

SÜRDÜRÜLEBİLİR TEDARİK ZİNCİRİ YÖNETİMİNDE YAPAY ZEKÂ VE DİJİTAL DÖNÜŞÜM



EDİTOR:
Dr. Öğr. Üyesi Gökhan EĞİLMEZ



SÜRDÜRÜLEBİLİR
TEDARİK ZİNCİRİ YÖNETİMİNDE
YAPAY ZEKÂ VE
DİJİTAL DÖNÜŞÜM

Editör. Dr. Öğr. Üyesi Gökhan EĞİLMEZ



Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Yönetiminde Yapay Zekâ ve Dijital Dönüşüm
Editör: Dr. Öğr. Üyesi Gökhan EĞİLMEZ

Genel Yayın Yönetmeni: Berkan Balpetek
Kapak ve Sayfa Tasarımı: Gökhan EĞİLMEZ
Baskı: Aralık 2025
Yayıncı Sertifika No: 49837
ISBN: 978-625-8572-02-5

© Duvar Yayınları
853 Sokak No:13 P.10 Kemeraltı-Konak/İzmir
Tel: 0 232 484 88 68

www.duvar yayinlari.com
duvarkitabevi@gmail.com

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir. Yayınevi ve editörler sorumlu tutulamaz.

ÖNSÖZ

Küresel belirsizlikler, iklim değışikliğı, kaynak kıtlığı ve hızlanan teknolojik dönüşüm, tedarik zinciri yönetimini yalnızca operasyonel verimlilik odağında ele almayı yetersiz kılmaktadır. Günümüzde tedarik zincirleri; çevresel, sosyal ve yönetim boyutlarını kapsayan, dijital yetkinliklerle desteklenen çok boyutlu stratejik yapılar hâline gelmiştir. Bu bağlamda yapay zekâ, büyük veri, nesnelerin interneti, blokzincir ve dijital ikizler gibi ileri teknolojiler, sürdürülebilir tedarik zincirlerinin tasarım ve yönetiminde belirleyici araçlar olarak öne çıkmaktadır.

Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Yönetiminde Yapay Zekâ ve Dijital Dönüşüm: Kuramsal Yaklaşımlar ve Uygulamalı Modeller başlıklı bu eser, söz konusu dönüşümü kuramsal ve uygulamalı boyutlarıyla ele almayı amaçlamaktadır. Kitap, sürdürülebilir tedarik zinciri yönetiminin teorik temellerini ortaya koyarken; dijital dönüşüm ve yapay zekâ uygulamalarının tedarik zinciri süreçlerine etkilerini bütüncül ve disiplinlerarası bir çerçevede incelemektedir.

Eserde yer alan bölümler; tedarik zinciri dayanıklılığı, performans yönetimi, e-ticaret lojistiğı, son kilometre dağıtımı, akıllı depolama sistemleri ve otonom lojistik uygulamaları gibi güncel temaları kapsamaktadır. Ayrıca ESG çerçevesi, döngüsel ekonomi yaklaşımı, karbon emisyonlarının azaltılması ve veri temelli karar destek sistemleri analitik bir bakış açısıyla ele alınmaktadır.

Bu kitap; akademisyenler, lisansüstü öğrenciler, araştırmacılar ve sektör uygulayıcıları için sürdürülebilir ve dijital tedarik zincirleri alanında önemli bir başvuru kaynağı olmayı hedeflemektedir. Eserin ortaya çıkmasında katkı sunan tüm yazarlara ve emeğı geçen paydaşlara teşekkür eder; çalışmanın ilgili literatüre ve uygulamaya değerli katkılar sağlamasını temenni ederiz.

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1	1
SÜRDÜRÜLEBİLİR TEDARİK ZİNCİRİ YÖNETİMİ:	
KAVRAMSAL ÇERÇEVE, İLKELER VE KÜRESEL	
EĞİLİMLER	1
Doç.Dr. Yunus KAYMAZ	1
BÖLÜM 2.....	23
YAPAY ZEKÂ VE DİJİTAL DÖNÜŞÜMÜN TEDARİK	
ZİNCİRLERİNE ETKİSİ: TEKNOLOJİK TEMELLER VE	
SİSTEMATİK BİR YAKLAŞIM	23
Dr. Öğr. Üyesi Rukiye TEKİN ÜNVER.....	23
Dr. Öğr. Üyesi Muharrem ÜNVER	23
BÖLÜM 3	45
DİJİTAL ÇAĞDA TEDARİK ZİNCİRİ DİRENÇLİLİĞİ VE	
ESNEKLİĞİ: YAPAY ZEKÂ DESTEKLİ MODELLER VE	
STRATEJİLER	45
Dr. Öğr. Üyesi Biray KOÇAK	45
BÖLÜM 4.....	73
E-TİCARET LOJİSTİĞİ, SON KİLOMETRE DAĞITIMI VE	
DİJİTAL İŞ MODELLERİ	73
Dr. Öğr. Üyesi Gökhan EĞİLMEZ	73
BÖLÜM 5	109

AKILLI DEPOLAMA SİSTEMLERİ VE OTONOM LOJİSTİK: DİJİTALLEŞEN DEPOLARDA VERİMLİLİK VE ENERJİ YÖNETİMİ	109
Dr. Öğr. Üyesi Muharrem ÜNVER.....	109
BÖLÜM 6.....	130
SEVKİYAT VE DAĞITIM PLANLAMASINDA YAPAY ZEKÂ TABANLI OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ, ROTA OPTİMİZASYONU, ÇOK KRİTERLİ KARAR MODELLERİ, KARBON EMİSYONU MİNİMİZE EDEN ALGORİTMALAR	130
Dr. Burçin PAÇACI	130
BÖLÜM 7	145
TEDARİK ZİNCİRİ PERFORMANS YÖNETİMİ: DİJİTAL KPI'LAR, ANALİTİK RAPORLAMA VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ÖLÇÜTLERİ	145
Doç. Dr. Emre BİLGİN SARI	145
BÖLÜM 8	174
GELECEĞİN SÜRDÜRÜLEBİLİR VE AKILLI TEDARİK ZİNCİRİ: OTONOMİ, DİJİTAL İKİZLER, E-MOBİLİTE VE YENİLİKÇİ İŞ MODELLERİ	174
Dr. Burcu SAKIZ	174

BÖLÜM 1

SÜRDÜRÜLEBİLİR TEDARİK ZİNCİRİ YÖNETİMİ: KAVRAMSAL ÇERÇEVE, İLKELER VE KÜRESEL EĞİLİMLER

Doç.Dr. Yunus KAYMAZ¹

¹ İskenderun Teknik Üniversitesi, İşletme ve Yönetim Bilimleri Fakültesi, Lojistik Yönetimi Bölümü, Hatay, İskenderun, Türkiye. yunus.kaymaz@iste.edu.tr.com, orcid id: 0000-0001-7557-7179

1. GİRİŞ

Küresel rekabet yapılarındaki değişim ve buna bağlı olarak ortaya çıkan paradigmal değişimlerin yaşandığı son yıllarda, toplumların sadece üretim anlamında değil aynı zamanda sosyal yapı anlamında da evrildiğini görmekteyiz. Bu noktada 21. yüzyılın rekabet yapısındaki değişim, makro anlamda devletleri ve toplumları, mikro anlamda ise işletmeleri geleneksel kâr maksimizasyonu hedefinin ötesine geçerek, değer yaratma süreçlerini daha bütüncül bir perspektifle yeniden kurgulamaya zorlamaktadır.

I. Sanayi Devrimi'nden bu yana başat paradigma olan doğrusal ekonomi yapısındaki “al-üret-at” modeli doğal kaynakların hızla tükenmesi, iklim değişikliği krizleri ve artan sosyal eşitsizlikler karşısında sürdürülebilirliğini yitirmiştir (Goyal vd., 2018). Bu kapsamda, üretim sistemlerindeki kavramsal değişikliklerin bir benzerini tedarik zinciri sistemlerinde de görmekteyiz. Lojistik yönetimindeki maliyet minimizasyonu ve hızlı teslimat gibi fonksiyonların daha bütüncül bir yapı olan tedarik zinciri kavramı içinde ele alınarak çevresel, sosyal ve ekonomik boyutların stratejik bir yapı içinde yönetildiği Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Yönetimi (STZY) paradigmasının tartışıldığı bir yapıyı görmekteyiz. Bu dönüşümün merkezinde yer alan STZY, değer zinciri boyunca ekonomik sürdürülebilirlik, çevresel sorumluluk ve sosyal refahı bütüncül bir çerçevede ele alan stratejik bir yaklaşım olarak karşımıza çıkmaktadır.

Artan yasal düzenlemeler, uluslararası ticaretin şeffaflık gereksinimleri, karbon ayak izini azaltmaya yönelik küresel politikalar, tüketici bilincinin güçlenmesi ve paydaş baskıları, firmaları sürdürülebilirlik odaklı tedarik zincirlerine yatırım yapmaya zorlayan temel unsurlar hâline gelmiştir. Avrupa Birliği Yeşil Mutabakatı, karbon sınır düzenleme mekanizmaları, döngüsel ekonomi prensipleri ve sürdürülebilir üretim standartları bu dönüşümü daha da hızlandırmaktadır. Aynı zamanda, dijitalleşme ile Endüstri 4.0 gibi kavramların ve bu kavramlarla ilintili olan teknolojilerin sunduğu veri odaklı karar destek mekanizmaları, sürdürülebilir tedarik zincirlerinin tasarım ve yönetim süreçlerini büyük ölçüde dönüştürmektedir.

Sürdürülebilir tedarik zincirleri, “Üçlü Performans/Sorumluluk/Başarım” olarak da adlandırılan Triple Bottom Line

kavramı içerisinde yer alan ekonomik performansın yanında çevresel ve sosyal adalet kavramlarının da bilgi, malzeme ve sermaye akışının yönetilme süreci içinde yer almasını gerektirmektedir.

Küreselleşme ile tedarik ağlarının coğrafi olarak genişlemesi ve karmaşıklaşması, risk yönetimini de STZY'nin merkezine yerleştirmiştir. Tedarikçi tarafındaki etik ihlallerden kaynaklanan krizlerin, marka itibarı üzerinde yarattığı yıkıcı etkiler, işletmeleri tedarik zincirlerinin şeffaflığını ve izlenebilirliğini artırmaya yönelmektedir. Dolayısıyla, sürdürülebilirlik kavramı, operasyonel verimliliğin ötesinde, kurumsal yönetim ve risk minimizasyonu açısından kritik bir stratejik araç olarak konumlanmaktadır.

Bu bölümün temel amacı, sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimine çok boyutlu bir bakış açısı getirmektir. Öncelikle konunun teorik zeminini sağlamlaştıran kavramsal çerçeve üzerinde durulacaktır. Devamında, işleyen bir sürdürülebilir sistemin temel bileşenleri olan şeffaflık, eko-verimlilik ve iş birliği dinamikleri tartışmaya açılacaktır. Son olarak; dijitalleşme, döngüsel ekonomi ve Yeşil Mutabakat gibi zorlayıcı küresel faktörlerin etkisiyle şekillenen yeni dönem analiz edilerek, tedarik zincirlerinin gelecekteki mimarisine yönelik öngörüler paylaşılabilecektir.

