0 on supply chain performance. *Production Planning & Control*, 32(1), 63-81. doi: 10.1080/09537287.2020.1712487
- Feldman, M. S., ve Pentland, B. T. (2003). Reconceptualizing organizational routines as a source of flexibility and change. *Administrative Science Quarterly*, 48(1), 94-118.
- Ferreira, J. J., Fernandes, C. I., ve Ferreira, F. A. (2019). To be or not to be digital, that is the question: Firm innovation and performance. *Journal of Business Research*, 101, 583-590.
- Fırat, G. (2024). İDA'lar oyun değiştirici mi oyun uzatıcı mı?. *Deniz: Deniz Kuvvetleri Dergisi*, 655. ISSN 1300-2015. 8-11. Erişim adresi (15.12.2024): https://www.dzkk.tsk.tr/Content/Upload/Docs/Temmuz_2024_internet.pdf
- Fisher, M. (1997). What is the right supply chain for your product? *Harvard Business Review*, 75, 105-117.
- Flyvbjerg, B. (2006). Five misunderstandings about case-study research. *Qualitative inquiry*, 12(2), 219-245.

- Fritzsche, K., Niehoff, S., ve Beier, G. (2018). Industry 4.0 and climate change—Exploring the science-policy gap. *Sustainability*, 10(12), 4511.
- Gabriel, M., ve 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.
- Garrido, S., Muniz Jr, J., ve Ribeiro, V. B. (2024). Operations Management, Sustainability & Industry 5.0: A Critical Analysis and Future Agenda. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 100141. doi: 10.1016/j.clscn.2024.100141
- Gebler, M., Schoot Uiterkamp, A. J. M., ve Visser, C. (2014). A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy Policy*, 74, 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.08.033>
- George, G., Merrill, R. K., ve Schillebeeckx, S. J. (2021). Digital sustainability and entrepreneurship: How digital innovations are helping tackle climate change and sustainable development. *Entrepreneurship Theory and Practice*, 45(5), 999–1027.
- Geyi, D. A. G., Yusuf, Y., Menhat, M. S., Abubakar, T., ve Ogbuke, N. J. (2020). Agile capabilities as necessary conditions for maximising sustainable supply chain performance: An empirical investigation. *International Journal of Production Economics*, 222, 107501.
- Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Foroughi, B., Tseng, M. L., Nikbin, D., ve Khanfar, A. A. (2025). Industry 4.0 digital transformation and opportunities for supply chain resilience: a comprehensive review and a strategic roadmap. *Production Planning & Control*, 1-31. doi: 10.1080/09537287.2023.2252376
- Ghodrati, H., ve Zargarzadeh, Z. (2013). A study on the relationship between employee mental health and agility strategic readiness: A case study of Esfahan hospitals in Iran. *Management Science Letters*, 3(4), 1095–1104.
- Gligor, D., Bozkurt, S., Gölgeci, I., ve Maloni, M. J. (2020). Does supply chain agility create customer value and satisfaction for loyal B2B business and B2C end-customers?. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 50(7/8), 721-743.
- Gligor, D. M. (2014). The role of demand management in achieving supply chain agility. *Supply Chain Management: An International Journal*, 19(5/6), 577-591. <https://doi.org/10.1108/SCM-10-2013-0363>
- Global Times (2023), *China Builds World's First Autonomous Seaborne Drone-Carrier*, available at: <https://www.globaltimes.cn/page/202301/1283744.shtml> (Erişim Tarihi: 28 Ocak 2023).
- Goldman, S. L., Nagel, R. N., ve Preiss, K. (1995). *Agile competitors and virtual organizations: Strategies for enriching the customer*. Van Nostrand Reinhold.
- Gorecky, D., Schmitt, M., Loskyll, M., ve Zühlke, D. (2014). Human-machine-interaction in the industry 4.0 era. In *2014 12th IEEE international conference on industrial informatics (INDIN)*. (pp. 289-294).
- Grober, U. (2007). *Deep roots— A Conceptual History Of “sustainable development”(Nachhaltigkeit)*, Wissenschaftszentrum Berlin Fur Sozialforschung, 8-9.
- Gu, Y., Goetz, J. C., Guajardo, M., ve Wallace, S. W. (2021). Autonomous vessels: state of the art and potential opportunities in logistics. *International Transactions in Operational Research*, 28(4), 1706-1739.
- Guandalini, I. (2022). Sustainability through digital transformation: A systematic literature review for research guidance. *Journal of Business Research*, 148, 456-471.
- Gunasekaran, A., ve Yusuf, Y. Y. (2002). Agile manufacturing: a taxonomy of strategic and technological imperatives. *International Journal of Production Research*, 40(6), 1357-1385.

- Gunasekaran, A., Yusuf, Y. Y., Adeleye, E. O., Papadopoulos, T., Kovvuri, D., ve Geyi, D. A. G. (2019). Agile manufacturing: An evolutionary review of practices. *International Journal of Production Research*, 57(15–16), 5154–5174.
- Gupta, A., Singh, R. K., ve Gupta, S. (2022). Developing human resource for the digitization of logistics operations: readiness index framework. *International Journal of Manpower*, 43(2), 355–379.
- Gündoğan, A. C., Aydın, C. İ., Turhan, E., ve Berke, M. Ö. (2023). *100 maddede sürdürülebilirlik rehberi*, B. Doğru (Ed.). İş Dünyası ve Sürdürülebilir Kalkınma Derneği (SKD Türkiye). Uniprint Basım.
- Hald, K. S., ve Kinra, A. (2019). How the blockchain enables and constrains supply chain performance. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 49(4), 376–397.
- Hallgren, M., ve Olhager, J. (2009). Lean and agile manufacturing: external and internal drivers and performance outcomes. *International Journal of Operations ve Production Management*.
- Hariyani, D. and Mishra, S. (2023), "A descriptive statistical analysis of enablers for integrated sustainable-green-lean-six sigma-agile manufacturing system (ISGLSAMS) in Indian manufacturing industries", *Benchmarking: An International Journal*, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. doi: 10.1108/BIJ-06-2022-0344
- Hasson, F., Keeney, S., ve McKenna, H. (2000). Research guidelines for the Delphi survey technique. *Journal of advanced nursing*, 32(4), 1008–1015.
- He, B., Cao, X., ve Hua, Y. (2021). Data fusion-based sustainable digital twin system of intelligent detection robotics. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124181.
- He, N., Zhang, D. Z., ve Yuce, B. (2022). Integrated multi-project planning and scheduling-a multiagent approach. *European Journal of Operational Research*, 302(2), 688–699.
- Heng, S. (2014). *Industry 4.0 Upgrading of Germany's industrial capabilities on the horizon*. Deutsche Bank Research. Current Issues. Sector Research. Erişim Tarihi: 21.06.2025 https://www.dbresearch.com/PROD/RPS_EN-PROD/PROD0000000000451959/Industry_4_0%3A_Upgrading_of_Germany%E2%80%99s_industrial_ca.pdf
- Heng, S. (2004). Verkehr und Informationstechnologien-Stau ade?. *WiSt-Wirtschaftswissenschaftliches Studium*, 33(6), 373–376.
- Hermann, M., Pentek, T., ve Otto, B. (2016). *Design principles for Industrie 4.0 scenarios: A literature review*. Technische Universität Dortmund, Working Paper No. 1, 1–16.
- Hickel, J., ve Kallis, G. (2020). Is green growth possible?. *New Political Economy*, 25(4), 469–486.
- Hinssen, P. (2024). *How digital technology can help the U.N. achieve its 2030 agenda*. TIME. Erişim Tarihi: 19 Nisan 2025. <https://time.com/7024240/digital-technology-sustainable-development/>
- Hofmann, E., ve Rüsç, M. (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in Industry*, 89, 23–34.
- Hsu, C. C., ve Sandford, B. A. (2007). The Delphi technique: making sense of consensus. *Practical Assessment, Research, And Evaluation*, 12(1).
- Hsu, Y. L., Lee, C. H., ve Kreng, V. B. (2010). The application of Fuzzy Delphi Method and Fuzzy AHP in lubricant regenerative technology selection. *Expert Systems with Applications*, 37(1), 419–425. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.05.068>
- Hu, F., Lu, Y., Vasilakos, A. V., Hao, Q., Ma, R., Patil, Y., ... ve Xiong, N. N. (2016). Robust cyber-physical systems: Concept, models, and implementation. *Future Generation Computer Systems*, 56, 449–475.
- Huang, Y., Chen, L., Chen, P., Negenborn, R. R., ve Van Gelder, P. H. A. J. M. (2020). Ship collision avoidance methods: State-of-the-art. *Safety science*, 121, 451–473.

- Hwang, C. L., ve Yoon, K. (1981). Methods for multiple attribute decision making. *Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey*, 58-191.
- IBM. (2017). IBM brings cognitive manufacturing to the factory floor. *IBM Newsroom*. <https://uk.newsroom.ibm.com/2017-04-25-IBM-Brings-Cognitive-Manufacturing-to-the-Factory-Floor> Erişim Tarihi: 08.07.2025
- Ilmudeen, A. (2021). Information technology (IT) governance and IT capability to realize firm performance: Enabling role of agility and innovative capability. *Benchmarking: An International Journal*, 29(4), 1137–1161.
- IMO (International Maritime Organization). *Autonomous shipping*. Erişim Tarihi: 01.03.2025 <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Autonomous-shipping.aspx>
- Ishikawa, A., Amagasa, M., Shiga, M., Tomizawa, G., Tatsuta, R., ve Mieno, H. (1993). The max–min Delphi method and fuzzy Delphi method via fuzzy integration. *Fuzzy Sets and Systems*, 55(3), 241–253. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(93\)90251-C](https://doi.org/10.1016/0165-0114(93)90251-C)
- Ismail, H. N., Iqbal, A., ve Nasr, L. (2019). Employee engagement and job performance in Lebanon: The mediating role of creativity. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 68, 506–523.
- Ismail, K., Ishak, R., ve Kamaruddin, S. H. (2021). Development of professional learning communities model using fuzzy delphi approach. *TEM Journal*, 10(2), 872.
- Işık, Y. E. (2025). İnsansız Deniz Aracı (İDA) Grup Komutanlığı dönemi!. *DefenceTurk.Net*. Erişim adresi: <https://www.defenceturk.net/insansiz-deniz-araci-ida-grup-komutanligi-donemi> Erişim tarihi 14 mayıs 2025.
- Ivanov, D. (2022). Viable supply chain model: integrating agility, resilience and sustainability perspectives—lessons from and thinking beyond the COVID-19 pandemic. *Annals of Operations Research*, 319(1), 1411-1431.
- Ivanov, D. (2023). Collaborative emergency adaptation for ripple effect mitigation in intertwined supply networks. *Annals of Operations Research*, 1-17.
- Ivanov, D., Dolgui, A., ve Sokolov, B. (2019). The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics. *International journal of production research*, 57(3), 829-846.
- Ivanov, D., ve Das, A. (2020). Coronavirus (COVID-19/SARS-CoV-2) and supply chain resilience: A research note. *International Journal of Integrated Supply Management*, 13(1), 90-102.
- Jahanshahloo, G. R., Lotfi, F. H., ve Izadikhah, M. (2006). Extension of the TOPSIS method for decision-making problems with fuzzy data. *Applied Mathematics and Computation*, 181(2), 1544-1551.
- Jan, Z., Ahamed, F., Mayer, W., Patel, N., Grossmann, G., Stumptner, M., ve Kuusk, A. (2023). Artificial intelligence for industry 4.0: Systematic review of applications, challenges, and opportunities. *Expert Systems with Applications*, 216, 119456.
- Jansen, C. (2017). Stabilizing the industrial system: Managed security services' contribution to cyber-peace. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 5155-5160.
- Jeong, K., Cha, J., ve Kim, Y. (2020). SCRM awareness in the shipbuilding and marine equipment market: Empirical evidence from South Korea, China, and Singapore. *Sustainability*, 12(12), 5115.
- Jessop, S. (2024, April 9). *Big companies' emissions goals are too weak, report says*. Reuters. <https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/big-companies-emissions-goals-are-too-weak-report-says-2024-04-08/>
- Junior, F. R. L., Osiro, L., ve Carpinetti, L. C. R. (2014). A comparison between Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS methods to supplier selection. *Applied Soft Computing*, 21, 194-209.