2. TEORİK TEMELLER VE KAVRAMSAL YAKLAŞIMLAR

Bu bölümde sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi kavramının temellerini oluşturacak kavramsal yaklaşımlar üzerinde durulmuştur. Literatürde bu kavramın temellendirilmesinde kullanılan pek çok yaklaşımın üzerinde durulmuş ve bu kapsamda incelemeler yapılmıştır.

2.1. Doğal Kaynak Tabanlı Görüş (NRBV)

Hart (1995)'ın kaynak temelli görüşü doğal çevre boyutunu içerecek şekilde genişlettiği doğal kaynak tabanlı görüş (NRBV), firmaların rekabet avantajını çevresel yetkinlikler, kirlilik önleme, ürün-süreç yeniliği ve sürdürülebilir kaynak yönetimi gibi alanlarda geliştirdiği kapasitelere bağlamaktadır. Kleindorfer vd. (2005), doğal kaynakların etkin kullanımının, operasyon yönetiminde sürdürülebilirlik ve ekonomik performans arasında kazan-kazan ilişkileri oluşturabileceğini belirtmişlerdir.

Li vd. (2025), sürdürülebilir süreç yönetimi kapasitesinin, çevresel ve ekonomik performans üzerinde pozitif etkisi olduğunu çalışmalarında belirtmişler ve NRBV'nin STZY bağlamında temel bir açıklayıcı çerçeve olduğunun altını çizmişlerdir.

2.2. Paydaş Teorisi (Stakeholder Theory)

Paydaş Teorisi, işletmelerin kararlarının yalnızca hissedarların değil, müşteriler, çalışanlar, tedarikçiler, yerel toplum, sivil toplum kuruluşları ve regülatörler gibi geniş bir paydaş setinin beklentileri doğrultusunda şekillendiğini savunur. Mitchell vd. (1997), paydaş önemliliği kavramıyla, hangi paydaşların karar alma sürecinde daha etkili olduğunu açıklamışlardır.

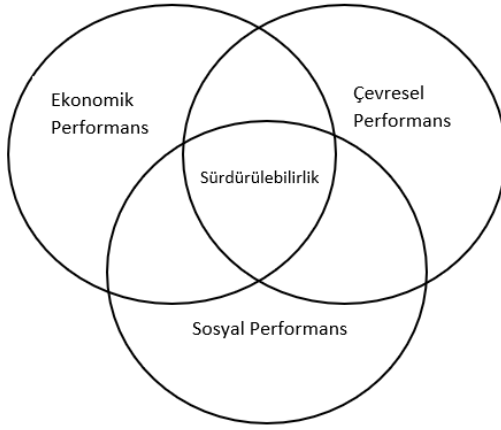
Li vd. (2025) bu kapsamda, paydaş baskısının sürdürülebilir süreç yönetimi üzerindeki etkisinin çift yönlü olabileceğini; güçlü düzenleyici ve toplumsal baskının firmaları yenilikçi STZY uygulamalara yönelttiğini, ancak mali baskı ve kurumsal zayıflıkların özellikle gelişmekte olan ekonomilerde ters yönde etkiler yaratabildiğini ortaya koymuşlardır. Mohsin vd. (2025) ise paydaş baskılarının, özellikle iklim politikaları, tüketici talepleri ve yatırımcıların Ekonomik, Sosyal ve Yönetişim (Economic, Social, Governance) odaklı beklentileri üzerinden STZY stratejilerinin evrimine yön verdiğinin altını çizmiştir.

2.3. Kurumsal Teori ve Kurumsal Mesafe

Kurumsal Teori, örgütlerin davranışlarının resmî düzenlemeler, normlar, değerler ve bilişsel çerçevelerle şekillendiğini savunur. Gelişmekte olan ekonomilerde, kurumsal yapıların zayıf olması, STZY uygulamalarının tasarımı ve uygulanmasını zorlaştırmaktadır. Pereira vd. (2023), sürdürülebilir tedarik zinciri uygulamalarının gelişmekte olan ülkelerde çoğu zaman yüzeysel uyum düzeyinde kaldığını, denetim ve yaptırım kapasitesinin yetersiz olduğunun altını çizmişlerdir. Wu ve Jia'nın (2018) tedarik zinciri alanını kurumsal alanlar olarak kavramsallaştırması, kurumsal baskıların tedarik zinciri yerelleşmesi, standardizasyon ve sürdürülebilirlik pratikleri üzerinde süreçsel bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır.

2.4. Üçlü Performans/Başarım

Elkington'un (1997) ortaya koyduğu Triple Bottom Line (TBL) yaklaşımı, kurumsal başarıyı yalnızca ekonomik kârlılık ile değil, aynı zamanda çevresel ve sosyal performansla da ölçmeyi önermektedir. Carter ve Rogers (2008) bu yaklaşımı STZY bağlamına uyarlayarak, TBL performans boyutlarının risk yönetimi, şeffaflık, strateji ve örgüt kültürü ile desteklenmesi gerektiğini vurgulamıştır.



Şekil 1: Üçlü Performans Gösterimi

Carter ve Easton (2011), STZY alanında TBL'nin giderek baskın bir alan haline geldiğini, çevresel ve sosyal performansını ekonomik performansla birlikte ele alan çalışmaların sayısının arttığını, ancak sosyal boyutun hâlâ görece zayıf kaldığını göstermektedir.

2.5. Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Yönetiminin Kavramsal Çerçeveleri

Sürdürülebilir tedarik zinciri kavramından önce, tedarik zinciri kavramının açıklanması önemlidir. Tedarik zinciri kavramını en yalın hali ile bir değer zinciri olarak tanımlayan yazarlarla birlikte, Lambert vd. (1998) tedarik zinciri yönetimini hizmet, ürün ve bilgi akış süreçlerinin bütünleşik bir şekilde müşteri hizmeti sağlanması için işletme süreçlerinin entegrasyonu olarak tanımlamıştır. CSCMP (2017)'ye göre tedarik zinciri bir planlama ve

yönetim sürecidir; bu süreç ise satın alma, temin, dönüşüm ve diğer lojistik faaliyetleri kapsamaktadır.

Ghianni vd. (2004) ise tedarik zinciri kavramını karmaşık lojistik sistemler olarak tanımlamış ve nihai ürünlerin müşterilere dağıtımının sağlandığı sistemler olarak belirtmişlerdir.

Altuntaş ve Türker (2012), STZY kavramının tedarik zinciri boyunca malzeme, bilgi ve sermaye akışlarının yanı sıra zincirde yer alan işletmeler arasındaki iş birliğini etkin biçimde yönetmeyi amaçlarken, aynı zamanda paydaşlar ve müşterilerin beklentileri doğrultusunda sürdürülebilir kalkınmanın ekonomik, çevresel ve sosyal boyutlarına ilişkin hedefler belirlemeyi ve bu hedefleri gerçekleştirmeyi ifade ettiğinin altını çizmiştir.

Hassini vd. (2012), STZY'yi tedarik zinciri operasyonlarının, kaynaklarının, bilgilerinin ve fonlarının, tedarik zinciri karlılığını en üst düzeye çıkarırken aynı zamanda çevresel etkileri en aza indirmek ve sosyal refahı en üst düzeye çıkarmak amacıyla yönetimi olarak tanımlamaktadır.

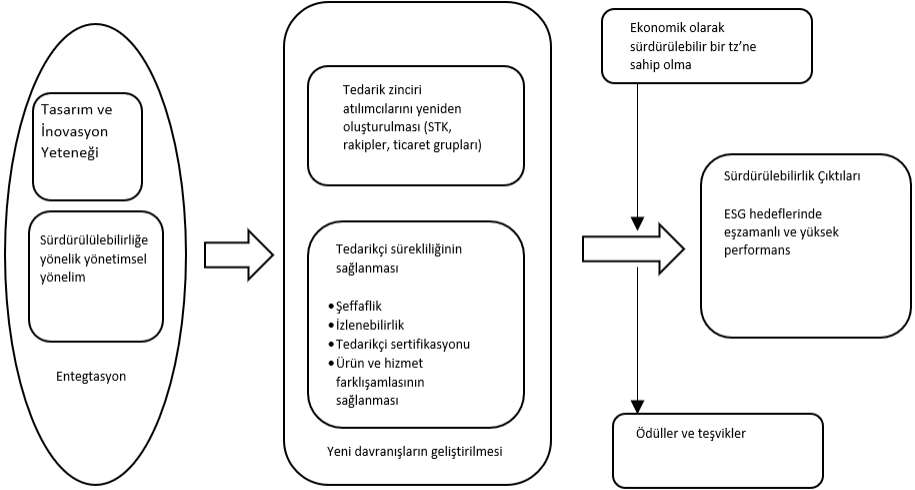
Taticchi vd. (2013) ise, sürdürülebilir tedarik zincirini, sürdürülebilir kalkınmanın önemli bir parçası olarak görmekle birlikte, tedarik zinciri üyelerinin tedarik zinciri içinde kalabilmesi için çevresel ve sosyal kriterleri karşılaması gerektiğinin altını çizmiş, nihai anlamda müşteri tatmininin ve ekonomik kriterlerin gerçekleştirilmesinin rekabet avantajını koruyacağını savunmuştur.

Seuring ve Müller (2008) çalışmalarında, sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimini, baskılar ve teşvikler, sürdürülebilirlik kriterleri, işlemsel ve stratejik tepkiler ve performans sonuçları bileşenlerinden oluşan bir modelle açıklamaya çalışmışlardır.

Carter ve Rogers (2008), STZY'yi TBL performansı ile risk yönetimi, şeffaflık, strateji ve kültürü içeren dört destekleyici unsur ile ilişkilendirerek, STZY'nin mikro düzeyde firma kararları üzerinden nasıl hayata geçirilebileceğine dair bir çerçeve sunmuştur.

Pagell ve Wu (2009) ise on örnek olay üzerinden, gerçekten sürdürülebilir tedarik zincirlerinin özelliklerini ortaya koyarak, yalnızca zararı azaltan değil, aynı zamanda pozitif çevresel ve sosyal değer üreten tedarik

zinciri örneklerine odaklanmıştır. Şekil 2’de araştırmacıların ortaya koyduğu çerçeve ele alınmış ve bu süreçte gerekli olan yapılar ve çıktılar tartışılmıştır.



Şekil 2: Sürdürülebilir tedarik zinciri modeli için faaliyetler (Kaynak: Pagel ve Wu, 2009).

Brandenburg (2019) ise STZY’yi kavramsal olarak yapılandıran ve TBL, risk, strateji ve paydaş baskılarını entegre eden bir çerçeve önermiş; Carter ve Rogers (2008) ile Seuring ve Müller (2008)’in inşa ettikleri temelin üzerine yeni unsurlar eklemiştir.

2.6. Modelleme Yaklaşımları

Seuring (2013), STZY alanındaki 300’ün üzerinde çalışmayı inceleyerek, sürdürülebilir tedarik zincirlerinde nicel modelleme yapılan çalışmaların sayısının şaşırtıcı derecede düşük olduğunu tespit etmiş; bunları yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) tabanlı modeller, denge modelleri, çok kriterli karar verme (MCDM) ve Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) olmak üzere dört ana kategoriye ayırmıştır. STZY modelleme çalışmalarında çevresel boyutun baskın, sosyal boyutun ise son derece sınırlı şekilde temsil edildiğini ifade ederek önemli bir araştırma boşluğu olduğunu da belirtmiştir. Brandenburg vd. (2014) de sosyal boyutun hem kavramsal hem de nicel modellerde büyük ölçüde ihmal edildiğini; mevcut modellerde kazan-kazan

perspektifinin baskın, ödünleşme analizlerinin ise görece az olduğunu belirtmişlerdir.

3. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK BOYUTLARI

Sürdürülebilirliğin boyutları olarak da bilinen ekonomik, sosyal ve yönetim (Economic, Social and Governance-ESG) boyutları, özellikle tedarik zinciri süreçlerinde sürdürülebilirliğin sağlanması ve toplumsal olarak sorumlu yatırım yapılması düşüncelerinden ortaya çıkmıştır (Gedik, 2021). Karbon ayak izini, iklimsel değişiklikleri ve enerji verimliliği gibi konuları kapsayan “E” bileşeni ile birlikte “S” bileşeni çalışan ücretleri, beşeri sermaye, çalışma koşullarını içermekte, “G” bileşeni ise bu bileşenlerin yönetimini kapsamaktadır (Bergman vd., 2020). Kavram, tedarik zincirinde yansımaları ile zincirde gerçekleşen taşıma faaliyetlerinin ve yakıt kullanımı odaklı verimlilik çabalarına dikkati çekerken, sektördeki çalışma koşulları ve çalışan hakları ile ilgili araştırmaların da önünü açmıştır.

3.1. Ekonomik Boyut

Ekonomik sürdürülebilirlik, firmaların uzun vadede finansal olarak ayakta kalmasını, verimlilik artışı, maliyet minimizasyonu, risk azaltma ve yenilikçilik gibi unsurları kapsamaktadır. Sun vd. (2020)’nin lojistik sektöründe yaptıkları ampirik analiz, sürdürülebilir tedarik zinciri uygulamalarının operasyonel performans (teslimat güvenilirliği, esneklik, maliyet verimliliği) üzerinden ekonomik performansa anlamlı katkı yaptığını ortaya koymaktadır. Pagell ve Gobeli (2009) de operasyon yöneticilerinin sürdürülebilirlik odaklı bakış açısının, üretim performansı ve kârlılık üzerinde pozitif etkileri olduğunu göstermiştir.

Ayrıca döngüsel ekonomi stratejileri (yeniden kullanım, geri dönüşüm, yeniden üretim) ve yeşil teknoloji yatırımları, orta ve uzun vadede maliyet avantajı ve risk azaltımı sağlayarak ekonomik sürdürülebilirliğe katkıda bulunmaktadır (Goyal vd., 2016).

3.2. Çevresel Boyut

Çevresel sürdürülebilirlik, enerji verimliliği, emisyon azaltımı, atık yönetimi, kimyasal kullanımının kontrolü ve ekosistem üzerindeki baskının

azaltılmasını kapsamaktadır. Linton vd. (2007), çevresel performansın ürün yaşam döngüsünün tüm aşamalarında değerlendirilmesi gerektiğini vurgularken, Seuring (2013) çevresel boyutun STZY modelleme çalışmalarında açık ara en fazla temsil edilen boyut olduğunu belirtir.

Mohsin vd. (2025), tedarik zincirlerinin bir firmanın çevresel etkisinin yaklaşık %90'ına, sanayi karbon emisyonlarının ise %75'ine kadarını oluşturduğunu, dolayısıyla STZY'nin iklim krizi ile mücadelede kilit rol oynadığını belirtmiştir. Net-sıfır (net-zero) hedefleri bağlamında lojistik, depolama, üretim ve tersine lojistik operasyonlarının yeniden tasarımı bu kapsamda önemli bir rol oynamaktadır.

3.3. Sosyal Boyut

Sosyal sürdürülebilirlik, işçi hakları, çalışma koşulları, ücret adaleti, iş sağlığı ve güvenliği, çocuk işçilik, toplumsal cinsiyet eşitliği ve yerel toplum üzerindeki etkiler gibi unsurları içermektedir. Villena ve Gioia (2020), çok seviyeli küresel tedarik zincirlerinde sosyal risklerin büyük bölümünün alt kademelerde yoğunlaştığını; markaların çoğunlukla yalnızca ilk seviyedeki tedarikçilerini izleyebildiğini ve bu nedenle görünmeyen seviyelerdeki sosyal sorunların sürdürüğünün altını çizmiştir.

Yawar ve Seuring (2017), sosyal konuların yönetimine ilişkin literatürü sistematik biçimde inceleyerek, sosyal sorunların (çocuk işçi, zorla çalıştırma, güvenlik, eşitsizlik vb.), bu sorunlara verilen tepkilerin (kodlar, denetimler, sertifikasyon, iş birliği programları) ve performans sonuçlarının (itibar, uyum, risk azaltımı) sınıflandırmasını yapmışlardır. Buna rağmen Seuring (2013) ve Brandenburg vd. (2014), sosyal boyutun nicel modelleme ve performans ölçümünde önemli bir boşluk olduğunu vurgulamışlardır.

4. ÇEVRESEL, SOSYAL VE YÖNETİŞİM (ESG) ÇERÇEVESİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİR TEDARİK ZİNCİRİ YÖNETİMİ

4.1. ESG'nin STZY İçindeki Stratejik Konumu

Çevresel, sosyal ve yönetim (ESG) yaklaşımı, işletmelerin tedarik zinciri sürdürülebilirliğini ölçmek ve yönetmek için kullandığı en kapsamlı çerçevelerden biri hâline gelmiştir. ESG, yalnızca bir performans göstergesi

değil, tedarik zinciri boyunca risk azaltımı, şeffaflık, paydaş güveni ve uzun dönemli kurumsal dayanıklılık için stratejik bir araçtır (Truant vd., 2024).

Son yıllarda özellikle Avrupa Birliği Kurumsal Sürdürülebilirlik Raporlama Direktifi (2022/2464) ile şirketlere, yalnızca kendi operasyonlarını değil, tüm değer zincirlerini içerecek kapsamda ESG raporlama yükümlülüğü getirilmiştir. Bu durum, ESG'nin tedarik zinciri yönetimi ile bütünleşmesini hızlandırmış, sürdürülebilirlik hedeflerini operasyonel bir zorunluluğa dönüştürmüştür (Truant vd., 2024).

ESG'nin tedarik zinciri yönetimi ile bütünleştirilmesi, özellikle aşağıdaki katkıları açısından oldukça kritiktir:

- Tedarik zinciri risk yönetimi (iklim riski, sosyal uyum riski, yönetim riski).
- Karbon nötr ve döngüsel üretim hedeflerine uyum.
- Şeffaflık ve izlenebilirlik kapasitesinin artırılması.
- Yatırımcı ve düzenleyici baskılara uyum.
- Tedarikçi davranışlarının standardizasyonu.

Bu nedenle ESG, STZY'nin yalnızca bir alt bileşeni değil; sürdürülebilir tedarik zincirinin bütünsel yapısını oluşturan çok katmanlı bir yönetim mimarisi olarak karşımıza çıkmaktadır.

4.2. ESG Boyutlarının Tedarik Zinciri Yönetimine Etkisi

4.2.1. Çevresel Boyut (Environment)

Çevresel performans, STZY'nin en görünür ve en güçlü şekilde ölçülebilir bileşenidir. Karbon emisyonları, enerji verimliliği, atık yönetimi, döngüsel ekonomi uygulamaları ve kaynak verimliliği gibi göstergeler çevresel performansın temel alanlarıdır (Linton vd., 2007).

Tedarik zincirlerinin çevresel etkileri, işletmelerin toplam karbon ayak izinin %70'ine kadar çıkabilmektedir. Bu nedenle çevresel ESG göstergelerinin büyük bölümü tedarikçi ilişkileri, lojistik ağ tasarımı ve üretim süreçleri ile doğrudan ilişkilidir (Carter ve Easton, 2011).

Truant vd. (2024), çevresel boyutun özellikle üç alanda kritik olduğunu belirtmiştir:

- Emisyon azaltımı ve karbon nötrlük planları
- Kaynak verimliliği ve döngüsel tedarik zinciri uygulamaları
- Yeşil satın alma kriterleri

Bu bulgular özellikle döngüsel ekonomi alanındaki çalışmalar ile eş zamanlı olarak incelenmektedir, bunun sebebi ise döngüsel tedarik zincirinde ürün yaşam döngüsü boyunca materyal geri kazanımı ve sürdürülebilir tasarım kilit rol oynamasıdır (Geissdoerfer vd., 2017).

4.2.2.Sosyal Boyut (Social)

Sosyal sürdürülebilirlik, çalışan hakları, iş güvenliği, toplumsal etki, çocuk işçiliğiyle mücadele, tedarikçi etik uyumu gibi alanları içermektedir (Pagell ve Shevchenko, 2014).

Whitelock'un (2015) çalışmasında sosyal boyut, işletmenin insan odaklı süreçlerle ilişkisi olarak tanımlanmakta ve sosyal sürdürülebilirliğin tedarik zinciri içerisinde yalnızca risk yönetimi değil, aynı zamanda paydaş ilişkilerinin kurumsal değerini artıran bir yapı olduğunun da altı çizilmiştir. Sosyal boyutun kritik önemi ise aşağıdaki parametrelerde ortaya çıkmaktadır:

- Uluslararası çalışma standartlarına uyum
- Tedarikçi denetimleri ve sosyal uygunluk
- Çalışan sağlığı ve güvenliği
- Toplumsal kalkınma ve yerel tedarikçi geliştirme

Whitelock (2019) bir diğer çalışmasında ise sosyal unsurların tedarik zinciri entegrasyonu ile doğrudan ilişkili olduğunu ve sosyal uyum düzeyi yüksek tedarik zincirlerinin çevresel ve finansal performansı artırdığını savunmaktadır.

4.2.3.Yönetişim Boyutu (Governance)

Yönetişim, kurumsal kontrol mekanizmaları, etik standartlar, raporlama, operasyonel şeffaflık ve denetim süreçlerini kapsamakla birlikte özellikle tedarik zinciri süreçlerinde standartların belirlenmesi ve operasyonlardaki şeffaflık amaçlarının sağlanması bütün zincir içinde oluşabilecek darboğazları en aza indirgemeyi amaçlamaktadır.

Truant vd. (2024), yönetim boyutunun özellikle üç alanda belirleyici olduğunun altını çizmiştir:

- Tedarikçi davranış kodlarının oluşturulması
- Şeffaflık mekanizmaları ve veri raporlama standartları
- Yaptırım ve denetim süreçlerinin kurumsallaştırılması

Whitelock (2015) yönetişimi, ESG iş birliğinin merkezindeki yapı olarak tanımlamakta ve yönetim kapasitesi güçlü olan firmaların hem ESG performansının hem finansal performansının daha yüksek olduğunu yaptığı çalışmalarla desteklemektedir.