- Kaewunruen, S., ve Lian, Q. (2019). Digital twin aided sustainability-based lifecycle management for railway turnout systems. *Journal of Cleaner Production*, 228, 1537-1551.
- Kahraman, C., Cebeci, U., ve Ulukan, Z. (2003). Multi-criteria supplier selection using fuzzy AHP. *Logistics Information Management*, 16(6), 382-394.
- Kalaycı Kadak, M., ve Öztürk, S. (2019). Global Climate Change Projections and Turkey. *Uluslararası Peyzaj Mimarlığı Araştırmaları Dergisi (IJLAR)* E-ISSN:2602-4322, 3(2), 162-167.
- Kannan, K., ve Arunachalam, N. (2019). A digital twin for grinding wheel: an information sharing platform for sustainable grinding process. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 141(2), 021015.
- Kaplan, L. M. (1971). *The use of the Delphi method in organizational communication: A case study* (Master's thesis, The Ohio State University).
- Karkoulou, S., Srour, J., ve Messarra, L. C. (2019). The moderating role of 360-degree appraisal between engagement and innovative behaviors. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 69(2), 361-381.
- Kazancoglu, Y., Özkan-Özen, Y. D., Sagnak, M., Kazancoglu, I., ve Dora, M. (2023). Framework for a sustainable supply chain to overcome risks in transition to a circular economy through Industry 4.0. *Production Planning & Control*, 34(10), 902-917.
- Keil, M., Tiwana, A., ve Bush, A. (2002). Reconciling user and project manager perceptions of IT project risk: a Delphi study 1. *Information Systems Journal*, 12(2), 103-119.
- Khan, I. S., Ahmad, M. O., ve Majava, J. (2021). Industry 4.0 and sustainable development: A systematic mapping of triple bottom line, Circular Economy and Sustainable Business Models perspectives. *Journal of cleaner production*, 297, 126655.
- Khin, S., ve Ho, T. C. (2019). Digital technology, digital capability and organizational performance: A mediating role of digital innovation. *International journal of innovation science*, 11(2), 177-195.
- Kleindorfer, P. R., Kunreuther, H., ve Schoemaker, P. J. (1993). *Decision sciences: An integrative perspective*. Cambridge University Press.
- Kohtamäki, M., Parida, V., Oghazi, P., Gebauer, H., ve Baines, T. (2019). Digital servitization business models in ecosystems: A theory of the firm. *Journal of Business Research*, 104, 380-392. doi: 10.1016/j.jbusres.2019.06.027
- Kovancı, E. (2023). International climate change policies of Türkiye in its 100th year. *Akademik Hassasiyetler*, 10(Cumhuriyet Özel Sayısı), 319-345.
- Kumar, A., ve Motwani, J. (1995). A methodology for assessing time-based competitive advantage of manufacturing firms. *International Journal of Operations & Production Management*, 15(2), 36-53.
- Kumar, R., Singh, K., ve Jain, S. K. (2022). Agility enhancement through agile manufacturing implementation: a case study. *The TQM Journal*, 34(6), 1527-1546.
- Kumar, V., Babu, G., ve Muthusamy, S. (2016). Assessing the awareness of the agile manufacturing for organizational change in Indian small manufacturing firms: an empirical investigation. *Journal of Organizational Change Management*, 29(5), 713-731. doi: 10.1108/JOCM-11-2015-0200
- Kuo, Y. F., ve Chen, P. C. (2008). Constructing performance appraisal indicators for mobility of the service industries using Fuzzy Delphi Method. *Expert Systems With Applications*, 35(4), 1930-1939.
- Kusiak, A., ve He, D. W. (1997). Design for agile assembly: an operational perspective. *International Journal of Production Research*, 35(1), 157-178. doi: 10.1080/002075497196037
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., ve Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 6, 239-242.

- Lee, A. H., Wang, W. M., ve Lin, T. Y. (2010). An evaluation framework for technology transfer of new equipment in high technology industry. *Technological Forecasting and Social Change*, 77(1), 135-150.
- Lee, H. L. (2004). The triple-A supply chain. *Harvard Business Review*, 82(10), 102-113.
- Lee, Y. G., Ju, S., ve Woo, J. H. (2020). Simulation-based planning system for shipbuilding. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 33(6), 626-641.
- Lekan, A., Aigbavboa, C., Babatunde, O., Olabosipo, F., ve Christiana, A. (2022). Disruptive technological innovations in construction field and fourth industrial revolution intervention in the achievement of the sustainable development goal 9. *International Journal of Construction Management*, 22(14), 2647-2658.
- Lezzi, M., Lazoi, M., ve Corallo, A. (2018). Cybersecurity for Industry 4.0 in the current literature: A reference framework. *Computers in Industry*, 103, 97-110.
- Li, L. (2018). China's manufacturing locus in 2025: With a comparison of "Made-in-China 2025" and "Industry 4.0". *Technological Forecasting and Social Change*, 135, 66-74.
- Li, L., Qu, T., Liu, Y., Zhong, R. Y., Xu, G., Sun, H., ... ve Ma, C. (2020). Sustainability assessment of intelligent manufacturing supported by digital twin. *IEEE Access*, 8, 174988-175008.
- Li, S., ve Fung, K. S. (2019). Maritime autonomous surface ships (MASS): implementation and legal issues. *Maritime Business Review*, 4(4), 330-339.
- Li, X., Li, D., Wan, J., Vasilakos, A. V., Lai, C. F., ve Wang, S. (2017). A review of industrial wireless networks in the context of industry 4.0. *Wireless Networks*, 23, 23-41.
- Lin, C. T., Chiu, H., ve Chu, P. Y. (2006a). Agility index in the supply chain. *International Journal of Production Economics*, 100(2), 285-299.
- Lin, C. T., Chiu, H., ve Tseng, Y. H. (2006b). Agility evaluation using fuzzy logic. *International journal of production economics*, 101(2), 353-368.
- Linstone, H. A., ve Turoff, M. (Eds.). (1975). *The delphi method* (Vol. 1975, pp. 3-12). Reading, MA: Addison-Wesley.
- Liu, Y. (2020). Contextualising risk and building resilience: Returnees versus local entrepreneurs in China. *Applied Psychology*, 69(2), 415-443.
- Liu, Y., L. Cooper, C., ve Y. Tarba, S. (2019). Resilience, wellbeing and HRM: A multidisciplinary perspective. *The International Journal of Human Resource Management*, 30(8), 1227-1238.
- Liu, Y., Lee, J. M., ve Lee, C. (2020). The challenges and opportunities of a global health crisis: the management and business implications of COVID-19 from an Asian perspective. *Asian Business & Management*, 19, 277-297. doi: 10.1057/s41291-020-00119-x
- Liu, Y., ve Xu, X. (2017). Industry 4.0 and cloud manufacturing: A comparative analysis. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139(3), 034701.
- Lohmer, J., Bugert, N., ve Lasch, R. (2020). Analysis of resilience strategies and ripple effect in blockchain-coordinated supply chains: An agent-based simulation study. *International Journal of Production Economics*, 228, 107882.
- Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 6, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>
- Lu, Y., ve K. (Ram) Ramamurthy. (2011). Understanding the link between information technology capability and organizational agility: An empirical examination. *MIS quarterly*, 931-954. doi: 10.2307/41409967
- Ma, Y., Liu, Y., Zhang, L., ve Wang, Y. (2020). Digital twin-driven product design framework. *International Journal of Production Research*, 58(1), 200-217. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1650579>

- Maamari, B. E., ve Saheb, A. (2018). How organizational culture and leadership style affect employees' performance of genders. *International Journal of Organizational Analysis*, 26(4), 630–651.
- Madanchian, M. ve Taherdoost, H. (2023). A comprehensive guide to the TOPSIS method for multi-criteria decision making. *Sustainable Social Development*. 1(1): 2220. doi: 10.54517/ssd.v1i1.2220
- Majumdar, A., Sinha, S. K., ve Govindan, K. (2021). Prioritising risk mitigation strategies for environmentally sustainable clothing supply chains: Insights from selected organisational theories. *Sustainable Production and Consumption*, 28, 543-555.
- Manakandan, S. K., Rosnah, I., Mohd, R. J., ve Priya, R. (2017). Pesticide applicators questionnaire content validation: A fuzzy delphi method. *Med J Malaysia*, 72(4), 228-235.
- Mani, V., Gunasekaran, A., Papadopoulos, T., Hazen, B., ve Dubey, R. (2016). Supply chain social sustainability for developing nations: Evidence from India. *Resources, Conservation and Recycling*, 111, 42-52.
- Marcucci, G., Antomarioni, S., Ciarapica, F. E., ve Bevilacqua, M. (2022). The impact of Operations and IT-related Industry 4.0 key technologies on organizational resilience. *Production Planning & Control*, 33(15), 1417-1431.
- McDermott, J. H., Caiola, S. M., Kuhn, K. F., Stritter, F. T., ve Beza, J. (1995). A Delphi survey to identify the components of a community pharmacy clerkship. *American Journal of Pharmaceutical Education*, 59(4), 334-341.
- McKenzie, S. (2020). When is a ship a ship? Use by State armed forces of uncrewed maritime vehicles and the united nations Convention on the law of the sea. *Melbourne Journal of International Law*, 21(2), 373-402.
- McMillan, S. S., King, M., ve Tully, M. P. (2016). How to use the nominal group and Delphi techniques. *International Journal of Clinical Pharmacy*, 38, 655-662.
- Meade, L. M., ve Sarkis, J. J. I. J. (1999). Analyzing organizational project alternatives for agile manufacturing processes: an analytical network approach. *International Journal of Production Research*, 37(2), 241-261.
- Merrill, R. K., Schillebeeckx, S. J., ve Blakstad, S. (2019). Sustainable digital finance in Asia: Creating environmental impact through bank transformation. *Research Collection Lee Kong Chian School of Business*, 1-58.
- Miceli, A., Hagen, B., Riccardi, M. P., Sotti, F., ve Settembre-Blundo, D. (2021). Thriving, not just surviving in changing times: How sustainability, agility and digitalization intertwine with organizational resilience. *Sustainability*, 13(4), 2052.
- Miche, M., Schreiber, D., ve Hartmann, M. (2009). Core services for smart products. In *3rd European Workshop on Smart Products*. (Vol. 19, pp. 1-4).
- Milgram, P., ve Kishino, F. (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, 77(12), 1321-1329.
- Mirando, U.J., Herath H.M.R.P. (2024). Impact of supply chain agility on customer value and customer trust: Moderating effect of price sensitivity in healthcare industry. *Journal of Infrastructure, Policy and Development*. 8(7): 4374. <https://doi.org/10.24294/jipd.v8i7.4374>
- Mishra, R., Singh, R. K., ve Papadopoulos, T. (2022). Linking digital orientation and data-driven innovations: a SAP–LAP linkage framework and research propositions. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 71, 1346-1358.
- Mishra, S., Sankar Mahapatra, S., ve Datta, S. (2014). Agility evaluation in fuzzy context: influence of decision-makers' risk bearing attitude. *Benchmarking: An International Journal*, 21(6), 1084-1119. doi: 10.1108/BIJ-04-2012-0026

- Mittal, V. K., Sindhvani, R., Kalsariya, V., Salroo, F., Sangwan, K. S., ve Singh, P. L. (2017). Adoption of integrated lean-green-agile strategies for modern manufacturing systems. *Procedia CIRP*, 61, 463–468.
- Modgil, S., Gupta, S., Stekelorum, R., ve Laguir, I. (2021a). AI technologies and their impact on supply chain resilience during COVID-19. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 52(2), 130–149.
- Modgil, S., Singh, R. K., ve Hannibal, C. (2021b). Artificial intelligence for supply chain resilience: Learning from COVID-19. *The International Journal of Logistics Management*, 33(4), 1246–1264.
- Morgan, G. (1998). *Images of Organization*. Sage, Thousand Oaks. Walker Management Library: HD 31.M628
- Mubarik, M. S., Naghavi, N., Mubarik, M., Kusi-Sarpong, S., Khan, S. A., Zaman, S. I., ve Kazmi, S. H. A. (2021). Resilience and cleaner production in industry 4.0: Role of supply chain mapping and visibility. *Journal of Cleaner Production*, 292, 126058.
- Mukherjee, A. A., Singh, R. K., Mishra, R., ve Bag, S. (2021). Application of blockchain technology for sustainability development in agricultural supply chain: Justification framework. *Operations Management Research*, 1-16.
- Mühlhäuser, M. (2008). Smart products: An introduction. In *Constructing Ambient Intelligence: AmI 2007 Workshops Darmstadt, Germany*. Revised Papers (pp. 158-164). Springer Berlin Heidelberg.
- Müller, J., Hoberg, K., ve Fransoo, J. C. (2023). Realizing supply chain agility under time pressure: Ad hoc supply chains during the COVID-19 pandemic. *Journal of Operations Management*, 69(3), 426-449.
- Narasimhan, R., Swink, M., ve Kim, S. W. (2006). Disentangling leanness and agility: an empirical investigation. *Journal of operations management*, 24(5), 440-457. doi: 10.1016/j.jom.2005.11.011
- Narkhede, G. B., Pasi, B. N., Rajhans, N., ve Kulkarni, A. (2024). Industry 5.0 and sustainable manufacturing: a systematic literature review. *Benchmarking: An International Journal*. doi: 10.1108/BIJ-03-2023-0196
- Nassar, E., ve El-Khalil, R. (2020). Assessing agility implementation in manufacturing. *Proceedings of the 5th NA International Conference on Industrial Engineering and Operations Management* (Detroit, Michigan, USA, August 10–14), 1378–1385.
- Naylor, J. B., Naim, M. M., ve Berry, D. (1999). Leagility: Integrating the lean and agile manufacturing paradigms in the total supply chain. *International Journal of Production Economics*, 62(1-2), 107-118. doi: 10.1016/S0925-5273(98)00223-0
- Naz, F., Kumar, A., Majumdar, A., ve Agrawal, R. (2022). Is artificial intelligence an enabler of supply chain resiliency post COVID-19? An exploratory state-of-the-art review for future research. *Operations Management Research*, 15(1–2), 378–398.
- Nudurupati, S. S., Arshinder, K., ve Naim, M. M. (2011). Agile supply chain management: A framework for measurement and performance evaluation. *International Journal of Production Economics*, 131(1), 242–250.
- Nurhayati, K., Tavasszy, L., ve Rezaei, J. (2023). Joint B2B supply chain decision-making: Drivers, facilitators and barriers. *International Journal of Production Economics*, 256, 108721. : 10.1016/j.ijpe.2022.108721
- O'Donnell, J., ve Waldersee, V. (2016, Eylül 21). *Chinese firm's bid for German robot maker poses dilemma for Merkel*. Reuters. https://www.reuters.com/article/business/chinese-firms-bid-for-german-robot-maker-poses-dilemma-for-merkel-idUSKCN0YA2EA/?utm_source=chatgpt.com Erişim Tarihi: 13.06.2025
- Oesterreich, T. D., ve Teuteberg, F. (2016). Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. *Computers in Industry*, 83, 121-139.

- Opricovic, S., ve Tzeng, G. H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156(2), 445-455.
- Orlando, B., Ballestra, L. V., Scuotto, V., Pironti, M., ve Del Giudice, M. (2020). The impact of R&D investments on eco-innovation: A cross-cultural perspective of green technology management. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 69(5), 2275–2284.
- Overby, E., Bharadwaj, A., ve Sambamurthy, V. (2006). Enterprise agility and the enabling role of information technology. *European Journal of Information Systems*, 15(2), 120–131.
- Özdemir, M. (2018). TOPSIS. İçinde B. F. Yıldırım ve E. Önder (Ed.), *İşletmeciler, mühendisler ve yöneticiler için operasyonel, yönetsel ve stratejik problemlerin çözümünde çok kriterli karar verme yöntemleri* (3. bs., s. 133–153). Dora Yayınları.
- Paiola, M., Schiavone, F., Grandinetti, R., ve Chen, J. (2021). Digital servitization and sustainability through networking: Some evidences from IoT-based business models. *Journal of Business Research*, 132, 507-516.
- Panigrahi, R. R., Jena, D., Meher, J. R., ve Shrivastava, A. K. (2023). Assessing the impact of supply chain agility on operational performances-a PLS-SEM approach. *Measuring Business Excellence*, 27(1), 1-24.
- Pant, S., Rattner, L., ve Hsu, C. (1994). Manufacturing information integration using a reference model. *International Journal of Operations & Production Management*, 14(11), 52-72. doi: 10.1108/01443579410068648
- Park, K. T., Lee, D., ve Noh, S. D. (2020). Operation procedures of a work-center-level digital twin for sustainable and smart manufacturing. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 7(3), 791-814.
- Perera, H. N., Fahimnia, B., ve Tokar, T. (2020). Inventory and ordering decisions: a systematic review on research driven through behavioral experiments. *International Journal of Operations & Production Management*, 40(7/8), 997-1039. doi: 10.1108/IJOPM-05-2019-0339
- Pettit, T. J., Fiksel, J., ve Croxton, K. L. (2010). Ensuring supply chain resilience: development of a conceptual framework. *Journal of Business Logistics*, 31(1), 1-21.
- Potdar, P. K., Routroy, S., ve Behera, A. (2017). Analyzing the agile manufacturing barriers using fuzzy DEMATEL. *Benchmarking: An International Journal*, 24(7), 1912–1936.
- Prause, G., ve Atari, S. (2017). On sustainable production networks for Industry 4.0. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 4(4), 421-431. doi: 10.9770/jesi.2017.4.4(2)
- Priyadarshini, J., Singh, R. K., Mishra, R., ve Bag, S. (2022). Investigating the interaction of factors for implementing additive manufacturing to build an antifragile supply chain: TISM-MICMAC approach. *Operations Management Research*, 15(1), 567-588.
- Qamar, A., Gardner, E. C., Buckley, T., ve Zhao, K. (2021). Home-owned versus foreign-owned firms in the UK automotive industry: Exploring the microfoundations of ambidextrous production and supply chain positioning. *International Business Review*, 30(1), 101657.
- Qamar, A., Hall, M. A., Chicksand, D., ve Collinson, S. (2020). Quality and flexibility performance trade-offs between lean and agile manufacturing firms in the automotive industry. *Production Planning & Control*, 31(9), 723-738.
- Qin, J., Liu, Y., ve Grosvenor, R. (2016). A categorical framework of manufacturing for industry 4.0 and beyond. *Procedia cirp*, 52, 173-178.
- Queiroz, M. M., Pereira, S. C. F., Telles, R., ve Machado, M. C. (2019). Industry 4.0 and digital supply chain capabilities: A framework for understanding digitalisation challenges and opportunities. *Benchmarking: an international journal*, 28(5), 1761-1782.

- Rahman, S., Alali, A. S., Baro, N., Ali, S., ve Kakati, P. (2024). A Novel TOPSIS Framework for Multi-Criteria Decision Making with Random Hypergraphs: Enhancing Decision Processes. *Symmetry*, 16(12), 1602.
- Rai, A., Patnayakuni, R., ve Seth, N. (2006). Firm performance impacts of digitally enabled supply chain integration capabilities. *MIS Quarterly*, 225-246.
- Ramos, M. A., Thieme, C. A., Utne, I. B., ve Mosleh, A. (2020). Human-system concurrent task analysis for maritime autonomous surface ship operation and safety. *Reliability Engineering & System Safety*, 195, 106697.
- Reid, N. (1988). The Delphi technique: its contribution to the evaluation of professional practice. *Professional Competence Qual Assur Caring Professions*, 230, 262.
- Rettig, C. (2007). The trouble with enterprise software. *MIT Sloan Management Review*, 49(1), 21. <https://www.cendix.com/the-trouble-with-enterprise-software/> Erişim Tarihi: 27.06.2025
- Roszkowska, E. (2013). Rank ordering criteria weighting methods—a comparative overview. *Optimum. Studia Ekonomiczne*, (5 (65)), 14-33.
- Roy, B. (1996). *Multicriteria methodology for decision aiding* (Vol. 12). Springer Science & Business Media.
- Ruel, S., El Baz, J., Ivanov, D., ve Azadegan, A. (2023). Can organizational legitimacy stimulate digitalization and affect operational performance? The impact of COVID-19 on uncertainty in supply management. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 29(5), 100880. doi: doi.org/10.1016/j.pursup.2023.100880
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., ve Harnisch, M. (2015). Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. Boston Consulting Group, 9(1), 54-89.
- Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., ve Shen, L. (2019). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. *International Journal of Production Research*, 57(7), 2117–2135. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1533261>
- Sachs, J.D., Lafortune, G., Fuller, G. (2024). *The SDGs and the UN Summit of the Future. Sustainable Development Report 2024*. Paris: SDSN, Dublin: Dublin University Press. doi: 10.25546/108572
- Saini, M., Efimova, A., ve Chromjaková, F. (2021). Value stream mapping of ocean import containers: A process cycle efficiency perspective. *Acta logistica*. <https://doi.org/10.22306/al.v8i4.245>
- Saltelli, A., ve Giampietro, M. (2015). *The fallacy of evidence based policy*. arXiv preprint arXiv:1607.07398.
- Samsung. (2020). 6G, the Next Hyper-Connected Experience for All. *Samsung Research*. Erişim Tarihi: 07.07.2025 <https://cdn.codeground.org/nsr/downloads/researchareas/6G%20Vision.pdf>
- Sanders, A., Elangeswaran, C., ve Wulfsberg, J. (2016). Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing. *Journal of industrial engineering and management*, 9(3), 811-833.
- Sanderson, J., ve Cox, A. (2008). The challenges of supply strategy selection in a project environment: evidence from UK naval shipbuilding. *Supply Chain Management: An International Journal*, 13(1), 16-25.
- Schlechtendahl, J., Keinert, M., Kretschmer, F., Lechler, A., ve Verl, A. (2015). Making existing production systems Industry 4.0-ready: Holistic approach to the integration of existing production systems in Industry 4.0 environments. *Production Engineering*, 9(1), 143-148.
- Schmidt, R., Möhring, M., Härting, R. C., Reichstein, C., Neumaier, P., ve Jozinović, P. (2015). Industry 4.0-potentials for creating smart products: empirical research results. In

- Business Information Systems: 18th International Conference, BIS 2015, Poznań, Poland, June 24-26, 2015, Proceedings 18* (pp. 16-27). Springer International Publishing.
- Schumacher, A., Erol, S., ve Sihni, W. (2016). A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. *Procedia Cirp*, 52, 161-166.
- Sebastian, I. M., Ross, J. W., Beath, C., Mocker, M., Moloney, K. G., ve Fonstad, N. O. (2020). *How big old companies navigate digital transformation. In Strategic information management* (pp. 133-150). Routledge.
- Seele, P. (2016). Digitally unified reporting: how XBRL-based real-time transparency helps in combining integrated sustainability reporting and performance control. *Journal of Cleaner Production*, 136, 65-77.
- Seuring, S., ve Müller, M. (2008). From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of cleaner production*, 16(15), 1699-1710.
- Shahin, M., Chen, F. F., Hosseinzadeh, A., Bouzary, H., ve Shahin, A. (2024). Waste reduction via image classification algorithms: beyond the human eye with an AI-based vision. *International Journal of Production Research*, 62(9), 3193-3211.
- Sharifi, H., ve Zhang, Z. (1999). A methodology for achieving agility in manufacturing organisations: An introduction. *International journal of production economics*, 62(1-2), 7-22. doi: 10.1016/S0925-5273(98)00217-5
- Sharifi, H., Ve Zhang, Z. (2001). Agile manufacturing in practice: Application of a methodology. *International Journal of Operations & Production Management*, 21(5/6), 772-794.
- Sharma, R., Shishodia, A., Kamble, S., Gunasekaran, A., ve Belhadi, A. (2020). Agriculture supply chain risks and COVID-19: mitigation strategies and implications for the practitioners. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 1-27. doi: 10.1080/13675567.2020.1830049
- Shekarian, M., Nooraie, S. V. R., ve Parast, M. M. (2020). An examination of the impact of flexibility and agility on mitigating supply chain disruptions. *International Journal of Production Economics*, 220, 107438.
- Shih, H. S., Shyur, H. J., vd Lee, E. S. (2007). An extension of TOPSIS for group decision making. *Mathematical and Computer Modelling*, 45(7-8), 801-813.
- Shrouf, F., Ordieres, J., ve Miragliotta, G. (2014). Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm. *IEEE international conference on industrial engineering and engineering management* (pp. 697-701). IEEE.
- Siemens. (t.y.). *Unlocking the Power of Generative AI: Siemens Industrial Copilot*. Siemens Resmi Sitesi. Erişim tarihi: 14.08.2025.
<https://www.siemens.com/global/en/company/insights/unlocking-the-power-of-generative-ai-siemens-industrial-copilot.html>
- Simon, H. A. (1960). *The new science of management decision*. Harper & Brothers.
<https://doi.org/10.1037/13978-000>
- Singh Patel, B., Samuel, C., ve Sharma, S. K. (2017). Evaluation of agility in supply chains: a case study of an Indian manufacturing organization. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 28(2), 212-231. doi: 10.1108/JMTM-09-2016-0125
- Sinha, S. (2024). State of IoT 2024: Number of connected IoT devices growing 13% to 18.8 billion globally. Connected IoT device market update. *IoT Analytics*. Erişim Tarihi: 07.07.2025 <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>
- Skulmoski, G. J., Hartman, F. T., ve Krahn, J. (2007). The Delphi method for graduate research. *Journal of Information Technology Education: Research*, 6(1), 1-21.

- Smaldino, P. E., ve McElreath, R. (2016). The natural selection of bad science. *Royal Society open science*, 3(9), 160384.
- Smith, A., Voß, J. P., ve Grin, J. (2010). Innovation studies and sustainability transitions: The allure of the multi-level perspective and its challenges. *Research Policy*, 39(4), 435-448.
- Somsuk, N., ve Laosirihongthong, T. (2017). Prioritization of applicable drivers for green supply chain management implementation toward sustainability in Thailand. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 24(2), 175-191.
- Sony, M., ve Naik, S. (2020). Critical factors for the successful implementation of Industry 4.0: a review and future research direction. *Production Planning & Control*, 31(10), 799-815.
- Sriram, V., Krapfel, R., ve Spekman, R. (1992). Antecedents to buyer-seller collaboration: An analysis from the buyer's perspective. *Journal of business research*. doi: 10.1016/0148-2963(92)90026-8
- Stevenson, M., ve Spring, M. (2007). Flexibility from a supply chain perspective: definition and review. *International journal of operations & production management*, 27(7), 685-713. doi: 10.1108/01443570710756956
- Stock, T., ve Seliger, G. (2016). Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0. *Procedia CIRP*, 40, 536-541.
- Strandhagen, J. W., Buer, S. V., Semini, M., Alfnes, E., ve Strandhagen, J. O. (2022). Sustainability challenges and how Industry 4.0 technologies can address them: a case study of a shipbuilding supply chain. *Production Planning & Control*, 33(9-10), 995-1010.
- Su, C. W., Xie, Y., Shahab, S., Faisal, C. M. N., Hafeez, M., ve Qamri, G. M. (2021). Towards achieving sustainable development: role of technology innovation, technology adoption and CO2 emission for BRICS. *International Journal of Environmental Research And Public Health*, 18(1), 277.
- Sumrit, D. (2020). Supplier selection for vendor-managed inventory in healthcare using fuzzy multi-criteria decision-making approach. *Decision Science Letters*, 9(2), 233-256.
- Sumsion, T. (1998). The Delphi technique: an adaptive research tool. *British Journal of Occupational Therapy*, 61(4), 153-156.
- Suresh, M., Ganesh, S., ve Raman, R. (2019). Modelling the factors of agility of humanitarian operations. *International Journal of Agile Systems and Management*, 12(2), 108-123.
- Swafford, P. M., Ghosh, S., ve Murthy, N. (2006). Antecedents of supply chain agility. *International Journal of Operations & Production Management*, 26(7), 692-713.
- Swafford, P. M., Ghosh, S., ve Murthy, N. (2008). Achieving supply chain agility through IT integration and flexibility. *International journal of production economics*, 116(2), 288-297. doi: 10.1016/j.ijpe.2008.09.002
- Tallon, P. (2003). The alignment paradox. *CIO insight*, 1(40), 75-76. Erişim Tarihi: 03.09.2025 <https://www.cioinsight.com/news-trends/paul-tallon-the-alignment-paradox/>
- Tallon, P. P., ve Pinsonneault, A. (2011). Competing perspectives on the link between strategic information technology alignment and organizational agility: Insights from a mediation model. *MIS Quarterly*, 35(2), 463-486.
- Tang, C., ve Tomlin, B. (2008). The power of flexibility for mitigating supply chain risks. *International journal of production economics*, 116(1), 12-27. doi: 10.1016/j.ijpe.2008.07.008
- Teece, D. J., Pisano, G., ve Shuen, A. (1997). Dynamic capabilities and strategic management. *Strategic Management Journal*, 18(7), 509-533.
- Thames, L., ve Schaefer, D. (2016). Software-defined cloud manufacturing for industry 4.0. *Procedia CIRP*, 52, 12-17.