4.3. ESG Skorları, Performans Ölçümü ve Tedarik Zinciri İzlenebilirliği

ESG skorları, sürdürülebilirlik performansının nicel olarak ölçülmesi ve karşılaştırılmasına imkân tanıyan en yaygın araçlardan biri hâline gelmiştir. Bu skorlar; çevresel (E), sosyal (S) ve yönetim (G) boyutlarında belirlenen göstergelerin ağırlıklandırılması yoluyla oluşturulmakta ve işletmelerin sürdürülebilirlik düzeylerinin yatırımcılar, düzenleyici kurumlar ve diğery paydaşlar tarafından değerlendirilmesini sağlamaktadır (Khan vd., 2016). Son yıllarda ESG skorları, yalnızca kurumsal düzeyde bir raporlama aracı olmaktan çıkarak, tedarik zinciri performansının ölçümü ve yönetimi için de merkezi bir rol üstlenmiştir (Truant vd., 2024).

4.3.1.ESG Skorlarının Yapısı ve Tedarik Zinciri Bağlamı

ESG skorlarının büyük bölümü, genel olarak firma içi operasyonlara odaklanmakla beraber, küresel tedarik zincirlerinin karmaşıklığı ve sürdürülebilirlik risklerinin büyük ölçüde tedarikçilerde yoğunlaşması, ESG ölçümlerinin değery zinciri perspektifiyle ele alınmasını zorunlu kılmıştır (Carter ve Rogers, 2008; Villena ve Gioia, 2020). Özellikle karbon emisyonlarının önemli bir kısmının tedarik zinciri faaliyetlerinden kaynaklanması, ESG skorlarının tedarikçi performansını içerecek şekilde yeniden tasarlanmasına yol açmıştır (Mohsin vd., 2025).

Bu bağlamda ESG skorları, tedarik zinciri yönetiminde üç temel amaç için kullanılmaktadır:

- Risk segmentasyonu: Yüksek ESG riskine sahip tedarikçilerin belirlenmesi,
- Performans karşılaştırması: Tedarikçilerin sürdürülebilirlik performanslarının kıyaslanması,
- Stratejik karar desteği: Tedarikçi seçimi, sözleşme yapıları ve yatırım kararlarının yönlendirilmesi.

Truant vd. (2024), ESG skorlarının STZY bağlamında etkili olabilmesi için skorların yalnızca çıktı göstergelerine değil, süreç temelli performans ölçütlerine de dayanması gerektiğini vurgulamaktadır. Aksi takdirde ESG skorları, sürdürülebilirlik performansını gerçekçi biçimde yansıtmak yerine sembolik bir raporlama aracı hâline gelebilmektedir.

Sürdürülebilir tedarik zinciri performansının ölçümü, çok boyutlu ve çok kriterli bir değerlendirme gerektirmektedir. Bu nedenle literatürde farklı metodolojik yaklaşımlar geliştirilmiştir. Seuring (2013), STZY performans ölçümünü dört ana yaklaşım altında sınıflandırmaktadır: (i) yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA), (ii) çok kriterli karar verme yöntemleri (MCDM), (iii) denge ve optimizasyon modelleri ve (iv) endeks temelli ölçüm sistemleri.

ESG skorları çoğunlukla endeks temelli ölçüm yaklaşımına dayanmakta; çevresel, sosyal ve yönetim göstergeleri belirli ağırlıklarla birleştirilerek tek bir performans değeri üretilmektedir. Ancak bu yaklaşım, özellikle sosyal sürdürülebilirlik ve tedarik zinciri ilişkileri söz konusu olduğunda önemli sınırlılıklar içermektedir (Pagell ve Shevchenko, 2014). Sosyal göstergelerin ölçümünde veri eksikliği, öznel değerlendirmeler ve kültürel farklılıklar, ESG skorlarının güvenilirliğini azaltabilmektedir (Yawar ve Seuring, 2017).

Bu nedenle son dönem çalışmaları, ESG performans ölçümünün hibrit modeller ile desteklenmesi gerektiğini ileri sürmektedir. Örneğin, Bai vd. (2020), sürdürülebilir tedarik zinciri esnekliği ile çevresel ve döngüsel performans göstergelerini bütünleştiren DEMATEL tabanlı bir model önermiştir. Benzer şekilde, Genovese vd., (2017) LCA temelli ölçümlerin ESG göstergeleriyle birlikte kullanıldığında tedarik zinciri performansının daha doğru biçimde değerlendirilebildiğini savunmuşlardır.

4.3.2. Tedarik Zinciri İzlenebilirliği ve Dijital Teknolojiler

ESG performans ölçümünün en kritik ön koşullarından biri izlenebilirliktir. İzlenebilirlik, bir ürünün veya girdinin tedarik zinciri boyunca hangi aşamalardan geçtiğinin, hangi çevresel ve sosyal etkilerle ilişkilendiğinin ve hangi aktörler tarafından üretildiğinin izlenebilmesini ifade eder (Villena ve Gioia, 2020).

Geleneksel tedarik zincirlerinde izlenebilirlik çoğunlukla ilk seviyedeki tedarikçilerle sınırlı kalmakta; alt kademe tedarikçilerdeki sürdürülebilirlik riskleri görünmez hâle gelmektedir. Bu durum ESG skorlarının tedarik zinciri gerçekliğini tam olarak yansıtamamasına neden olmaktadır (Carter ve Easton, 2011). Son yıllarda dijital teknolojiler, bu sorunun aşılmasında belirleyici bir rol oynamaktadır.

El Jaouhari vd. (2023), Endüstri 4.0 teknolojilerinin ESG performans ölçümünü şu şekillerde güçlendirdiğini ortaya koymaktadır:

- Blockchain: Tedarik zinciri verilerinin değiştirilemez ve doğrulanabilir şekilde kaydedilmesini sağlar.
- IoT: Enerji kullanımı, emisyonlar ve çevresel koşulların gerçek zamanlı ölçümüne imkân tanır.
- Yapay zekâ ve büyük veri analitiği: ESG risklerinin tahmin edilmesi ve performans eğilimlerinin analiz edilmesini mümkün kılar.
- Bulut tabanlı sistemler: Çok sayıda tedarikçiden gelen verilerin merkezi biçimde toplanmasını ve raporlanmasını sağlar.

Bu teknolojik altyapı, ESG skorlarının kanıta dayalı ve denetlenebilir hale gelmesini sağlamakta; yönetim boyutunu güçlendirmektedir (El Jaouhari vd., 2023).

ESG performans ölçümü, yalnızca gönüllü kurumsal girişimlerle sınırlı kalmamakta; giderek artan biçimde düzenleyici baskılar tarafından da şekillendirilmektedir. Bataille vd. (2021), net-sıfır hedeflerine yönelik regülasyonların, ESG performansını ölçülebilir ve karşılaştırılabilir hâle getiren standartlara olan ihtiyacı artırdığını belirtmektedir. Özellikle sınırda karbon düzenlemeleri ve zorunlu tedarik zinciri beyanları, ESG skorlarının stratejik önemini artırmaktadır.

Bu bağlamda ESG skorları, tedarik zinciri yönetişiminin bir aracı hâline gelmekte; firmalar, tedarikçilerini yalnızca maliyet ve kalite kriterlerine göre değil, aynı zamanda ESG performanslarına göre de değerlendirmektedir. Truant vd. (2024), bu yaklaşımın uzun vadede sürdürülebilir tedarik zinciri performansını artırdığını, ancak kısa vadede tedarikçi ilişkilerinde uyum maliyetlerini yükseltebileceğini ifade etmektedir.

5. DÖNGÜSEL EKONOMİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİR TEDARİK ZİNCİRLERİ

Döngüsel ekonomi, endüstriyel sistemlerin lineer “al–üret–at” modelinden koparak kaynakların sürekli dolaşımda tutulduğu yenileyici ve kapalı döngü bir üretim anlayışına geçişi ifade eder. Döngüsel ekonomi, sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi literatürüyle paralel ilerlese de son yıllarda yapılan çalışmalar bu iki kavramın giderek bütünleştiğini göstermektedir. STZY’nin temel amacı çevresel etkileri azaltmak iken döngüsel ekonomi, kaynakların yeniden kullanımını, yaşam döngüsü boyunca değer geri kazanımını ve sistemin kendini yenileyebilmesini hedefleyen daha radikal bir dönüşümü önerir (Genovese vd., 2017).

STZY uygulamaları (yeşil satın alma, eko-tasarım, temiz üretim, atık minimizasyonu) genel olarak “kaynak kullanımını daraltma (narrowing)”, “kaynak kullanım hızını yavaşlatma (slowing)” ve “kaynak akışını kapatma (closing)” çevrimlerini teşvik eder. Döngüsel ekonomi literatüründe bu üç strateji Bocken vd. (2016) tarafından bu kavramın temel mekanizmaları olarak tanımlanmıştır.

Genovese vd. (2017), döngüsel ekonominin yalnızca çevresel etkiyi azaltmadığını, aynı zamanda malzeme döngülerinin yeniden tasarlanması yoluyla ekonomik ve operasyonel rekabet avantajı da sağladığının da altını çizmiştir.

Bu kapsamda döngüsel ekonominin STZY’ye katkıları üç başlık altında özetlenebilir:

- Kaynak verimliliğinin artması hammadde bağımlılığını azaltılması,
- Atıkların değer olarak geri kazanılması,

- Tedarik zincirinde kapalı döngü yapılar karbon ayak izinin azaltılması, izlenilebilirliğin artırılması.

Döngüsel ekonomi dönüşümünün en kritik destekçilerinden biri dijital teknolojilerdir. Industry 4.0 bileşenleri (IoT, yapay zekâ, bulut sistemleri, blockchain, büyük veri analitiği) bu kavramın gerektirdiği döngüsel akışları izlemek, optimize etmek ve kontrol etmek için elzemdir.

Liu vd. (2023), döngüsel ekonomi ve STZY entegrasyonu için CAB2IN adı verilen bir dijitalleşme modelini geliştirmiştir. Bu model döngüsel ekonomi uygulamalarını aşağıdaki şekilde desteklemektedir:

- C – Cloud
- A – Artificial Intelligence
- B – Big Data
- B – Blockchain
- I – Internet of Things
- N – Network Systems

CAB2IN, ürün yaşam döngüsünün tasarım–üretim–dağıtım–kullanım–ömür sonu aşamalarını veri entegrasyonu üzerinden bağlayarak döngüsel ekonomi uygulamalarının hem fiziksel hem siber kabiliyetlerini arttırmaktadır (Liu vd., 2023).

Bu dijital altyapı sayesinde:

- Kapalı döngü malzeme akışları gerçek zamanlı takibi,
- Karbon emisyonları ölçülebilirliği,
- Tedarik zinciri izlenebilirliği,
- Geri kazanım, yeniden üretim (remanufacturing), yeniden kullanım (reuse) süreçleri optimizasyonu gerçekleştirilebilmektedir.

6. SONUÇ

Sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi (STZY), günümüzün karmaşık, çok katmanlı ve küresel üretim ağlarında yalnızca bir operasyonel zorunluluk değil, aynı zamanda kurumsal stratejinin temel belirleyicilerinden biri hâline gelmiştir. İklim değişikliği, kaynak kıtlığı, sosyal eşitsizlikler, jeopolitik riskler

ve küresel belirsizlik gibi unsurlar, tedarik zincirlerinin tarihsel olarak görülmemiş ölçekte baskı altına girmesine neden olmuş; bu durum sürdürülebilirlik temelli yeniden yapılanmayı zorunlu kılmıştır.