- ThreatLab, Z. (2023). *Zscaler threatlabz 2023 phishing report*. Tech. Rep. Erişim adresi: <https://resources.wisdominterface.com/wp-content/uploads/2023/09/2023-threatlabz-phishing-report.pdf> Erişim tarihi: 14.08.2025
- Tomomitsu, H. T. A., ve Moraes, R. D. O. (2021). The evolution of studies on information technology and organizational agility: A bibliometric analysis. *Gestão & Produção*, 28(2), e5294.
- Treiblmaier, H., ve Umlauff, U. (2019). Blockchain and the future of work: A self-determination theory approach. *Blockchain economics: Implications of distributed ledger technology*, 105-124.
- Tzeng, G. H., ve Huang, J. J. (2011). *Multiple attribute decision making: methods and applications*. CRC press.
- Udenio, M., Hoberg, K., ve Fransoo, J. C. (2018). Inventory agility upon demand shocks: Empirical evidence from the financial crisis. *Journal of Operations Management*, 62, 16-43.
- UNCTAD. (2023). *SDG investment trends monitor (Issue 4)*. United Nations Conference on Trade and Development. Erişim Tarihi: 19 Nisan 2025. <https://unctad.org/publication/sdg-investment-trends-monitor-issue-4>
- UNEP. (2011). *Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication-A Synthesis for Policy Makers*. Erişim Tarihi: 21.06.2025, https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/126GER_synthesis_en.pdf
- United Nations Department of Economic and Social Affairs (UN DESA). (2024). *The Sustainable Development Goals Report 2024*. Erişim Tarihi: 19 Nisan 2025. doi: 10.18356/9789213589755. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2024/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2024.pdf>
- Van Hoek, R. I., Harrison, A., ve Christopher, M. (2001). Measuring agile capabilities in the supply chain. *International Journal of Operations & Production Management*, 21(1/2), 126-148. doi: 10.1108/01443570110358495
- Vanichchinchai, A. (2022). The effects of the Toyota Way on agile manufacturing: an empirical analysis. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 33(8), 1450-1472. doi: 10.1108/JMTM-02-2022-0053
- Vasanthan, P. and Suresh, M. (2022), "Assessment of organizational agility in response to disruptive innovation: a case of an engineering services firm", *International Journal of Organizational Analysis*, Vol. 30 No. 6, pp. 1465-1465. doi: 10.1108/IJOA-09-2020-2431
- Vastag, G., Kasarda, J. D., ve Boone, T. (1994). Logistical support for manufacturing agility in global markets. *International Journal of Operations & Production Management*, 14(11), 73-85. doi: 10.1108/01443579410068657
- Vázquez-Bustelo, D., Avella, L., ve Fernández, E. (2007). Agility drivers, enablers and outcomes: Empirical test of an integrated agile manufacturing model. *International Journal of Operations & Production Management*.
- Veit, D. J., Mazzuchi, T. A., ve Sarkani, S. (2022). Measuring and Architecting System Resilience Through Trade Study Analysis. *IEEE Systems Journal*, 17(1), 1181-1192.
- Verhoef, P. C., Broekhuizen, T., Bart, Y., Bhattacharya, A., Dong, J. Q., Fabian, N., ve Haenlein, M. (2021). Digital transformation: A multidisciplinary reflection and research agenda. *Journal of business research*, 122, 889-901. doi: 10.1016/j.jbusres.2019.09.022
- Voolaid, K., ve Ehrlich, Ü. (2017). Organizational learning of higher education institutions: the case of Estonia. *The Learning Organization*, 24(5), 340-354.
- Walter, A. T. (2021). Organizational agility: ill-defined and somewhat confusing? A systematic literature review and conceptualization. *Management Review Quarterly*, 71(2), 343-391.

- Wan, J., Cai, H., ve Zhou, K. (2015). Industrie 4.0: enabling technologies. *In Proceedings of 2015 international conference on intelligent computing and internet of things*. (pp. 135-140). IEEE.
- Wang, S., Wan, J., Zhang, D., Li, D., ve Zhang, C. (2016). Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination. *Computer Networks*, 101, 158-168.
- Wang, W. M., ve Peng, H. H. (2020). A fuzzy multi-criteria evaluation framework for urban sustainable development. *Mathematics*, 8(3), 330.
- Wang, X., Hu, X., ve Zhang, C. (2024). Dynamic Spatiotemporal scheduling of hull parts under complex constraints in shipbuilding workshop. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 37(1-2), 123-148.
- Wang, Y., Han, J. H., ve Beynon-Davies, P. (2019). Understanding blockchain technology for future supply chains: a systematic literature review and research agenda. *Supply Chain Management: An International Journal*, 24(1), 62-84.
- Warner, K. S., ve Wäger, M. (2019). Building dynamic capabilities for digital transformation: An ongoing process of strategic renewal. *Long range planning*, 52(3), 326-349. doi: 10.1016/j.lrp.2018.12.001
- Wieland, A., ve Durach, C. F. (2021). Two perspectives on supply chain resilience. *Journal of Business Logistics*, 42(3), 315-322.
- Wollschlaeger, M., Sauter, T., ve Jasperneite, J. (2017). The future of industrial communication: Automation networks in the era of the internet of things and industry 4.0. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 11(1), 17-27.
- Womack, J. P., Jones, D. T., ve Roos, D. (2007). *The machine that changed the world: The story of lean production--Toyota's secret weapon in the global car wars that is now revolutionizing world industry*. Simon and Schuster.
- Woo, J. H., ve Song, Y. J. (2014). Systematisation of ship production management and case study for ship block assembly factory. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 27(4), 333-347.
- World Bank. (2022). *Türkiye ülke iklim ve kalkınma raporu (CCDR)*. Washington, DC: World Bank Publications. (Erişim Tarihi: 12.05.2025) <https://www.worldbank.org/en/country/turkey/brief/key-highlights-country-climate-and-development-report-for-turkiye>
- World Economic Forum (WEF). (2024). *Net-Zero Industry Tracker*, 2024 Edition, Insight Report. https://reports.weforum.org/docs/WEF_Net_Zero_Industry_Tracker_2024.pdf Erişim Tarihi: 20 Nisan 2025
- Worley, C. G., ve Jules, C. (2020). COVID-19's uncomfortable revelations about agile and sustainable organizations in a VUCA world. *The Journal of Applied Behavioral Science*, 56(3), 279-283. doi: 10.1177/0021886320936263
- Wróbel, K., Gil, M., ve Montewka, J. (2020). Identifying research directions of a remotely-controlled merchant ship by revisiting her system-theoretic safety control structure. *Safety Science*, 129, 104797.
- Xu, L. D., Xu, E. L., ve Li, L. (2018). Industry 4.0: State of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2941-2962. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>
- Ye, Y., Zhang, Q., Cao, Z., Chen, F. Y., Yan, H., Stanley, H. E., ve Zeng, D. D. (2022). Impacts of Export Restrictions on the Global Personal Protective Equipment Trade Network During COVID-19. *Advanced theory and simulations*, 5(4), 2100352.
- Yumina, A. Z., ve Ramos, A. L. F. A. (2022). Simulation for Decision Support in Process Reengineering in the Automotive Industry. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 7(2), 176-192. <https://doi.org/10.33889/IJMEMS.2022.7.2.012>

- Yusoff, H. M., Heng, P. P., Illias, M. R. H., Karrupayah, S., Fadhli, M. A., & Hod, R. (2024). A qualitative exploration and a Fuzzy Delphi validation of high-risk scaffolding tasks and fatigue-related safety behavioural deviation among scaffolders. *Heliyon*, 10(15).
- Yusuf, Y. Y., Sarhadi, M., ve Gunasekaran, A. (1999). Agile manufacturing: The drivers, concepts and attributes. *International Journal of Production Economics*, 62(1-2), 33-43. doi: 10.1016/S0925-5273(98)00219-9
- Yücel, K. (2024). Ukrayna İDA'sı hava-hava füzesi ile helikopter imha etti. *DefenceTurk.Net*. Erişim adresi: <https://www.defenceturk.net/ukrayna-idasi-hava-hava-fuzesi-ile-helikopter-imha-etti> Erişim tarihi 14 mayıs 2025.
- Zadeh, L. A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I. Information sciences, 8(3), 199-249.
- Zanakis, S. H., Solomon, A., Wishart, N., ve Dubish, S. (1998). Multi-attribute decision making: A simulation comparison of select methods. *European Journal of Operational Research*, 107(3), 507-529.
- Zhang, D., ve Sharifi, H. (2007). Towards theory building in agile manufacturing strategy—A taxonomical approach. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 54(2), 351–370.
- Zhang, D. Z. (2011). Towards theory building in agile manufacturing strategies—Case studies of an agility taxonomy. *International Journal of Production Economics*, 131(1), 303–312.
- Zhang, F., Wu, X., Tang, C. S., Feng, T., ve Dai, Y. (2020a). Evolution of operations management research: From managing flows to building capabilities. *Production and Operations Management*, 29(10), 2219-2229.
- Zhang, J., ve Ma, L. (2022). The impact of COVID-19 on e-commerce: Alibaba's supply chain response. *Manufacturing & Service Operations Management*, 24(2), 367–380. <https://doi.org/10.1287/msom.2021.1075>
- Zhang, W., Wang, K., Wang, S., ve Laporte, G. (2020b). Clustered coverage orienteering problem of unmanned surface vehicles for water sampling. *Naval Research Logistics (NRL)*, 67(5), 353-367.
- Zhang, Z., ve Sharifi, H. (2000). A methodology for achieving agility in manufacturing organisations. *International Journal of operations & Production management*, 20(4), 496-513.
- Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., ve Newman, S. T. (2017). Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review. *Engineering*, 3(5), 616-630.
- Zimmermann, H. J. (2011). *Fuzzy set theory—and its applications*. Fourth Edition. Springer Science & Business Media.

EK 1 BULANIK DELPHI SORU FORMU

Çevik Üretim: İnsansız Deniz Araçları Üzerine Endüstri 4.0 ve Sürdürülebilirlik Perspektifinden Bir İnceleme

Sayın Katılımcı,

Bu soru formu, İnsansız Deniz Aracı (İDA) üretiminde Endüstri 4.0 ve Sürdürülebilirlik perspektiflerinden Çevik Üretim uygulamalarının değerlendirilmesi hakkında bilgi toplamak amacıyla hazırlanmıştır. Araştırmamız, Endüstri 4.0 sayesinde gerçekleşen gelişmelerin çeviklik ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine olan etkilerini incelemeyi, buradan hareketle literatürde eleştiri konusu olan çevik üretimin sürdürülebilirliği hakkında bir görüş ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bahsedilen kavramlarla ilgili tanımlamalar ve açıklamalar soru formunun başlangıcında yer almakta olup, ifadeleri değerlendirirken bu açıklamaları göz önünde bulundurmanız rica olunur. Araştırmamıza katılım tamamen gönüllüdür, herhangi bir sebeple çalışmayı tamamlamak istemezseniz dilediğiniz an katılımınıza son verebilirsiniz. Yanıtlarınız anonim olarak değerlendirilecek olup elde edilen veriler yalnızca bilimsel amaçlarla kullanılacak ve gizliliğiniz korunacaktır. Soruların yanıtlanması yaklaşık 15-20 dakikanızı alacaktır. Her türlü sorunuz ve önerileriniz için aşağıda yer alan mail adresleri üzerinden bizimle iletişime geçebilirsiniz.

Desteginiz için teşekkür ederiz.

Gül EKŞİ

Akdeniz Üniversitesi İşletme Doktora Programı Öğrencisi

Danışman: Prof. Dr. Can Deniz KÖKSAL

ARAŞTIRMA KAPSAMINDA DİKKATE ALINMASI GEREKEN KAVRAMLAR:

Endüstri 4.0

Endüstri 4.0, üretim süreçlerini dijitalleştiren ve otomasyonu artıran dördüncü sanayi devrimini ifade eder. Bu devrim, sistemlerde köklü değişiklikler yaparak, rekabet gücünü artırmayı ve değişen müşteri taleplerine etkili ve hızlı bir şekilde yanıt vermeyi hedefler. Endüstri 4.0, nesnelerin interneti (IoT), siber-fiziksel sistemler, bulut bilişim ve yapay zekâ gibi teknolojilerin entegrasyonu ile daha verimli, esnek ve özelleştirilebilir üretimi hedefler. Böylece akıllı fabrikalar oluşturulabilir, kaynak verimliliği artırılabilir, üretim süreçleri daha esnek olabilir ve müşteri memnuniyeti yükseltilebilir.

Çevik Üretim

Çevik üretim, işletmelerin dinamik ve rekabetçi pazar koşullarına ve hızla değişen müşteri taleplerine etkin, esnek, proaktif ve hızlı bir şekilde yanıt verme yeteneğini ifade eder. Bu üretim stratejisinde müşteri odaklılık, hız, esneklik ve kalite gibi unsurlar ön plandadır. Bu yaklaşım, işletmelerin rekabetçi bir ortamda hayatta kalabilmeleri için sürekli değişim ve belirsizliklere uyum sağlamalarını gerektirir.

Sürdürülebilirlik

Sürdürülebilirlik, bugünün ihtiyaçlarını karşılarken gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneğini tehlikeye atmadan doğal, ekonomik ve sosyal kaynakların dengeli bir şekilde yönetilmesidir. Sürdürülebilirliğin teorik ve uygulamalı çerçevesi, Üçlü Sorumluluk Modeli (Triple Bottom Line) ile desteklenmekte olup; bu model çevresel, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirliği bir arada ele alarak kurumların performanslarını değerlendirmede bir referans noktasıdır.

KİŞİSEL BİLGİLER:			
Yaş:		İDA Projelerinden Önceki Pozisyon:	
Cinsiyet:		İDA Projelerindeki Pozisyon:	
Telefon (İsteğe Bağlı):		İDA Projelerindeki Mesleki Deneyim:	
E-mail (İsteğe Bağlı):		Toplam Mesleki Deneyim:	
Şirket (İsteğe Bağlı):			

Burada talep edilen bilgiler, elde edilecek verileri sınıflandırmak için tamamen bilimsel amaçlarla kullanılacak olup, üçüncü kişilerle paylaşılmayacaktır.

DEĞERLENDİRME

Aşağıdaki ifadeleri, yukarıda tanımları verilen kavramları (Endüstri 4.0, Çevik Üretim ve Sürdürülebilirlik) göz önünde bulundurarak değerlendiriniz. Her bir değer için 5 önem derecesi bulunmaktadır. Size uygun değerlendirmeyi bu örneği dikkate alarak ilgili satırın sağ tarafında yer alan renkli hücreye yazınız.

Önem Dereceleri	1.Önemsiz	2.Az derecede önemli	3.Orta derecede önemli	4.Önemli	5.Son derece önemli
-----------------	-----------	----------------------	------------------------	----------	---------------------

ÇEVİKLİK YETENEKLERİ VE GÖSTERGELERİ**TEKNOLOJİ VE ENDÜSTRİ 4.0**

1. Teknolojik yeniliklerin takip edilmesi, erken benimsenmesi ve uygulanması.	
2. Değişikliklere yanıt verebilirliği en üst düzeye çıkarmak için süreç planlamasında yeni teknolojilerin kullanılması.	
3. Tüm departmanlarda işlevlerin ve bilgilerin tek bir sistemde birleştirilmesi.	
4. Ekipman ve makinelerin bakımının kontrol edilmesi.	
5. Modern yazılım ve bilgisayar kontrollü makinelerin kullanılması.	
6. Hızlı prototipleme için yeni teknolojilerin kullanılması	
7. Otomatik güdümlü araç (AGV), otomatik depolama ve geri alma sistemleri (AS/RS) gibi otonom teknolojilerden faydalanılması.	
8. Akıllı fabrika bölümü, eklemeli üretim, İnsanların İnterneti (IoP), Hizmetlerin İnterneti (IoS) ve robotik gibi Endüstri 4.0 teknolojilerinin üretim süreçlerini dijitalleştirilmesi.	
9. Üretim süreçlerinde yapay zeka, blok zinciri, büyük veri analitiği, makine öğrenimi veya gerçek zamanlı iletişim yeteneği gibi özelliklere sahip olunması.	
10. Otonom, çevik ve proaktif hiper-bağlantılı bir üretim ekosistemi geliştirmek için eklemeli üretim, artırılmış gerçeklik, CPS, bilişsel/otonom robotlar, dijital ikiz, gömülü IoT, uç bilişim ve akıllı sensörlerin kullanılması.	
11. 3D yazıcı gibi teknoloji temelli alternatif parça üretimi yöntemleri kullanılması.	
12. İnsansız deniz araçlarının; istihbarat, gözetleme, keşif devriyesi ve kıyı limanı savunma gibi görevlerini yerine getirmek için aktif bir veri/iletişim bağlantısına sahip olması.	
13. Denizcilik projelerinde birçok farklı işlevsel ürünün benzersiz ve yenilikçi bir konfigürasyonda bir araya getirilmesi.	

SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

1. Üretim süreçlerinde temiz yakıt ve filtre sistemlerinin kullanılması	
2. Geri dönüştürülmüş ve/veya dönüştürülebilir hammaddelerin kullanılması	
3. Çalışanların çevre koruma ve sürdürülebilirlik gibi konularda eğitilmesi	
4. Karbon ayak izi hesaplaması gibi denetimlerin gerçekleştirilmesi	
5. ISO 14001 Çevre yönetim sistemi sertifikası gibi bütüncül çevreci yapıların üretim süreçlerine dahil edilmesi	
6. Tüm paydaşların sürdürülebilirlikle ilgili karar alma süreçlerinde önyargılardan uzak ve açık fikirli yatırım tutumları sergilemesi.	
7. Tüm paydaşların sürdürülebilirlik için ortak değer yaratma sürecine katılımı.	

TEDARİK ZİNCİRİ

1. Verimli ve esnek tedarikçi ilişkileri	
2. Tedarik zincirinin dikey yatay entegrasyon, gerçek zamanlı yetenek, ademi merkezileşme ve sanallaştırma gibi değerli tasarım ilkelerine sahip olması.	
3. Endüstri 4.0 teknolojileri sayesinde tedarikçiler, üreticiler, lojistik kanallar, distribütörler ve hatta müşteriler dahil olmak üzere sistemdeki tüm aktörlerin dijitalleştirilmesi.	
4. Tedarik zinciri paydaşlarının işbirliği, yenilikçilik, bilgi güvenliği, farkındalık, esneklik ve otomasyon gibi özelliklere sahip olması.	

MÜŞTERİ TALEBİ

1. Daha sofistike ürünler yaratmak için üretim kapasitelerinin ölçeklenebilir olması ve çalışanların adaptasyonunun sağlanması.	
2. Çalışanlara, değişimlere hızlı adapte olmalarını sağlayacak esnek ve uyarlanabilir çalışma mantığının kazandırılması.	
3. Değişikliklere hızlı yanıt vermek için ölçülebilir hedeflere dayalı günlük kararların planlanması.	
4. Gelecekteki pazar satışlarının ve ihtiyaçlarının tahmin edilmesi.	
5. Deniz aracı siparişi veren kurumsal ya da bireysel müşterilerin zamanla güncellenen ve özelleşen gereksinimlerine (teslim tarihi, ürün kalitesi vb.) hızlı yanıt verilebilmesi.	

STRATEJİK VE OPERASYONEL

1. Çalışanların anlık takibi için kısa vadeli hedeflerin belirlenmesi.
2. Maliyet hedef ve amaçlarının belirlenmesi, kesinleştirilmesi ve bunlara ulaşılması.
3. Ürün geliştirme ve üretim süreçlerine farklı aktörlerin dahil edilmesi, stratejik ortaklıkların kurulması.
4. Liderin duyarlılığı.
5. Sürekli öğrenme ve eğitim.
6. Çalışanların işbirliği.
7. Açık, şeffaf iletişim ve bilgi paylaşımı.
8. Değişimlere hızla adapte olabilmek için süreç bilgisi ve ileri dijital teknolojiler gibi temel operasyonlarda geliştirilen kurum içi kaynakların varlığı.

DIĞER KOSULLAR (Pandemi gibi kriz dönemleri, devlet katkuları veya kısıtları, ekonomik koşullar)

1. Teşvik paketleri ve kriz kurtarma planlarının etkilerini en üst düzeye çıkarmak için hükümetlerle işbirliği yapılması.
2. Siyasi istikrarsızlık, ekonomik dalgalanma, yakın coğrafyamızdaki savaşlar, göçmen krizleri, iklim değişikliği kaynaklı doğal afetler, yoksulluk, su ve gıda kıtlığı gibi küresel ve toplumsal zorluklarla daha iyi mücadele etmek için iş modellerini dönüştürebilmek amacıyla yeni teknolojiler edinilmesi.

CEVİKLİK STRATEJİLERİ**TEKNOLOJİ VE ENDÜSTRİ 4.0**

1. **Dijital Dönüşüm ve Dijitalleşme:** Endüstri 4.0'ı mümkün kılan karmaşık teknoloji trendlerini benimsemek.
2. **Finansal Güç ve Teknolojik Yetenekler:** Güçlü bir teknolojik altyapı ile verilerin analiz edilebilmesi ve böylece faydalı içgörülerini paydaşlarla paylaşarak daha iyi, akıllı ve hızlı kararlar alınabilmesi için yeterli finansal güce sahip olmak.
3. **Bilgi Paylaşımı:** Kuruluşun tüm birimlerinde gerekli yetki ve donanımı sağlayarak (CPS - Cyber Physical Systems, IIoT - Industrial internet of things, bulut veriler vb.) veri kaynaklarına daha yakın olmak; bu sayede bağımsız ancak daha bilinçli kararlar alınmasını sağlamak.
4. **Teknoloji Edinimi:** Pazara sunma süresini kısaltma ve kalitesizlik maliyetini düşürme ihtiyacıyla yeni teknolojileri keşfetmek ve/veya dışarıdan tedarik etmek.

SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

1. **Çevik ve Çevreci Üretim:** Teknolojik yeniliklerle ve dijital dönüşümle üretim sistemini hem çevikleştirmek hem de sürdürülebilir hale getirmek.
2. **Kirlilik Minimizasyonu:** Çevreci üretim süreçlerini sisteme dahil ederek; hava, su ve toprak kirliliklerini önleme teknolojilerindeki inovasyon seviyesini yükselterek çevre sorunlarına neden olan faaliyetlerin zararını azaltmak ve çevresel sürdürülebilirlik uygulamalarında maliyet avantajı sağlamak.
3. **Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SKH):** Dijitalleşmeyle yeni veri kaynaklarına erişim, analitik kapasitelerin geliştirilmesi ve dijital ekosistemler arasında işbirliği sayesinde SKH'leri gerçekleştirmek.

TEDARİK ZİNCİRİ

1. **Tedarik Zinciri:** Klasik tedarik zinciri modellerini modüler, ölçeklenebilir, dinamik, hiper bağlantılı ve veri odaklı Dijital Tedarik Ağlarına (DSN) dönüştürmek.
2. **Hammadde Temini:** Hayati önem taşıyan malzemelerin eksikliği durumunda operasyonları yeni bir üretim türüne adapte edebilmek.
3. **Tasarım Değişiklikleri:** Şirketin yeni bir modifiye tasarım geliştirmesi veya mevcut bir tasarımın üretimini artırması gerektiğinde, ihtiyaçlara göre tedarik zincirini yeniden tasarlayabilmek.

MÜŞTERİ TALEBİ

1. **Müşteri Odaklı Yenilikçilik:** Müşterilerin ihtiyaçlarını karşılama kapasitesini ve beklenmedik değişikliklerden hızla kurtulma yeteneğini içeren stratejik planlamalar oluşturmak.
2. **Firenin Azaltılması:** Müşterilerin ihtiyaçlarındaki değişikliklere karşı yüksek hassasiyet gösterirken zaman ve fireyi en aza indirmeye çalışan bir strateji oluşturmak.
3. **Müşteri Memnuniyeti:** Üretim ve teslimat süresini kısaltmak, ürün geliştirme döngüsünü azaltmak, sipariş doğruluğunu artırmak ve müşteri iletişimini ve memnuniyetini iyileştirmek için dahili ve işbirliğine dayalı operasyonlarını yeniden düzenleme yeteneğine sahip olmak.
4. **Talep Değişimleri:** Üretim sürecinde müşteriden gelen değişiklik taleplerini doğru zamanda minimum maliyetle gerçekleştirmek.

STRATEJİK VE OPERASYONEL	
1. Çalışan Yetkinliği: Değer yaratmak ve rekabet avantajı oluşturmak için yeni süreçleri öğrenme, uyarlama, uygulama ve rol ve sorumlulukları genişletme becerilerine sahip insan kaynağı oluşturmak.	
2. Etkili Eğitim Ortamı: Başarısızlığa karşı toleranslı bir kültür geliştirmek, işletmenin varlığını sürdürebilmesi için çalışanlara gerekli becerileri ve gerektiğinde risk almayı öğretmeyi destekleyen bir ortam yaratmak.	
3. Paydaş Değeri: Endüstri 4.0 teknolojileriyle müşteri memnuniyeti, mevzuata uygunluk, gelir artışı veya marka duyarlılığı gibi önemli fırsatlar elde ederek paydaş değerini en üst düzeye çıkarmak.	
4. Üretim Süreçleri: Çevik üretim sistemi ile ürün kalitesi, süreç çevikliği ve düşük operasyonel maliyetler elde etmek.	
5. Rekabet Avantajı: Endüstri 4.0 uygulamaları sayesinde üretim sistemlerini geliştirerek maliyet liderliği elde etmek ve rekabet avantajı kazanmak.	
6. Risk Yönetimi: Tüketici talebi tahminlerinde artan belirsizlik, paydaşlar arası bilgi aktarımındaki gecikmeler ve çarpıklıklar gibi beklenmedik risklere yanıt veren uygun bir üretim sistemi oluşturmak.	
7. İnsansız Sistemler: Gemi mürettebatının ve çalışanların sayısını azaltarak ya da tamamen insansız uygulamalara geçerek işletme maliyetlerini ve insan hatalarını azaltmak.	