Bu kapsamda incelenen literatür, STZY'nin çok boyutlu bir yapı olduğunu göstermektedir. NRBV, Paydaş Teorisi, Kurumsal Teori, TBL ve ESG gibi teorik çerçeveler, sürdürülebilirliğin yalnızca çevresel ya da ekonomik bir uygulama olmadığını; bunun ötesinde kurumsal değerler, toplumsal beklentiler, yönetim ilkeleri ve dijital dönüşüm ile ilişkili bütünsel bir yaklaşım olduğunu ortaya koymaktadır. STZY uygulamaları, tedarik zinciri boyunca kaynak verimliliği, karbon azaltımı, sosyal uygunluk, etik tedarik, atık minimizasyonu ve döngüsel ekonomi gibi uygulamalarla performansı artırmakta; aynı zamanda riskleri azaltmakta ve kurumsal dayanıklılığı güçlendirmektedir.

Döngüsel ekonomi prensipleri, net-sıfır stratejileri ve dijital teknolojilerin (IoT, blockchain, büyük veri, yapay zekâ) entegrasyonu, sürdürülebilir tedarik zincirlerinin geleceğini şekillendiren en önemli eğilimlerdenidir. Ancak literatür, özellikle çok seviyeli izlenebilirlik, sosyal sürdürülebilirlik ölçütleri, gelişmekte olan ülkelerde kurumsal zayıflık, TBL-ESG entegrasyonu, net-sıfır modelleme ve nicel analiz yöntemleri gibi alanlarda önemli araştırma boşlukları bulunduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, STZY hem teori hem de pratik açısından dinamik, çok-disiplinli ve hızla gelişen bir alan olup; tedarik zincirlerinin çevresel ve sosyal etkilerini azaltırken ekonomik performansı artırmayı hedefleyen stratejik bir dönüşüm gerektirmektedir.

KAYNAKÇA

- Altuntaş, C., & Türker, D. (2012). Sürdürülebilir tedarik zincirleri: sürdürülebilirlik raporlarının içerik analizi. Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 14(3), 39-64.
- Bai, C., Sarkis, J., Wei, X., & Koh, L. (2020). Evaluating ecological sustainable supply chain management performance: A network perspective. Journal of Cleaner Production, 260, 120–145. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120145>
- Bataille, C., Åhman, M., Neuhoﬀ, K., Nilsson, L. J., Fishedick, M., Lechtenböhmer, S., Solano-Rodriguez, B., Denis-Ryan, A., Stiebert, S., Waisman, H., Sartor, O., & Rahbar, S. (2021). A review of technology and policy deep decarbonization pathway options for making energy-intensive industry production consistent with the Paris Agreement. Journal of Cleaner Production, 187, 960–973. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.107>
- Bergman, M. S., Deckelbaum, A. J., & Karp, B. S. (2020) Introduction to ESG. Harvard Law School Forum on Corporate Governance. <https://corpgov.law.harvard.edu/2020/08/01/introduction-to-esg/>
- Brandenburg, M. (2019). Sustainable supply chain management: A conceptual and theoretical framework.
- Brandenburg, M., Govindan, K., Sarkis, J., & Seuring, S. (2014). Quantitative models for sustainable supply chain management: Developments and directions. European Journal of Operational Research, 233(2), 299–312.
- Carl, J., & Fedor, D. (2016). Tracking global carbon revenues. Nature Climate Change, 6(7), 646–649.
- Carter, C. R., & Easton, P. L. (2011). Sustainable supply chain management: Evolution and future directions. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 41(1), 46–62.

- Carter, C. R., & Rogers, D. S. (2008). A framework of sustainable supply chain management: Moving toward new theory. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 38(5), 360–387.
- CSCMP (2019), Tedarik Zinciri Yönetiminin tanımı, http://cscmp.org/CSCMP/Certify/Fundamentals/What_is_Supply_Chain_Management.aspx adresinden elde edildi.
- El Jaouhari, A., Khader, M., & Tkouat, M. (2023). Industry 4.0 technologies for net-zero supply chains: An ESG-based framework. *Journal of Cleaner Production*, 389, 136–148. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136148>
- Elkington, J. (1997). *Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business*. New Society Publishers.
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition*.
- Gedik, Y. (2021). Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Yönetimi Ve Sürdürülebilirliğin Tedarik Zincirleri Üzerindeki Etkileri: Kavramsal Bir Değerlendirme. *International Journal of Management Economics & Business/Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi*, 17(3).
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy: A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768.
- Genovese, A., Acquaye, A. A., Figueroa, A., & Koh, S. C. L. (2017). Sustainable supply chain management and the transition towards a circular economy: Evidence and some applications. *Omega*, 66, 344–357. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.05.015>
- Ghianni, G., Laporte, G., & Musmanno, R. (2004). *Introduction to logistics systems management*. John Wiley & Sons.
- Goyal, S., Esposito, M., & Kapoor, A. (2016). Circular economy business models in emerging markets. *Journal of Cleaner Production*, 197, 1–7.

- Hart, S. L. (1995). A natural-resource-based view of the firm. *Academy of Management Review*, 20(4), 986–1014.
<https://doi.org/10.5465/amr.1995.9512280033>
- Hassini, E., Surti, C. & Searcy, C. (2012). A literature review and a case study of sustainable supply chains with a focus on metrics. *International Journal of Production Economics*, 140(1), 69-82.
- Khan, M., Serafeim, G., & Yoon, A. (2016). Corporate sustainability: First evidence on materiality. *The Accounting Review*, 91(6), 1697–1724.
<https://doi.org/10.2308/accr-51383>
- Kleindorfer, P. R., Singhal, K., & Van Wassenhove, L. N. (2005). Sustainable operations management. *Production and Operations Management*, 14(4), 482–492.
- Lambert, D. M., Stock, J. R., & Ellram, L. M. (1998). *Fundamentals of logistics management*. McGraw-Hill/Irwin.
- Li, X., Wang, Y., & Jin, Z. (2025). Stakeholder pressure and sustainable process management capability: Evidence from manufacturing supply chains. *Humanities and Social Sciences Communications*, 12, 1–14.
- Linton, J. D., Klassen, R., & Jayaraman, V. (2007). Sustainable supply chains: An introduction. *Journal of Operations Management*, 25(6), 1075–1082.
- Mitchell, R. K., Agle, B. R., & Wood, D. J. (1997). Toward a theory of stakeholder identification and salience. *Academy of Management Review*, 22(4), 853–886.
- Mohsin, M., et al. (2025). Examining the evolution of sustainable supply chain management: A systematic review. *Sustainable Development*, 33(1), 1–15.
- Pagell, M., & Gobeli, D. (2009). How plant managers' experiences and attitudes toward sustainability relate to operational performance. *Production and Operations Management*, 18(3), 278–299.

- Pagell, M., & Shevchenko, A. (2014). Why research in sustainable supply chain management should have no future. *Journal of Supply Chain Management*, 50(1), 44–55.
- Pagell, M., & Wu, Z. (2009). Building a more complete theory of sustainable supply chain management. *Journal of Supply Chain Management*, 45(2), 37–56.
- Pereira, M. M. O., Hendry, L. C., Silva, M. E., Bossle, M. B., & Antonialli, L. M. (2023). Sustainable supply chain management in a global context: the perspective of emerging economy suppliers. *RAUSP Management Journal*, 58(3), 197-218.
- Rockström, J., et al. (2017). A roadmap for rapid decarbonization. *Science*, 355(6331), 1269–1271.
- Sarkis, J. (2001). Manufacturing decision making within multiple environmental criteria. *Journal of Cleaner Production*, 9(6), 451–463.
- Sarkis, J., Zhu, Q., & Lai, K. H. (2011). An organizational theoretic review of green supply chain management literature. *International Journal of Production Economics*, 130(1), 1–15.
- Seuring, S. (2013). A review of modeling approaches for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 52, 163–180.
- Seuring, S., & Müller, M. (2008). From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 16(15), 1699–1710.
- Sun, H., et al. (2020). Supply chain sustainability and firm performance: A meta-analytic review. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120–136.
- Taticchi P., Tonelli F., Pasqualino R. (2013). Performance measurement of sustainable supply chains. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 62(8), 782–804.
<http://dx.doi.org/10.1108/IJPPM-03-2013-0037>

- Truant, E., Corazza, L., Scagnelli, S. D., & Mio, C. (2024). The contribution of ESG factors to sustainable supply chain management: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 442, 141–170.
- Villena, V. H., & Gioia, D. A. (2020). A more sustainable supply chain: Multi-tier supply chain transparency. *Journal of Operations Management*, 66(1–2), 1–20. <https://doi.org/10.1002/joom.1068>
- Whitelock, V. G. (2015). The impact of ESG supply chain collaboration on corporate financial performance (Doctoral dissertation). Walden University.
- Whitelock, V. G. (2019). Environmental, social and governance factors in supply chain collaboration. *Journal of Management and Sustainability*, 9(1), 45–60.
- Yawar, S. A., & Seuring, S. (2017). Management of social issues in supply chains: A literature review exploring social issues, actions and performance outcomes. *Journal of Business Ethics*, 141, 621–643.
- Zhu, Q., & Geng, Y. (2005). Integrating environmental issues into supplier selection: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 13(9), 273–281.
- Zhu, Q., Johnson, S., & Sarkis, J. (2018). Lean six sigma and environmental sustainability: Empirical relationships. *Journal of Cleaner Production*, 202, 448–457.

BÖLÜM 2

YAPAY ZEKÂ VE DİJİTAL DÖNÜŞÜMÜN TEDARİK ZİNCİRLERİNE ETKİSİ: TEKNOLOJİK TEMELLER VE SİSTEMATİK BİR YAKLAŞIM

Dr. Öğr. Üyesi Rukiye TEKİN ÜNVER¹

Dr. Öğr. Üyesi Muharrem ÜNVER²

¹ Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Karabük, TÜRKİYE. rukiyetekin@karabuk.edu.tr, orcid id: 0000-0001-8265-2018

² Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Karabük, TÜRKİYE. muharremunver@karabuk.edu.tr, orcid id:0000-0001-7587-6849

1. GİRİŞ

Dijital dönüşüm; siber-fiziksel sistemler (CPS), Nesnelerin İnterneti (IoT), büyük veri analitiği, bulut, blokzincir, dijital ikizler ve yapay zekâ (YZ) bileşenlerinin, değer akışının her noktasına veri-odaklı bir mantıkla entegre edilmesidir. Üretim ve fabrika ortamlarında bu bütünleşme; anlık görünürlük, öngörücü bakım, esnek hat konfigürasyonu ve yaklaşık gerçek zamanlı optimizasyon gibi yeteneklerle çevrim sürelerini düşürür, kalite değişkenliğini azaltır ve kaynak kullanım verimliliğini artırır (Xu vd., 2024). Bu sayede tedarik, üretim, dağıtım ve satış-sonrası fonksiyonları arasında veri eşgüdümü güçlenir; kişiselleştirme, hız ve çeviklik rekabet parametrelerinin merkezine yerleşir (Samuels, 2024).

Tedarik zincirlerinde dijital dönüşümün evrimi, 2010'ların başında IoT-bulut tabanlı görünürlük çözümleriyle ivme kazanmış; 2015 sonrasında blokzincir ile güvenilir izlenebilirlik ve akıllı sözleşmeler, dijital ikizler ile senaryo-tabanlı optimizasyon boyutu belirginleşmiştir (Cui vd., 2019). Eşzamanlı olarak YZ'nin, özellikle talep tahmini, envanter ve lojistik planlama gibi alanlarda karar kalitesini iyileştirdiği; sürdürülebilirlik ve insan-merkezli işbirliğine doğru (Endüstri 4.0→5.0/6.0) bir ilerleme sağladığı gösterilmiştir (Štreimikienė vd., 2025). Blokzincir tabanlı çözümler, ürün kökeni ve işlem geçmişinin değiştirilemez biçimde kaydıyla tedarik zincirinde şeffaflık ve güven inşa ederek izlenebilirlik ve uygunluk kararlarını güçlendirir (Cui vd., 2019).

Çevresel etkiler bakımından dijital dönüşüm çift yönlü bir tablo sunar. Veri-odaklı planlama, rota ve envanter optimizasyonu ile proses otomasyonu enerji verimliliğini yükseltir, atıkları ve karbon emisyonlarını düşürme potansiyeli taşır (Toprak & Nebati, 2024). Buna karşın veri-yoğun mimarilerin ve bulut/hesaplama altyapısının artan enerji talebi, işletmeleri “sürdürülebilirlik paradoksu” ile karşılaştırır; bu nedenle emisyon muhasebesi, izlenebilirlik ve simülasyon-temelli senaryolama (dijital ikiz) gibi araçlarla “net” çevresel etkiyi rasyonel yönetmek gerekir (Lu & Taghipour, 2025). Türkiye literatürü, Endüstri 4.0 araçlarının sürdürülebilir tedarik zincirindeki fırsat ve zorluklarını çok ölçütlü (AHP/ANP vb.) çerçevelerle değerlendirerek uygulama önceliklerinin belirlenmesine yardımcı olmaktadır (Karakoç vd., 2020).

Dijitalleşme, tedarik zincirinde karar alma şeklini de tamamen değiştirdi. Periyodik ve deterministik planlamanın yerini olaya dayalı, belirsiz ve çok kriterli karar modelleri alıyor. IoT/RFID/GPS kaynaklı veri verileri, talep tahminleri, envanter, kapasite bağlantıları ve rota-planlama gibi kararlar sürekli besleyen analitik boru hatlarına akmaktadır (Xu vd., 2024). Bu bağlamda yapay zekâ; denetimli/denetimsiz ve derin öğrenme ile talep-fiyat esnekliği tahmininden stok/satın alma optimizasyonuna, tedarikçi segmentasyonu ve erken uyarı (risk) sistemlerine kadar geniş bir yelpazede uygulanırken, takviyeli öğrenme depo içi akış, çizelgeleme ve dağıtımda yaklaşık optimum politikalar üretmektedir (Štreimikienė vd., 2025). Türkiye’deki bulgular, entegrasyon ve dijitalleşmenin işletme performansı üzerinde anlamlı ve pozitif etkileri olduğunu; risk yönetimi ve uygunluk düzeyinin geçişin başarısında belirleyici olduğunu göstermektedir (Terzi vd., 2020).

Sonuç olarak dijital dönüşüm ile YZ’nin bütünleşik kullanımı; tedarik zincirlerinde hız-maliyet-hizmet üçlüsünü yeniden optimize ederken, dayanıklılık ve sürdürülebilirlik gibi yeni rekabet metriklerinde de kazanımlar üretmektedir (Samuels, 2024).

2. DİJİTAL DÖNÜŞÜMÜN YENİ PARADİGMASI

Tedarik zincirlerinde dijitalleşme, verinin bir “yan ürün” olmaktan çıkıp stratejik bir üretim faktörü olarak konumlandığı; siber-fiziksel sistemler (CPS), IoT, büyük veri/bulut, yapay zekâ (YZ), blokzincir ve dijital ikiz teknolojilerinin bütünleşik bir işletme mimarisi içinde kurgulandığı bir dönüşüm olarak değerlendirilebilir. Bu bütünleşik mimari, uçtan uca görünürlüğü artırabilir; öngörü–öneri yeteneklerini güçlendirebilir ve otonom karar alma kapasitesini besleyebilir. Böylece klasik hız–maliyet–hizmet üçlüsü yeniden optimize edilebilir; aynı anda dayanıklılık ve sürdürülebilirlik gibi rekabet metriklerinde kayda değer kazanımlar ortaya çıkabilir (Xu vd., 2024; Lu ve Taghipour, 2025; Bandara ve Buics, 2024).

Bu paradigma, CPS -IoT veri akışları aracılığıyla hat ve ağ düzeyinde neredeyse gerçek zamanlı kararlar alınmasını sağlayabilir. Dijital ikizler ve senaryo tabanlı analitik yaklaşımlar, yalnızca operasyonel değil, aynı zamanda taktiksel ve stratejik karar alma ufuklarını da genişletebilir. Sektörel trend raporları, yapay zeka ve sürdürülebilirlik kümelerinin yakın gelecekte lojistikte belirleyici bir rol oynayabileceğini vurgulamaktadır (Xu vd., 2024).

Veri edinimi ve görünürlük düzleminde; IoT sensörleri, RFID/GPS telemetri ve MES/SCADA sistemleri üzerinden olay güdümlü veri toplanması, ürün–varlık–süreç hareketlerinin ne–nerede–ne zaman–hangi iş bağlamında gerçekleştiğinin standart bir dille kayıt altına alınmasını kolaylaştırabilir. GS1 EPCIS/CBV 2.0 yapısı; sensör verileri ve sertifikaları olay mesajlarına ekleyebilen sözlük/mekanizmalarıyla gıda, ilaç ve elektronik gibi hassas alanlarda izlenebilirliği ve birlikte çalışabilirliği güçlendirebilir (GS1, t.y.).

Veri mimarisi ve analitik düzleminde; bulut tabanlı veri gölleri ve büyük veri analitiği, öngörüselsel ve öneriselsel modelleri besleyerek talep, envanter, kapasite ve rota kararlarının dinamik biçimde güncellenebilmesini sağlayabilir. Endüstri 4.0 yazını, yeni girdiler (anlık akışlar), yeni karar sınıfları ve veri-etkin algoritmalarla tedarik zinciri tasarımının daha esnek ve uyarlanabilir hâle gelebileceğini belirtmektedir (Xu vd., 2024; Lu ve Taghipour, 2025).

Yönetişim ve orkestrasyon düzleminde; karar destek sistemleri ve akıllı sözleşmeler birlikte ele alındığında zincir-geyiş iş akışları şeffaf ve kanıta dayalı izlenebilir hâle gelebilir. Gerçek zamanlı taşıma görünürlüğü (RTTVP) platformları (ör. FourKites, Shippeo), Taşıyıcı sistemler ve telemetri kaynakları aracılığıyla tahmini varış süreleri, gecikmeler ve hatta karbon göstergeleri üretmek kontrol kulelerine ve saha operasyonlarına gerçek zamanlı girdi sağlamak (Gartner, 2024; FourKites, 2024).

Tüm bu süreç, bilgi akışlarının periyodik ve gecikmeli olmaktan olay odaklı ve sürekli hale gelmesiyle, daha az güvenlik stoğuna ve daha yüksek hizmet seviyelerine yol açabileceğini gösteriyor. Otonom vizyon, insan kararlarını ikame etmekten çok tamamlamayı amaçlayabilir; öğrenen sistemler ve kısıt-tabanlı optimizasyonla yeniden sipariş, yeniden rotalama ve kapasite kaydırma gibi mikro kararlar yaklaşık optimum politika setlerine dönüşebilir (Xu vd., 2024; DHL Group, 2024).

Güven ve izlenebilirlik boyutunda blokzincir + EPCIS hibritleri öne çıkabilir. EPCIS olaylarının off-chain depolanıp özetlerinin zincir üzerinde tutulduğu mimariler, ölçek ve gizlilik gereksinimlerini dengeleyebilir. Uygulama örnekleri, gıda tedarikinde parti/seri iz sürmenin günlerden saniyelere inebildiğini; geri çağırımlarda seçici müdahale yapılabildiğini göstermiştir (Kamath, 2018; Ellahi vd., 2023).

VUCA/BANI koşullarında veri-odaklı yönetim; veri tazeliği, duyarlılık, uyarlanabilirlik ve öğrenme kapasitesi gibi parametrelerle rekabet üstünlüğü

sağlayabilir. Görünürlük/izlenebilirlik, öngörü ve öngörücü bakım, maliyet–zaman–servis–karbon hedeflerini birlikte ele alan çok ölçütlü optimizasyon ve kararların açıklanabilirliği bu bağlamda kritik kabul edilebilir (Xu vd., 2024; DHL Group, 2024).

Siber-fiziksel çekirdek olarak dijital ikiz ve OT güvenliği birlikte düşünülmelidir. Sensör verisiyle beslenen dijital ikizler üzerinde “ne olur?” senaryolarının çalıştırılması; talep şoku, tedarikçi kesintisi veya liman tıkanıklığı gibi durumlarda çok ölçütlü politika seçimine yardımcı olabilir. IT–OT yakınsamasında NIST SP 800-82 Rev.3 rehberi, performans–güvenlik dengesini gözetken risk temelli uygulamalar için referans teşkil edebilir (Xu vd., 2024; NIST, 2023/2024).

Türkiye yazını; akıllı tedarik zinciri, dijital ikiz ve blokzincir eksenindeki araştırmaların işletme performansı, entegrasyon ve sürdürülebilirlik göstergelerine pozitif yansıyabileceğini ortaya koymaktadır. Çok ölçütlü değerlendirme çerçeveleri, geçişte kriterlerin ağırlıklandırılmasını ve yol haritasının yerelleştirilmesini kolaylaştırabilir (Karakoç vd., 2020; Oğuz ve Perçin, 2022).

3. YAPAY ZEKÂ VE MAKİNE ÖĞRENİMİ UYGULAMALARI

Yapay zekâ (YZ) ve makine öğrenimi (ML), tedarik zincirinin öngörü–öneri eksenini güçlendirerek hız–maliyet–hizmet dengesini yeniden kurabilir; aynı anda dayanıklılık ve sürdürülebilirlik metriklerinde de anlamlı kazanımlar üretebilir. Güncel yazın, YZ ile preskriptif analitiğin birlikte tasarlandığı durumlarda kesintilere karşı resilyansın artabileceğini, planlama ve yürütme döngülerinin kısalabileceğini ve operasyonel esnekliğin yükselebileceğini göstermektedir (Smyth vd., 2024; Xu vd., 2024). Sektör eğilim raporları da Generatif AI, AI etik, ses/konuşma AI, bilgisayarla görme ve gelişmiş analitik kümelerinin lojistikte önümüzdeki dönemi belirleyebileceğini; bu kümelerin depo otomasyonu, kalite kontrol, müşteri etkileşimi ve ağ optimizasyonuna geniş bir etki yelpazesıyla yayılabileceğini vurgulamaktadır (DHL Group, 2024).