DİĞER KOŞULLAR (Pandemi gibi kriz dönemleri, devlet katkıları veya kısıtları, ekonomik koşullar)	
1. Dayanıklılık: Organizasyona ve çalışanlara belirsizliklerle başa çıkma ve bu belirsizliklerden kurtulma konusunda çeşitli beceriler kazandırmak.	
2. Ekonomik Etkililik: Ekonomik gerileme dönemlerinde iş gücünü yavaşlatmadan firma harcamaları üzerinde mutlak kontrol ve görünürlük sağlamak.	
3. Düşük Gecikme Süresi: Herhangi bir üretim yapılandırmasında gecikmeleri ve bu gecikmelerden kaynaklı iş yükünü minimize etmek.	
4. Üretim Sistemi: Çevik bir üretim sistemi kurarak, sosyo-politik değişimlerden doğal afetlere veya ekonomik krizlere kadar çeşitli nedenlerden kaynaklanan olası kesintilerden tamamen kaçınmak için çevreyi sürekli izlemek; bu kesintilerin olası etkilerinden kurtulmak için kendini en uygun şekilde yeniden yapılandırabilmek; kesinti yaşandıktan sonra optimum operasyonel performansı hızlı bir şekilde sağlamak; böylece kesintilerin etkisini proaktif olarak en aza indirebilmek.	
5. Üretim Planlaması: Türbülans veya kesinti senaryoları altında etkileri ve alternatifleri hızlı bir şekilde değerlendirmek için what-if senaryo planlaması veya eşzamanlı planlama gibi modern planlama sistemlerini kendi üretim planlama süreçlerine dahil etmek.	
6. Kapasite Planlaması: Uzun vadeli perspektifte topluma ve pazarlara mal ve hizmet sağlanmasını güvence altına almak için sürdürülebilir gelişmeler doğrultusunda iç ve dış değişikliklere yanıt olarak kapasite kullanımını ve bunların taleplere tahsisini ayarlayarak küresel kesinti zamanlarında hayatta kalabilen dinamik bir yapı kurmak.	
7. Tesis Kapasitesi: Yaşanabilecek kesintiler sırasında üretim kapasitesini stabil tutabilmek için dağıtık konumlarda çok sayıda veya daha büyük tesisler kurmak.	
8. İşbirliği: İşletme yeni bir ürün türüyle ilgili deneyim sahibi olmadığında diğer kuruluşlarla işbirliği yapabilmek.	

EK 2 BULANIK TOPSIS SORU FORMU

ÇEVİK ÜRETİM: İNSANSIZ DENİZ ARAÇLARI ÜZERİNE ENDÜSTRİ 4.0 VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK PERSPEKTİFİNDEN BİR İNCELEME

Sayın Katılımcı,

Bu soru formu, İnsansız Deniz Aracı (İDA) üretiminde Endüstri 4.0 ve Sürdürülebilirlik perspektiflerinden Çevik Üretim uygulamalarının değerlendirilmesi hakkında bilgi toplamak amacıyla hazırlanmıştır. Araştırmamız, Endüstri 4.0 sayesinde gerçekleşen gelişmelerin çeviklik ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine olan etkilerini incelemeyi, buradan hareketle literatürde eleştiri konusu olan çevik üretimin sürdürülebilirliği hakkında bir görüş ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bahsedilen kavramlarla ilgili tanımlamalar ve açıklamalar soru formunun başlangıcında yer almakta olup, ifadeleri değerlendirirken bu açıklamaları göz önünde bulundurmanız rica olunur. Araştırmamıza katılım tamamen gönüllüdür, herhangi bir sebeple çalışmayı tamamlamak istemezseniz dilediğiniz an katılımınıza son verebilirsiniz. Yanıtlarınız anonim olarak değerlendirilecek olup elde edilen veriler yalnızca bilimsel amaçlarla kullanılacak ve gizliliğiniz korunacaktır. Soruların yanıtlanması yaklaşık 15 dakikanızı alacaktır. Her türlü sorunuz ve önerileriniz için aşağıda yer alan mail adresleri üzerinden bizimle iletişime geçebilirsiniz.

Desteğiniz için teşekkür ederiz.

Gül EKŞİ

Akdeniz Üniversitesi İşletme Doktora Programı Öğrencisi

Danışman: Prof. Dr. Can Deniz KÖKSAL

ARAŞTIRMA KAPSAMINDA DİKKATE ALINMASI GEREKEN KAVRAMLAR:

Endüstri 4.0:

Endüstri 4.0, üretim süreçlerini dijitalleştiren ve otomasyonu artıran dördüncü sanayi devrimini ifade eder. Bu devrim, sistemlerde köklü değişiklikler yaparak, rekabet gücünü artırmayı ve değişen müşteri taleplerine etkili ve hızlı bir şekilde yanıt vermeyi hedefler. Endüstri 4.0, nesnelerin interneti (IoT), siber-fiziksel sistemler, bulut bilişim ve yapay zekâ gibi teknolojilerin entegrasyonu ile daha verimli, esnek ve özelleştirilebilir üretimi hedefler. Böylece akıllı fabrikalar oluşturulabilir, kaynak verimliliği artırılabilir, üretim süreçleri daha esnek olabilir ve müşteri memnuniyeti yükseltilebilir.

Çevik Üretim:

Çevik üretim, işletmelerin dinamik ve rekabetçi pazar koşullarına ve hızla değişen müşteri taleplerine etkin, esnek, proaktif ve hızlı bir şekilde yanıt verme yeteneğini ifade eder. Bu üretim stratejisinde müşteri odaklılık, hız, esneklik ve kalite gibi unsurlar ön plandadır. Bu yaklaşım, işletmelerin rekabetçi bir ortamda hayatta kalabilmeleri için sürekli değişim ve belirsizliklere uyum sağlamalarını gerektirir.

Sürdürülebilirlik:

Sürdürülebilirlik, bugünün ihtiyaçlarını karşılarken gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneğini tehlikeye atmadan doğal, ekonomik ve sosyal kaynakların dengeli bir şekilde yönetilmesidir. Sürdürülebilirliğin teorik ve uygulamalı çerçevesi, Üçlü Sorumluluk Modeli (Triple Bottom Line) ile desteklenmekte olup; bu model çevresel, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirliği bir arada ele alarak kurumların performanslarını değerlendirmede bir referans noktasıdır.

KİŞİSEL BİLGİLER

Burada talep edilen bilgiler, elde edilecek verileri sınıflandırmak için tamamen bilimsel amaçlarla kullanılacak olup, üçüncü kişilerle paylaşılmayacaktır.

Yaş:

Cinsiyet:

Telefon (İsteğe Bağlı):

Şirket (İsteğe Bağlı):

İDA Projelerinden Önceki Pozisyon *

İDA Projelerindeki Pozisyon *

İDA Projelerindeki Mesleki Deneyim (Yıl olarak yaklaşık bir değer belirtiniz.) *

Toplam Mesleki Deneyim (Yıl olarak yaklaşık bir değer belirtiniz.) *

DEĞERLENDİRME YAPARKEN

Çeviklik yetenek ve Göstergeleri (ÇYG) ve Çeviklik Stratejileri (ÇS) için belirlenen ifadeler aşağıda yer almaktadır. Bu ifadeleri, önceki sayfada tanımları verilen kavramları (Endüstri 4.0, Çevik Üretim ve Sürdürülebilirlik) göz önünde bulundurarak değerlendiriniz.

ÇS ifadeleri koyu renk ve büyük punto ile ve **ÇY ifadeleri de normal renk ve daha küçük punto** ile belirtilmişlerdir. Satırlarda yer alan her bir ÇS ifadesini yukarıda yer alan ÇYG ifadesini göz önünde bulundurarak aşağıda verilen **önem derecelerine** göre değerlendiriniz:

Önem Dereceleri: 1: Önemsiz 2: Az Derecede Önemli 3: Orta Derecede Önemli 4: Önemli 5: Son Derece Önemli

Bu önem derecelerinin her biri için de olacak şekilde o önem derecesini değerlendiriniz.:

Önem Derecelerinin Düzeyi:	D: Düşük	O: Orta	Y: Yüksek
-----------------------------------	-----------------	----------------	------------------

Belirlediğiniz bu değeri ifadenin en sağında cümle sonunda yer alan (-) içerisine yazınız:

S01 Finansal Güç ve Teknolojik Yetenekler: Güçlü bir teknolojik altyapı ile verilerin analiz edilebilmesi ve böylece faydalı içgörülerini paydaşlarla paylaşarak daha iyi, akıllı ve hızlı kararlar alınabilmesi için yeterli finansal güce sahip olmak.

- >>YG01 Teknolojik yeniliklerin takip edilmesi, erken benimsenmesi ve uygulanması. (-)
- >>YG02 Otonom, çevik ve proaktif hiper-bağımlı bir üretim ekosistemi geliştirmek için eklemeli üretim, artırılmış gerçeklik, CPS, bilişsel/otonom robotlar, dijital ikiz, gömülü IoT, uç bilişim ve akıllı sensörlerin kullanılması. (-)
- >>YG03 İnsansız deniz araçlarının; istihbarat, gözetleme, keşif devriyesi ve kıyı limanı savunma gibi görevlerini yerine getirmek için aktif bir veri/iletişim bağlantısına sahip olması. (-)
- >>YG04 Çalışanlara, değişimlere hızlı adapte olmalarını sağlayacak esnek ve uyarlanabilir çalışma mantığının kazandırılması. (-)
- >>YG05 Deniz aracı siparişi veren kurumsal ya da bireysel müşterilerin zamanla güncellenen ve özelleşen gereksinimlerine (teslim tarihi, ürün kalitesi vb.) hızlı yanıt verilebilmesi. (-)
- >>YG06 Maliyet hedef ve amaçlarının belirlenmesi, kesinleştirilmesi ve bunlara ulaşılması. (-)
- >>YG07 Liderin duyarlılığı. (-)
- >>YG08 Sürekli öğrenme ve eğitim. (-)
- >>YG09 Çalışanların işbirliği. (-)
- >>YG10 Açık, şeffaf iletişim ve bilgi paylaşımı. (-)
- >>YG11 Değişimlere hızlı adapte olabilmek için süreç bilgisi ve ileri dijital teknolojiler gibi temel operasyonlarda geliştirilen kurum içi kaynakların varlığı. (-)
- >>YG12 Teşvik paketleri ve kriz kurtarma planlarının etkilerini en üst düzeye çıkarmak için hükümetlerle işbirliği yapılması. (-)
- >>YG13 Siyasi istikrarsızlık, ekonomik dalgalanma, yakın coğrafyamızdaki savaşlar, göçmen krizleri, iklim değişikliği kaynaklı doğal afetler, yoksulluk, su ve gıda kıtlığı gibi küresel ve toplumsal zorluklarla daha iyi mücadele etmek için iş modellerini dönüştürebilmek amacıyla yeni teknolojiler edinilmesi. (-)

S02 Teknoloji Edinimi: Pazara sunma süresini kısaltma ve kalitesizlik maliyetini düşürme ihtiyacıyla yeni teknolojileri keşfetmek ve/veya dışarıdan tedarik edilmesi, benimsenmesi ve uygulanması.

- >>YG01 Teknolojik yeniliklerin takip edilmesi, erken benimsenmesi ve uygulanması. (-)
- >>YG02 Otonom, çevik ve proaktif hiper-bağımlı bir üretim ekosistemi geliştirmek için eklemeli üretim, artırılmış gerçeklik, CPS, bilişsel/otonom robotlar, dijital ikiz, gömülü IoT, uç bilişim ve akıllı sensörlerin kullanılması. (-)
- >>YG03 İnsansız deniz araçlarının; istihbarat, gözetleme, keşif devriyesi ve kıyı limanı savunma gibi görevlerini yerine getirmek için aktif bir veri/iletişim bağlantısına sahip olması. (-)
- >>YG04 Çalışanlara, değişimlere hızlı adapte olmalarını sağlayacak esnek ve uyarlanabilir çalışma mantığının kazandırılması. (-)
- >>YG05 Deniz aracı siparişi veren kurumsal ya da bireysel müşterilerin zamanla güncellenen ve özelleşen gereksinimlerine (teslim tarihi, ürün kalitesi vb.) hızlı yanıt verilebilmesi. (-)
- >>YG06 Maliyet hedef ve amaçlarının belirlenmesi, kesinleştirilmesi ve bunlara ulaşılması. (-)
- >>YG07 Liderin duyarlılığı. (-)
- >>YG08 Sürekli öğrenme ve eğitim. (-)
- >>YG09 Çalışanların işbirliği. (-)
- >>YG10 Açık, şeffaf iletişim ve bilgi paylaşımı. (-)
- >>YG11 Değişimlere hızlı adapte olabilmek için süreç bilgisi ve ileri dijital teknolojiler gibi temel operasyonlarda geliştirilen kurum içi kaynakların varlığı. (-)
- >>YG12 Teşvik paketleri ve kriz kurtarma planlarının etkilerini en üst düzeye çıkarmak için hükümetlerle işbirliği yapılması. (-)
- >>YG13 Siyasi istikrarsızlık, ekonomik dalgalanma, yakın coğrafyamızdaki savaşlar, göçmen krizleri, iklim değişikliği kaynaklı doğal afetler, yoksulluk, su ve gıda kıtlığı gibi küresel ve toplumsal zorluklarla daha iyi mücadele etmek için iş modellerini dönüştürebilmek amacıyla yeni teknolojiler edinilmesi. (-)

S03 Çevik ve Çevreci Üretim: Teknolojik yeniliklerle ve dijital dönüşümle üretim sistemini hem çevikleştirmek hem de sürdürülebilir hale getirmek.