Bu dönüşümün ilk ayağında talep ve lead-time öngörüsü yer alır. Ağaç tabanlı (XGBoost, Random Forest) ve derin öğrenme (LSTM, CNN-BiLSTM, Transformer) aileleri; promosyon, tatil, hava, arama trendleri gibi harici sinyaller eklendiğinde klasik istatistiksel modellere göre daha düşük hata ve

daha yüksek doğruluk sağlayabilir (Douaioui vd., 2024). Büyük ölçekli perakende uygulamalarının tarihçesi, farklı kategoriler ve milyonlarca SKU için birleşik tahmin mimarisinin kurulabildiğini; bunun yalnızca model seçimi değil, örgütsel kapasite ve MLOps mimarisinin de yeniden tasarlanmasını gerektirebileceğini göstermektedir (Hardesty, 2019). Bu çerçevede hiyerarşik/grup bazlı tahmin, soğuk başlangıç ürünlerde benzerlik aktarımı, talep rejim değişimlerini yakalamak için hibrit (ağaç + LSTM/Transformer) kurgu ve öznitelik mağazası ile tekrar kullanılabilir veri boru hatları öne çıkabilir (Douaioui vd., 2024; Hardesty, 2019).

Envanter koordinasyonu ikinci ayağı oluşturur. YZ/ML, çok kademeli (multi-echelon) ağlarda maliyet–servis–karbon hedeflerini birlikte ele alan preskriptif analitiği besleyebilir; emniyet stoklarını talep oynaklığı ve tedarik süresi belirsizliği ile uyumlu hâle getirebilir. Sistematik derlemeler, aralıklı talep ve uzun kuyruk SKU’larda derin öğrenme tabanlı yaklaşımların stok devir hızını ve taşıma maliyetini iyileştirebileceğini; ML tabanlı sınıflandırmaların (ör. ABC/XYZ) daha stabil politika üretimine katkı sunabileceğini belirtmektedir (Gutierrez vd., 2025; Smyth vd., 2024). Burada dijital ikiz kullanımı, “ne olur?” senaryolarında envanter politikalarının talep şoku, tedarikçi kesintisi veya liman tıkanıklığı gibi durumlarda çok ölçütlü değerlendirilmesini sağlayabilir; kararların saha gerçekleriyle uyumu böylece artabilir (Xu vd., 2024).

Tedarik ve satın alma kararlarında YZ; teslimat, kalite ve etik uyum göstergelerini finansal kırılganlık ve coğrafi/lojistik risklerle birleştirerek denetimli öğrenme ile skorlayabilir; NLP aracılığıyla haber, sosyal medya ve regülasyon metinlerinden erken uyarı sinyalleri çıkarabilir. Dijitalleşme yazını, bu çok kaynaklı veri çerçevelerinin kararların şeffaflığı ile izlenebilirliğini artırabileceğini; AI etik ve açıklanabilirlik ilkeleri olmadan saha kabulünün zayıflayabileceğini vurgular (Lu ve Taghipour, 2025; DHL Group, 2024). İzlenebilirliğin güçlendirilmesi amacıyla blokzincir tabanlı kayıtların YZ ile birlikte kullanılması; ürün kökeninin kanıtlanması, olay–zaman çizelgelerinin tutarlılığı ve sahtecilik riskinin azaltılması gibi alanlarda fayda üretebilir (Ellahi vd., 2023; Kamath, 2018).

Lojistik yürütme tarafında yaklaşık gerçek zamanlı görünürlük ve dinamik rota kararları öne çıkar. Gerçek zamanlı taşıma görünürlüğü (RTTVP) platformları; telemetri ve taşıyıcı sistemleri üzerinden ETA, gecikme ve tesis

performansı gibi göstergeleri üreterek kontrol kulelerine zamanında girdi sağlayabilir; bu sinyaller ML/RL tabanlı yeniden yönlendirme ve slot/kapasite kaydırma kararlarını çok hedefli (maliyet–zaman–karbon) ödül fonksiyonlarıyla güncelleyebilir (Gartner, 2024; DHL Group, 2024). Uygulamada, algoritmik başarı kadar değişim yönetimi, kullanıcı arayüzü tasarımı ve karar açıklanabilirliği de kritik olabilir; rota/plan kararlarının izah edilebilir olması, saha ekiplerinin kabul oranını yükseltebilir (Smyth vd., 2024).

Risk yönetimi bağlamında YZ; operasyon içi metrikler, finansal göstergeler ve dış çevre sinyallerini ensembler ile bütünleştirerek haftalar öncesinden yüksek etki bozulmaları öngörebilir. Derlemeler, RF/XGBoost/hibrid yaklaşımların doğruluk ve uyarlanabilirlik açısından öne çıkabildiğini; buna karşın dalga etkisi (ripple effect), açıklanabilirlik ve kullanıcı dostu panolar gibi alanlarda geliştirme gereksinimlerinin sürdüğünü belirtir (Smyth vd., 2024). Bu nedenle MLOps ve veri yönetişimi olmadan SL/UL akışlarının üretimde sürekliliği ve denetlenebilirliği zayıflayabilir; AI etik ve adalet çerçeveleri, tedarikçi–müşteri güveni açısından zorunlu görülebilir (DHL Group, 2024; Lu ve Taghipour, 2025).

Bütüncül bakışla, YZ-ML uygulamalarının talep–envanter–rota–risk zincirini ko-optimizasyon mantığında birleştirmesi; kararları tekil odaklardan çıkarıp sistem düzeyinde iyileştirebilir. Offline öğrenme ve dijital ikiz üzerinde güvenlik/uyum kısıtlı testlerle kademeli devreye alma stratejisi, sahadaki riski azaltabilir ve karar kalitesini sürdürülebilir biçimde yükseltebilir (Smyth vd., 2024; Xu vd., 2024). Bulgular Türkiye'deki ampirik içinde dijitalleşme ve entegrasyonun performansı olumlu yönde etkileyebileceğini göstermektedir ; bu faydaların önemli bir kısmı , iyileştirilmiş envanter politikaları ve tedarikçi entegrasyonundan kaynaklanabilir (Oğuz ve Perçin , 2022 ; Karakoç vd., 2020).Türkiye, dijitalleşme ve entegrasyonun performansı olumlu yönde etkileyebileceğini belirtmektedir ; bu faydaların önemli bir kısmı , iyileştirilmiş envanter politikaları ve tedarikçi entegrasyonundan kaynaklanabilir (Oğuz ve Perçin , 2022 ; Karakoç vd., 2020). Açıklanabilirlik, etik ve yönetişimin insan-yapay zeka işbirliği yoluyla entegrasyonu, kurumların yalnızca veriye dayalı değil, aynı zamanda hesap verebilir ve uyarlanabilir kararlar üretmesini sağlayabilir.

4. BÜYÜK VERİ, IOT VE GERÇEK ZAMANLI GÖRÜNÜRLÜK

Dijital tedarik zincirlerinde büyük veri–IoT–gerçek zamanlı görünürlük üçlüsü, operasyonların olay güdümlü biçimde izlenebilmesini ve kararların yaklaşık gerçek zamanlı güncellenebilmesini mümkün kılabilir. IoT sensörleri, RFID/GPS telemetri ve üretim/dağıtım sistemlerinden akan veriler; ne–nerede–ne zaman–hangi iş bağlamında sorularına yanıt üreten bir görünürlük katmanını besleyebilir. Bu katmanda standartlara dayalı veri modeli benimsenirse, çok paydaşlı ağlarda anlam birliği ve birlikte çalışabilirlik güçlenebilir; özellikle olay verisinin JSON/REST ile taşınması ve iş adımlarının ortak sözlük ile ifade edilmesi, farklı sistemlerin aynı durumu aynı şekilde yorumlamasını kolaylaştırabilir (GS1, t.y.; Xu vd., 2024).

Bu çerçevede GS1 EPCIS/CBV 2.0, izlenebilirlik ve görünürlük için bir olay mesajlaşma standardı olarak değerlendirilebilir. EPCIS; ürün/varlık hareketleri ve durum değişimlerini “ne oldu–nerede oldu–ne zaman oldu–hangi iş adımı oldu” ekseninde kaydedebilir; CBV ise bu olayları dolduran değerler için ortak sözlük sağlayabilir. Sektör uygulamalarında, sensör ölçümlerinin ve sertifikasyon bilgilerinin EPCIS olaylarına eklenmesi; soğuk zincir, gıda/ilaç ve elektronik gibi hassas alanlarda uygunluk ve kalite kanıtı üretmeyi kolaylaştırabilir. Bu yaklaşım, tedarik zinciri genelinde şeffaflık ve izlenebilirlik hedeflerine katkı sunabilir (GS1, t.y.; Ellahi vd., 2023).

Gerçek zamanlı taşıma görünürlüğü (RTTVP) katmanı, görünürlüğü ağ ve yürütme tarafını destekleyebilir. RTTVP platformları; taşıyıcı sistemleri ve telemetri kaynaklarından topladıkları akışla ETA, gecikme ve tesis/kapasite göstergeleri üretebilir; bu sinyaller kontrol kulelerine ve planlama sistemlerine yakın gerçek zamanlı geri besleme sağlayabilir. Yaklaşımlar; çok modlu izlemeyi ölçekleyebilmek, veri kalitesini ve kapsamını artırabilmek ve KPI’ları (zaman–servis–karbon) ortak bir dilde raporlayabilmek üzerine odaklanabilir (Gartner, 2024; DHL Group, 2024). Böyle bir entegrasyonda görünürlük verisi, talep–envanter–rota kararlarının preskriptif analitik ile birlikte ele alınmasını destekleyebilir; karar döngülerinin kısalmasına ve uyarlanabilirliğin artmasına katkı sunabilir (Smyth vd., 2024; Xu vd., 2024).

Veri mimarisi ve yönetim tarafında; olay akışlarının veri gölleri ve akış işlemeye uygun biçimde modellenmesi, meta-veri ve kök neden (root cause) ilişkilerinin korunması ve açıklanabilirlik/audit izi gereksiniminin gözetilmesi

önem kazanabilir. Kurumsal kabul için veri kalitesi, zaman damgası tutarlılığı, kimliklendirme (ürün–lokasyon–iş adımı) ve versiyonlama gibi ilkelere dikkat edilmesi; görünürlük sinyallerinden türeyen kararların izah edilebilir olması ve denetlenebilir kayıtlarla desteklenmesi gerekebilir (Lu ve Taghipour, 2025; Smyth vd., 2024). Bu noktada AI etik ve açıklanabilirlik ilkeleri; kararların tarafsızlık ve adil uygulama ihtiyaçlarını karşılayabilmesi için tamamlayıcı bir çerçeve sağlayabilir (DHL Group, 2024).

Güvenlik ve dayanıklılık boyutunda, OT/ICS ortamları için NIST SP 800-82 Rev.3 rehberi; risk temelli bir yaklaşımı ve IT–OT yakınsaması yaşanan yapılarda segmentasyon, erişim kontrolü ve izleme dengesini önerebilir. Rehber; performans–güvenlik–emniyet gereksinimlerinin bir arada gözetilmesini ve olay yanıtı ile tedarik zinciri güvenliği başlıklarının mimari tasarımın parçası olmasını vurgulayabilir. Bu çerçeve, gerçek zamanlı görünürlük sistemlerinin saha güvenliği ve emniyet koşullarıyla uyumlu biçimde devreye alınmasını kolaylaştırabilir (NIST, 2023/2024; Xu vd., 2024).