- >>YG01 Teknolojik yeniliklerin takip edilmesi, erken benimsenmesi ve uygulanması. (-)
- >>YG02 Otonom, çevik ve proaktif hiper-bağımlı bir üretim ekosistemi geliştirmek için eklemeli üretim, artırılmış gerçeklik, CPS, bilişsel/otonom robotlar, dijital ikiz, gömülü IoT, uç bilişim ve akıllı sensörlerin kullanılması. (-)
- >>YG03 İnsansız deniz araçlarının; istihbarat, gözetleme, keşif devriyesi ve kıyı limanı savunma gibi görevlerini yerine getirmek için aktif bir veri/iletişim bağlantısına sahip olması. (-)
- >>YG04 Çalışanlara, değişimlere hızlı adapte olmalarını sağlayacak esnek ve uyarlanabilir çalışma mantığının kazandırılması. (-)
- >>YG05 Deniz aracı siparişi veren kurumsal ya da bireysel müşterilerin zamanla güncellenen ve özelleşen gereksinimlerine (teslim tarihi, ürün kalitesi vb.) hızlı yanıt verilebilmesi. (-)
- >>YG06 Maliyet hedef ve amaçlarının belirlenmesi, kesinleştirilmesi ve bunlara ulaşılması. (-)

- >>YG07 Liderin duyarlılığı. (-)
- >>YG08 Sürekli öğrenme ve eğitim. (-)
- >>YG09 Çalışanların işbirliği. (-)
- >>YG10 Açık, şeffaf iletişim ve bilgi paylaşımı. (-)
- >>YG11 Değişimlere hızlı adapte olabilmek için süreç bilgisi ve ileri dijital teknolojiler gibi temel operasyonlarda geliştirilen kurum içi kaynakların varlığı. (-)
- >>YG12 Teşvik paketleri ve kriz kurtarma planlarının etkilerini en üst düzeye çıkarmak için hükümetlerle işbirliği yapılması. (-)
- >>YG13 Siyasi istikrarsızlık, ekonomik dalgalanma, yakın coğrafyamızdaki savaşlar, göçmen krizleri, iklim değişikliği kaynaklı doğal afetler, yoksulluk, su ve gıda kıtlığı gibi küresel ve toplumsal zorluklarla daha iyi mücadele etmek için iş modellerini dönüştürebilmek amacıyla yeni teknolojiler edinilmesi. (-)

S04 Hammadde Temini: Hayati önem taşıyan malzemelerin eksikliği durumunda operasyonları yeni bir üretim türüne adapte edebilmek.

- >>YG01 Teknolojik yeniliklerin takip edilmesi, erken benimsenmesi ve uygulanması. (-)
- >>YG02 Otonom, çevik ve proaktif hiper-bağılantılı bir üretim ekosistemi geliştirmek için eklemeli üretim, artırılmış gerçeklik, CPS, bilişsel/otonom robotlar, dijital ikiz, gömülü IoT, uç bilişim ve akıllı sensörlerin kullanılması. (-)
- >>YG03 İnsansız deniz araçlarının; istihbarat, gözetleme, keşif devriyesi ve kıyı limanı savunma gibi görevlerini yerine getirmek için aktif bir veri/iletişim bağlantısına sahip olması. (-)
- >>YG04 Çalışanlara, değişimlere hızlı adapte olmalarını sağlayacak esnek ve uyarlanabilir çalışma mantığının kazandırılması. (-)
- >>YG05 Deniz aracı siparişi veren kurumsal ya da bireysel müşterilerin zamanla güncellenen ve özelleşen gereksinimlerine (teslim tarihi, ürün kalitesi vb.) hızlı yanıt verilebilmesi. (-)
- >>YG06 Maliyet hedef ve amaçlarının belirlenmesi, kesinleştirilmesi ve bunlara ulaşılması. (-)
- >>YG07 Liderin duyarlılığı. (-)
- >>YG08 Sürekli öğrenme ve eğitim. (-)
- >>YG09 Çalışanların işbirliği. (-)
- >>YG10 Açık, şeffaf iletişim ve bilgi paylaşımı. (-)
- >>YG11 Değişimlere hızlı adapte olabilmek için süreç bilgisi ve ileri dijital teknolojiler gibi temel operasyonlarda geliştirilen kurum içi kaynakların varlığı. (-)
- >>YG12 Teşvik paketleri ve kriz kurtarma planlarının etkilerini en üst düzeye çıkarmak için hükümetlerle işbirliği yapılması. (-)
- >>YG13 Siyasi istikrarsızlık, ekonomik dalgalanma, yakın coğrafyamızdaki savaşlar, göçmen krizleri, iklim değişikliği kaynaklı doğal afetler, yoksulluk, su ve gıda kıtlığı gibi küresel ve toplumsal zorluklarla daha iyi mücadele etmek için iş modellerini dönüştürebilmek amacıyla yeni teknolojiler edinilmesi. (-)

S05 Müşteri Memnuniyeti: Üretim ve teslimat süresini kısaltmak, ürün geliştirme döngüsünü azaltmak, sipariş doğruluğunu artırmak ve müşteri iletişimini ve memnuniyetini iyileştirmek için dahili ve işbirliğine dayalı operasyonlarını yeniden düzenleme yeteneğine sahip olmak.

- >>YG01 Teknolojik yeniliklerin takip edilmesi, erken benimsenmesi ve uygulanması. (-)
- >>YG02 Otonom, çevik ve proaktif hiper-bağılantılı bir üretim ekosistemi geliştirmek için eklemeli üretim, artırılmış gerçeklik, CPS, bilişsel/otonom robotlar, dijital ikiz, gömülü IoT, uç bilişim ve akıllı sensörlerin kullanılması. (-)
- >>YG03 İnsansız deniz araçlarının; istihbarat, gözetleme, keşif devriyesi ve kıyı limanı savunma gibi görevlerini yerine getirmek için aktif bir veri/iletişim bağlantısına sahip olması. (-)
- >>YG04 Çalışanlara, değişimlere hızlı adapte olmalarını sağlayacak esnek ve uyarlanabilir çalışma mantığının kazandırılması. (-)
- >>YG05 Deniz aracı siparişi veren kurumsal ya da bireysel müşterilerin zamanla güncellenen ve özelleşen gereksinimlerine (teslim tarihi, ürün kalitesi vb.) hızlı yanıt verilebilmesi. (-)
- >>YG06 Maliyet hedef ve amaçlarının belirlenmesi, kesinleştirilmesi ve bunlara ulaşılması. (-)
- >>YG07 Liderin duyarlılığı. (-)
- >>YG08 Sürekli öğrenme ve eğitim. (-)
- >>YG09 Çalışanların işbirliği. (-)
- >>YG10 Açık, şeffaf iletişim ve bilgi paylaşımı. (-)
- >>YG11 Değişimlere hızlı adapte olabilmek için süreç bilgisi ve ileri dijital teknolojiler gibi temel operasyonlarda geliştirilen kurum içi kaynakların varlığı. (-)
- >>YG12 Teşvik paketleri ve kriz kurtarma planlarının etkilerini en üst düzeye çıkarmak için hükümetlerle işbirliği yapılması. (-)
- >>YG13 Siyasi istikrarsızlık, ekonomik dalgalanma, yakın coğrafyamızdaki savaşlar, göçmen krizleri, iklim değişikliği kaynaklı doğal afetler, yoksulluk, su ve gıda kıtlığı gibi küresel ve toplumsal zorluklarla daha iyi mücadele etmek için iş modellerini dönüştürebilmek amacıyla yeni teknolojiler edinilmesi. (-)

S06 Çalışan Yetkinliği: Değer yaratmak ve rekabet avantajı oluşturmak için yeni süreçleri öğrenme, uyarlama, uygulama ve rol ve sorumlulukları genişletme becerilerine sahip insan kaynağı oluşturmak.

- >>YG01 Teknolojik yeniliklerin takip edilmesi, erken benimsenmesi ve uygulanması. (-)
- >>YG02 Otonom, çevik ve proaktif hiper-bağılantılı bir üretim ekosistemi geliştirmek için eklemeli üretim, artırılmış gerçeklik, CPS, bilişsel/otonom robotlar, dijital ikiz, gömülü IoT, uç bilişim ve akıllı sensörlerin kullanılması. (-)
- >>YG03 İnsansız deniz araçlarının; istihbarat, gözetleme, keşif devriyesi ve kıyı limanı savunma gibi görevlerini yerine getirmek için aktif bir veri/iletişim bağlantısına sahip olması. (-)
- >>YG04 Çalışanlara, değişimlere hızlı adapte olmalarını sağlayacak esnek ve uyarlanabilir çalışma mantığının kazandırılması. (-)
- >>YG05 Deniz aracı siparişi veren kurumsal ya da bireysel müşterilerin zamanla güncellenen ve özelleşen gereksinimlerine (teslim tarihi, ürün kalitesi vb.) hızlı yanıt verilebilmesi. (-)
- >>YG06 Maliyet hedef ve amaçlarının belirlenmesi, kesinleştirilmesi ve bunlara ulaşılması. (-)
- >>YG07 Liderin duyarlılığı. (-)
- >>YG08 Sürekli öğrenme ve eğitim. (-)
- >>YG09 Çalışanların işbirliği. (-)
- >>YG10 Açık, şeffaf iletişim ve bilgi paylaşımı. (-)
- >>YG11 Değişimlere hızlı adapte olabilmek için süreç bilgisi ve ileri dijital teknolojiler gibi temel operasyonlarda geliştirilen kurum içi kaynakların varlığı. (-)
- >>YG12 Teşvik paketleri ve kriz kurtarma planlarının etkilerini en üst düzeye çıkarmak için hükümetlerle işbirliği yapılması. (-)
- >>YG13 Siyasi istikrarsızlık, ekonomik dalgalanma, yakın coğrafyamızdaki savaşlar, göçmen krizleri, iklim değişikliği

kaynaklı doğal afetler, yoksulluk, su ve gıda kıtlığı gibi küresel ve toplumsal zorluklarla daha iyi mücadele etmek için iş modellerini dönüştürebilmek amacıyla yeni teknolojiler edinilmesi. (-)

S07 Rekabet Avantajı: Endüstri 4.0 uygulamaları sayesinde üretim sistemlerini geliştirerek maliyet liderliği elde etmek ve rekabet avantajı kazanmak.

- >>>YG01 Teknolojik yeniliklerin takip edilmesi, erken benimsenmesi ve uygulanması. (-)
- >>>YG02 Otonom, çevik ve proaktif hiper-bağımlı bir üretim ekosistemi geliştirmek için eklemeli üretim, artırılmış gerçeklik, CPS, bilişsel/otonom robotlar, dijital ikiz, gömülü IoT, uç bilişim ve akıllı sensörlerin kullanılması. (-)
- >>>YG03 İnsansız deniz araçlarının; istihbarat, gözetleme, keşif devriyesi ve kıyı limanı savunma gibi görevlerini yerine getirmek için aktif bir veri/iletişim bağlantısına sahip olması. (-)
- >>>YG04 Çalışanlara, değişimlere hızlı adapte olmalarını sağlayacak esnek ve uyarlanabilir çalışma mantığının kazandırılması. (-)
- >>>YG05 Deniz aracı siparişi veren kurumsal ya da bireysel müşterilerin zamanla güncellenen ve özelleşen gereksinimlerine (teslim tarihi, ürün kalitesi vb.) hızlı yanıt verilebilmesi. (-)
- >>>YG06 Maliyet hedef ve amaçlarının belirlenmesi, kesinleştirilmesi ve bunlara ulaşılması. (-)
- >>>YG07 Liderin duyarlılığı. (-)
- >>>YG08 Sürekli öğrenme ve eğitim. (-)
- >>>YG09 Çalışanların işbirliği. (-)
- >>>YG10 Açık, şeffaf iletişim ve bilgi paylaşımı. (-)
- >>>YG11 Değişimlere hızla adapte olabilmek için süreç bilgisi ve ileri dijital teknolojiler gibi temel operasyonlarda geliştirilen kurum içi kaynakların varlığı. (-)
- >>>YG12 Teşvik paketleri ve kriz kurtarma planlarının etkilerini en üst düzeye çıkarmak için hükümetlerle işbirliği yapılması. (-)
- >>>YG13 Siyasi istikrarsızlık, ekonomik dalgalanma, yakın coğrafyamızdaki savaşlar, göçmen krizleri, iklim değişikliği kaynaklı doğal afetler, yoksulluk, su ve gıda kıtlığı gibi küresel ve toplumsal zorluklarla daha iyi mücadele etmek için iş modellerini dönüştürebilmek amacıyla yeni teknolojiler edinilmesi. (-)

S08 Risk Yönetimi: Tüketici talebi tahminlerinde artan belirsizlik, paydaşlar arası bilgi aktarımındaki gecikmeler ve çarpıklıklar gibi beklenmedik risklere yanıt veren uygun bir üretim sistemi oluşturmak.

- >>>YG01 Teknolojik yeniliklerin takip edilmesi, erken benimsenmesi ve uygulanması. (-)
- >>>YG02 Otonom, çevik ve proaktif hiper-bağımlı bir üretim ekosistemi geliştirmek için eklemeli üretim, artırılmış gerçeklik, CPS, bilişsel/otonom robotlar, dijital ikiz, gömülü IoT, uç bilişim ve akıllı sensörlerin kullanılması. (-)
- >>>YG03 İnsansız deniz araçlarının; istihbarat, gözetleme, keşif devriyesi ve kıyı limanı savunma gibi görevlerini yerine getirmek için aktif bir veri/iletişim bağlantısına sahip olması. (-)
- >>>YG04 Çalışanlara, değişimlere hızlı adapte olmalarını sağlayacak esnek ve uyarlanabilir çalışma mantığının kazandırılması. (-)
- >>>YG05 Deniz aracı siparişi veren kurumsal ya da bireysel müşterilerin zamanla güncellenen ve özelleşen gereksinimlerine (teslim tarihi, ürün kalitesi vb.) hızlı yanıt verilebilmesi. (-)
- >>>YG06 Maliyet hedef ve amaçlarının belirlenmesi, kesinleştirilmesi ve bunlara ulaşılması. (-)
- >>>YG07 Liderin duyarlılığı. (-)
- >>>YG08 Sürekli öğrenme ve eğitim. (-)
- >>>YG09 Çalışanların işbirliği. (-)
- >>>YG10 Açık, şeffaf iletişim ve bilgi paylaşımı. (-)
- >>>YG11 Değişimlere hızla adapte olabilmek için süreç bilgisi ve ileri dijital teknolojiler gibi temel operasyonlarda geliştirilen kurum içi kaynakların varlığı. (-)
- >>>YG12 Teşvik paketleri ve kriz kurtarma planlarının etkilerini en üst düzeye çıkarmak için hükümetlerle işbirliği yapılması. (-)
- >>>YG13 Siyasi istikrarsızlık, ekonomik dalgalanma, yakın coğrafyamızdaki savaşlar, göçmen krizleri, iklim değişikliği kaynaklı doğal afetler, yoksulluk, su ve gıda kıtlığı gibi küresel ve toplumsal zorluklarla daha iyi mücadele etmek için iş modellerini dönüştürebilmek amacıyla yeni teknolojiler edinilmesi. (-)

S09 Dayanıklılık: Organizasyona ve çalışanlara belirsizliklerle başa çıkma ve bu belirsizliklerden kurtulma konusunda çeşitli beceriler kazandırmak.

- >>>YG01 Teknolojik yeniliklerin takip edilmesi, erken benimsenmesi ve uygulanması. (-)
- >>>YG02 Otonom, çevik ve proaktif hiper-bağımlı bir üretim ekosistemi geliştirmek için eklemeli üretim, artırılmış gerçeklik, CPS, bilişsel/otonom robotlar, dijital ikiz, gömülü IoT, uç bilişim ve akıllı sensörlerin kullanılması. (-)
- >>>YG03 İnsansız deniz araçlarının; istihbarat, gözetleme, keşif devriyesi ve kıyı limanı savunma gibi görevlerini yerine getirmek için aktif bir veri/iletişim bağlantısına sahip olması. (-)
- >>>YG04 Çalışanlara, değişimlere hızlı adapte olmalarını sağlayacak esnek ve uyarlanabilir çalışma mantığının kazandırılması. (-)
- >>>YG05 Deniz aracı siparişi veren kurumsal ya da bireysel müşterilerin zamanla güncellenen ve özelleşen gereksinimlerine (teslim tarihi, ürün kalitesi vb.) hızlı yanıt verilebilmesi. (-)
- >>>YG06 Maliyet hedef ve amaçlarının belirlenmesi, kesinleştirilmesi ve bunlara ulaşılması. (-)
- >>>YG07 Liderin duyarlılığı. (-)
- >>>YG08 Sürekli öğrenme ve eğitim. (-)
- >>>YG09 Çalışanların işbirliği. (-)
- >>>YG10 Açık, şeffaf iletişim ve bilgi paylaşımı. (-)
- >>>YG11 Değişimlere hızla adapte olabilmek için süreç bilgisi ve ileri dijital teknolojiler gibi temel operasyonlarda geliştirilen kurum içi kaynakların varlığı. (-)
- >>>YG12 Teşvik paketleri ve kriz kurtarma planlarının etkilerini en üst düzeye çıkarmak için hükümetlerle işbirliği yapılması. (-)
- >>>YG13 Siyasi istikrarsızlık, ekonomik dalgalanma, yakın coğrafyamızdaki savaşlar, göçmen krizleri, iklim değişikliği kaynaklı doğal afetler, yoksulluk, su ve gıda kıtlığı gibi küresel ve toplumsal zorluklarla daha iyi mücadele etmek için iş modellerini dönüştürebilmek amacıyla yeni teknolojiler edinilmesi. (-)

S10 Ekonomik Etkililik: Ekonomik gerileme dönemlerinde iş gücünü yavaşlatmadan firma harcamaları üzerinde mutlak kontrol ve görünürlük sağlamak.

- >>>YG01 Teknolojik yeniliklerin takip edilmesi, erken benimsenmesi ve uygulanması. (-)
- >>>YG02 Otonom, çevik ve proaktif hiper-bağımlı bir üretim ekosistemi geliştirmek için eklemeli üretim, artırılmış gerçeklik, CPS, bilişsel/otonom robotlar, dijital ikiz, gömülü IoT, uç bilişim ve akıllı sensörlerin kullanılması. (-)

- >>YG03 İnsansız deniz araçlarının; istihbarat, gözetleme, keşif devriyesi ve kıyı limanı savunma gibi görevlerini yerine getirmek için aktif bir veri/iletişim bağlantısına sahip olması. (-)
- >>YG04 Çalışanlara, değişimlere hızlı adapte olmalarını sağlayacak esnek ve uyarlanabilir çalışma mantığının kazandırılması. (-)
- >>YG05 Deniz aracı siparişi veren kurumsal ya da bireysel müşterilerin zamanla güncellenen ve özelleşen gereksinimlerine (teslim tarihi, ürün kalitesi vb.) hızlı yanıt verilebilmesi. (-)
- >>YG06 Maliyet hedef ve amaçlarının belirlenmesi, kesinleştirilmesi ve bunlara ulaşılması. (-)
- >>YG07 Liderin duyarlılığı. (-)
- >>YG08 Sürekli öğrenme ve eğitim. (-)
- >>YG09 Çalışanların işbirliği. (-)
- >>YG10 Açık, şeffaf iletişim ve bilgi paylaşımı. (-)
- >>YG11 Değişimlere hızla adapte olabilmek için süreç bilgisi ve ileri dijital teknolojiler gibi temel operasyonlarda geliştirilen kurum içi kaynakların varlığı. (-)
- >>YG12 Teşvik paketleri ve kriz kurtarma planlarının etkilerini en üst düzeye çıkarmak için hükümetlerle işbirliği yapılması. (-)
- >>YG13 Siyasi istikrarsızlık, ekonomik dalgalanma, yakın coğrafyamızdaki savaşlar, göçmen krizleri, iklim değişikliği kaynaklı doğal afetler, yoksulluk, su ve gıda kıtlığı gibi küresel ve toplumsal zorluklarla daha iyi mücadele etmek için iş modellerini dönüştürebilmek amacıyla yeni teknolojiler edinilmesi. (-)

S11 Düşük Gecikme Süresi: Herhangi bir üretim yapılandırmasında gecikmeleri ve bu gecikmelerden kaynaklı iş yükünü minimize etmek.

- >>YG01 Teknolojik yeniliklerin takip edilmesi, erken benimsenmesi ve uygulanması. (-)
- >>YG02 Otonom, çevik ve proaktif hiper-bağlantılı bir üretim ekosistemi geliştirmek için eklemeli üretim, artırılmış gerçeklik, CPS, bilişsel/otonom robotlar, dijital ikiz, gömülü IoT, uç bilişim ve akıllı sensörlerin kullanılması. (-)
- >>YG03 İnsansız deniz araçlarının; istihbarat, gözetleme, keşif devriyesi ve kıyı limanı savunma gibi görevlerini yerine getirmek için aktif bir veri/iletişim bağlantısına sahip olması. (-)
- >>YG04 Çalışanlara, değişimlere hızlı adapte olmalarını sağlayacak esnek ve uyarlanabilir çalışma mantığının kazandırılması. (-)
- >>YG05 Deniz aracı siparişi veren kurumsal ya da bireysel müşterilerin zamanla güncellenen ve özelleşen gereksinimlerine (teslim tarihi, ürün kalitesi vb.) hızlı yanıt verilebilmesi. (-)
- >>YG06 Maliyet hedef ve amaçlarının belirlenmesi, kesinleştirilmesi ve bunlara ulaşılması. (-)
- >>YG07 Liderin duyarlılığı. (-)
- >>YG08 Sürekli öğrenme ve eğitim. (-)
- >>YG09 Çalışanların işbirliği. (-)
- >>YG10 Açık, şeffaf iletişim ve bilgi paylaşımı. (-)
- >>YG11 Değişimlere hızla adapte olabilmek için süreç bilgisi ve ileri dijital teknolojiler gibi temel operasyonlarda geliştirilen kurum içi kaynakların varlığı. (-)
- >>YG12 Teşvik paketleri ve kriz kurtarma planlarının etkilerini en üst düzeye çıkarmak için hükümetlerle işbirliği yapılması. (-)
- >>YG13 Siyasi istikrarsızlık, ekonomik dalgalanma, yakın coğrafyamızdaki savaşlar, göçmen krizleri, iklim değişikliği kaynaklı doğal afetler, yoksulluk, su ve gıda kıtlığı gibi küresel ve toplumsal zorluklarla daha iyi mücadele etmek için iş modellerini dönüştürebilmek amacıyla yeni teknolojiler edinilmesi. (-)

S12 Üretim Sistemi: Çevik bir üretim sistemi kurarak, sosyo-politik değişimlerden doğal afetlere veya ekonomik krizlere kadar çeşitli nedenlerden kaynaklanan olası kesintilerden tamamen kaçınmak için çevreyi sürekli izlemek; bu kesintilerin olası etkilerinden kurtulmak için kendini en uygun şekilde yeniden yapılandırabilmek; kesinti yaşandıktan sonra optimum operasyonel performansı hızlı bir şekilde sağlamak; böylece kesintilerin etkisini proaktif olarak en aza indirebilmek.

- >>YG01 Teknolojik yeniliklerin takip edilmesi, erken benimsenmesi ve uygulanması. (-)
- >>YG02 Otonom, çevik ve proaktif hiper-bağlantılı bir üretim ekosistemi geliştirmek için eklemeli üretim, artırılmış gerçeklik, CPS, bilişsel/otonom robotlar, dijital ikiz, gömülü IoT, uç bilişim ve akıllı sensörlerin kullanılması. (-)
- >>YG03 İnsansız deniz araçlarının; istihbarat, gözetleme, keşif devriyesi ve kıyı limanı savunma gibi görevlerini yerine getirmek için aktif bir veri/iletişim bağlantısına sahip olması. (-)
- >>YG04 Çalışanlara, değişimlere hızlı adapte olmalarını sağlayacak esnek ve uyarlanabilir çalışma mantığının kazandırılması. (-)
- >>YG05 Deniz aracı siparişi veren kurumsal ya da bireysel müşterilerin zamanla güncellenen ve özelleşen gereksinimlerine (teslim tarihi, ürün kalitesi vb.) hızlı yanıt verilebilmesi. (-)
- >>YG06 Maliyet hedef ve amaçlarının belirlenmesi, kesinleştirilmesi ve bunlara ulaşılması. (-)
- >>YG07 Liderin duyarlılığı. (-)
- >>YG08 Sürekli öğrenme ve eğitim. (-)
- >>YG09 Çalışanların işbirliği. (-)
- >>YG10 Açık, şeffaf iletişim ve bilgi paylaşımı. (-)
- >>YG11 Değişimlere hızla adapte olabilmek için süreç bilgisi ve ileri dijital teknolojiler gibi temel operasyonlarda geliştirilen kurum içi kaynakların varlığı. (-)
- >>YG12 Teşvik paketleri ve kriz kurtarma planlarının etkilerini en üst düzeye çıkarmak için hükümetlerle işbirliği yapılması. (-)
- >>YG13 Siyasi istikrarsızlık, ekonomik dalgalanma, yakın coğrafyamızdaki savaşlar, göçmen krizleri, iklim değişikliği kaynaklı doğal afetler, yoksulluk, su ve gıda kıtlığı gibi küresel ve toplumsal zorluklarla daha iyi mücadele etmek için iş modellerini dönüştürebilmek amacıyla yeni teknolojiler edinilmesi. (-)

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve SOYADI	Gül EKŞİ
EĞİTİM DURUMU	
Lise	Aldemir Atilla Konuk Anadolu Lisesi
Lisans	Hacettepe Üniversitesi, İİBF, İşletme (İngilizce) (2011-2016)
Yüksek Lisans	Hacettepe Üniversitesi, SBE, Üretim Yönetimi ve Sayısal Yöntemler (2016-2019)
Tez Konusu	Temiz Üretim Uygulamaları: Antalya Organize Sanayi Bölgesi'nde ISO 14001 Çevre Yönetim Sistemi Uygulayan Firmalar Üzerine Bir Araştırma
Doktora	Akdeniz Üniversitesi, SBE, İşletme (2020-2025)
Tez Konusu	Çevik Üretim: İnsansız Deniz Araçları Üzerine Endüstri 4.0 ve Sürdürülebilirlik Perspektifinden Bir Uygulama
Yabancı Dil / Diller	İngilizce
İŞ DENEYİMİ	
Nisan 2021-...	Antalya Bilim Üniversitesi, Araştırma Görevlisi (Antalya)
Haziran 2017-Eylül 2017	Avantgarde Resort Hotel Göynük, Rezervasyon Elemanı (Antalya)
Haziran 2015-Ağustos 2015	Finansbank A Ş, Stajyer (Antalya)
Temmuz 2013-Eylül 2013	Akay Turizm / Lancora Beach Hotel & Dragos Beach Hotel, Resepsiyonist (Antalya)
Haziran 2009-Ağustos 2009	Club Palm Beach, Resepsiyonist (Antalya)
YAYINLAR	
Ekşi, G. (2025). Endüstri 4.0'ın uygulanmasında örgütsel öğrenme ve özümseme kapasitesinin etkisi üzerine bir değerlendirme. Bitlis Eren Sosyal Araştırmalar Dergisi. Ekşi, G., ve Nasırcılar, Ö. (2024). Sosyal Bilimler Öğrencilerine Yönelik Dijital Eğitim Olanakları ve Sanal Gerçeklik Uygulamaları. Antalya Bilim Üniversitesi Uluslararası Sosyal Bilimler Dergisi, 5(1), 5-13. Ekşi, G. (2024, Nisan). Dijital dönüşümde teknoloji yeterli mi? Endüstri 4.0'ın uygulanmasında örgütsel öğrenme ve özümseme kapasitesinin etkisi üzerine bir değerlendirme [Sözlü bildiri sunumu]. Prof. Dr. Hasan Işın Dener Bilim Sempozyumu, Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi & Anatolia Turizm Akademisi, Ankara, Türkiye. Ekşi, G. (2022). 360 derece performans değerlendirme sistemi hakkında kavramsal bir inceleme. Süleyman Demirel Üniversitesi Vizyoner Dergisi, 13(36), 1407-1428. Ekşi, G., ve Ömürgönülşen, M. (2020). Temiz üretim uygulamaları: Antalya Organize Sanayi Bölgesi'nde ISO 14001 ÇYS uygulayan firmalar üzerine bir araştırma. Verimlilik Dergisi, (2), 7-44.	