Sürdürülebilirlik ve regülasyon uyumu açısından görünürlük; karbon, enerji ve atık gibi çevresel göstergelerin operasyonel veriyle birlikte izlenebilmesini destekleyebilir. Sektör trend analizleri, lojistikte sürdürülebilir yakıtlar ve enerjinin listelendiği gibi başlıkların görünümüleri ve görünümüleriyle birlikte el ele sunumu çifte etki yaratabileceği vurgulanabilir. Bu yaklaşım tedarik zinciri raporlamasını ve saha karar destek sistemlerini aynı veri modelinde bir araya getirerek hedef uyumunu güçlendirebilir (Group, 2024; Lu ve Taghipour, 2025).

Genel olarak büyük veri, nesnelerin İnterneti, gerçek zamanlı görünürlük katmanını güvenli ve standartlara dayalı bir mimari üzerinde çalıştırmak, izlenebilirlik, operasyonel uyarlanabilirlik ve uzun vadeli performans gibi hedeflere ulaşmayı mümkün kılabilir. Güvenli ve standartlara dayalı bir mimari üzerinde büyük veri, Nesnelerin İnterneti (IoT) ve gerçek zamanlı görünürlük katmanı, izlenebilirlik, operasyonel uyarlanabilirlik ve uzun vadeli performans gibi hedeflere ulaşmayı mümkün kılabilir. Veri Kalite ve yönetim iyileştirilir. İyileştirildiğinde, görünürlükten gelen sinyaller talep, envanter, rota ve risk kararlarına daha sağlıklı bir şekilde iletilebilir. Açıklanabilir ve kontrol edilebilir kararlar almak, sinyaller kabulünü de artırabilir (Smyth vd., 2024; Xu vd., 2024). Görünürlükten kaynaklanan bilgiler, talep, envanter, rota ve risk kararlarına daha sağlıklı bir şekilde aktarılabilir. Açıklanabilir ve kontrol

edilebilir kararlar almak, saha kabulünü de artırabilir (Smyth vd., 2024; Xu vd., 2024).

5. BLOKZİNCİR VE DİJİTAL İKİZLER

Dönüşüm, tedarik zincirlerinin işleyiş biçimini büyük ölçüde değiştiren teknolojik paradigmaları ortaya çıkarabilir; bu, zincirleri yalnızca daha otomatik hale getirmekle kalmaz, aynı zamanda daha açık, izlenebilir, dayanıklı hale getirir ve karar alma süreçlerini daha verimli hale getirir. Blokzincir, çok paydaşlı ağlarda güvene dayalı veri paylaşımını mümkün kılarken, dijital ikizler de gelecekteki senaryoların dinamik analizine, simülasyonuna ve test edilmesine yardımcı olabilir. Çok paydaşlı ağlarda güvene dayalı veri paylaşımını mümkün kılan dijital ikizler, gelecekteki senaryoların dinamik analizine, simülasyonuna ve test edilmesine yardımcı olabilir. İki yaklaşım birlikte ele alındığında, tedarik zinciri yalnızca geçmiş olayları izleyen bir yapıdan, öngörücü ve kural koyucu karar alma sistemine dönüşebilir (Bandara & Buics, 2024; Xu vd., 2024).

Blokzincir teknolojisi, işlemleri ve olayları değiştirilemez bir şekilde kaydetmesi ve bunları bir mutabakat mekanizmasıyla doğrulamasıdır. Bu sistemin özelliği, işlemleri ve olayları değiştirilemeyecek şekilde kaydetmesidir. Olay tabanlı bir modelde "ne, nerede, ne zaman, nasıl ve neden" sorularını yanıtlayarak sensör verilerini, sertifikaları ve iş bağlamını tek bir veri sözlüğünde birleştirir. JSON-LD ve REST tabanlı mimariler, farklı ERP, WMS ve TMS sistemleri arasında anlam birliği sağlayabilir ve birlikte çalışabilirliği güçlendirebilir (GS1, t.y.).

Blokzincir ile EPCIS entegrasyonu, izlenebilirlik ve güvenli veri paylaşımı için güçlü bir çerçeve oluşturabilir. EPCIS deposu operasyonel sorgulama ve analitik işlevleri üstlenirken; blokzincir katmanı mutabakat ve kanıt mekanizması olarak konumlanabilir. Bu yapı, ürün yaşam döngüsü boyunca gerçekleşen olayların güvenilir ve doğrulanabilir biçimde kayıt altına alınmasını kolaylaştırabilir. Sahtecilik önleme açısından, tekil kimliklendirme (GTIN/SSCC) ve olay izi kombinasyonu ürün kökeninin doğrulanmasını destekleyebilir. Gizlilik gereksinimleri nedeniyle izinli blokzincirler, rol temelli erişim kontrolü ve seçimli açıklama mekanizmalarıyla uyum sağlayabilir. Kriptografik yöntemler, özellikle sıfır-bilgi ispatı (ZKP) gibi

yaklaşımlar, ticari sırları ifşa etmeden doğrulama yapmayı mümkün kılabilir (Ellahi vd., 2023; Al Maqousi & Alauthman, 2025).

Dijital ikizler, fiziksel varlıkların, süreçlerin veya ağların canlı verilerle güncellenen sanal temsillerini oluşturarak karar destek süreçlerini güçlendirebilir. Bu mimariler; sensörler, edge/fog bilişim, bulut platformları ve analitik bileşenleri bütünleştirerek gecikmeye duyarlı üretim ve lojistik senaryolarında gerçek zamanlı optimizasyonu destekleyebilir. Talep dalgalanmaları, tedarikçi kesintileri veya lojistik gecikmeler gibi belirsizlikler altında çoklu senaryo analizleri yürütülebilir ve maliyet, servis ve karbon hedefleri birlikte değerlendirilebilir. Bu yaklaşım, ağ dayanıklılığını artırabilir ve plan-fiil farkını azaltabilir (Guo & Mantravadi, 2025; Zamani vd., 2023).

Lojistik ağ tasarımı dijital ikizler, simülasyon ve optimizasyonun birlikte kullanılmasıyla talep-sunum dengesinin dinamik biçimde yönetilmesine katkı sunabilir. Çoklu senaryo analizleri, yakıt ve karbon fiyatı şokları veya liman tıkanıklıkları gibi belirsizlikler altında kararların test edilmesini mümkün kılabilir. Bu tür uygulamalar, toplam maliyet ve emisyonların azaltılmasına yardımcı olabilir. Görünürlük platformları (RTTVP) ve EPCIS olaylarıyla beslenen dijital ikizler, kararların daha hızlı ve uyarlanabilir biçimde güncellenmesini sağlayabilir (Gartner, 2024; DHL Group, 2024).

Bu bütünleşik yapı, yalnızca teknik entegrasyon değil; aynı zamanda güvenlik, yönetim ve sürdürülebilirlik ilkeleriyle desteklenmelidir. NIST SP 800-82 Rev.3 rehberi, OT/ICS ortamlarında risk temelli yaklaşımı ve IT-OT yakınsamasında segmentasyon, erişim kontrolü ve olay yanıtı gibi ilke setlerini önerebilir. Bu çerçeve, blokzincir ve dijital ikiz altyapılarının saha güvenliği ve uyum koşullarıyla birlikte devreye alınmasını kolaylaştırabilir (NIST, 2023/2024). Ayrıca, görünürlük ve izlenebilirlik katmanlarının karbon, enerji ve atık göstergeleriyle bütünleşmesi, raporlama ve karar desteği arasında hedef uyumunu güçlendirebilir (Lu & Taghipour, 2025).

Sonuç olarak, blokzincir ve dijital ikiz teknolojilerinin birlikte kullanımı, tedarik zincirlerinde şeffaflık, izlenebilirlik ve güveni artırabilir; aynı zamanda senaryo tabanlı optimizasyon ve gerçek zamanlı uyarılama kapasitesi sağlayabilir. Standartlara dayalı, güvenli ve açıklanabilir bir mimari üzerinde işletilen bu birleşik yapı, operasyonel uyarlanabilirlik ve sürdürülebilir

performans hedeflerine birlikte yaklaşmayı mümkün kılabilir (Bandara & Buics, 2024; Smyth vd., 2024).

6. TEKNOLOJİ-SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK İLİŞKİSİ

Dijital dönüşümün önceki bölümlerde ele alınan bileşenleri, tedarik zincirlerinde verimlilik ve dayanıklılık kazanımları sağlayabilir; ancak bu teknolojik dönüşümün çevresel ve sosyal maliyetleri göz ardı edildiğinde, “akıllı” tedarik zinciri söylemi kolayca yeşil yıkama riskine dönüşebilir. Veri merkezleri, iletişim ağları ve cihaz üretimi; enerji, su ve kritik ham madde tüketimiyle doğrudan bağlantılıdır. Küresel raporlar, dijital ekonominin elektrik tüketimindeki payının hızla artabileceğini ve bilgi-iletişim teknolojileri (ICT) sektörünün sera gazı salımlarının birçok ülkenin toplam emisyonlarını aşabilecek düzeye ulaşabileceğini belirtmektedir (UNCTAD, 2024; World Bank ve ITU, 2024; Ericsson, 2024).

Bu bağlamda, teknoloji ve sürdürülebilirlik arasındaki ilişki sadece "daha verimli bir yol " veya "daha iyi bir tahmin " olarak görülmemelidir. Aynı zamanda, dijital mimari tasarımının enerji yönetimi, döngüsel ekonomi, sosyal sorumluluk ve düzenleyici çerçevelerle uyumlu olması gerektiği anlamına da gelebilir. ISO 50001:2018/ Amd1: 2024 gibi standartlar, enerji yönetim sistemlerine iklim eylemi boyutunu ekleyerek dijital projelerin dahil edilmesini gerektirebilir. Enerji yönetim sistemlerine iklim eylemi boyutunu ekleyerek dijital projelerin de dahil edilmesini gerektiriyor.

Dijital teknolojiler (bulut, veri gölleri, yapay zeka, IoT/uç nokta) yapay zeka azaltmaya yardımcı olabilir) doğru şekilde kurulduklarında enerji kullanımını azaltmaya yardımcı olabilir ancak veri merkezlerinden ve yapay zeka iş yüklerinden kaynaklanan artan elektrik talebi, bu kazanımları dengelemeyi zorlaştırabilir. ABD Enerji Bakanlığı'ndan gelen raporlar, veri merkezlerinin elektrik tüketiminde önemli bir artış öngörüyor. Küresel tahminler de bilgi ve iletişim teknolojileri sektörünün enerji talebinin iki katına çıkabileceğini gösteriyor. ABD Enerji Bakanlığı, veri merkezlerinin elektrik tüketiminde önemli bir artış öngörüyor. Küresel tahminler de bilgi ve iletişim teknolojileri sektörünün enerji talebinin iki katına çıkabileceğini gösteriyor. (DOE/LBNL, 2024; WEF, 2025). Bu nedenle enerji yönetimi standartları, yük optimizasyonu ve 24/7 karbonsuz elektrik (CFE) gibi yaklaşımlar kritik rol oynayabilir. Uluslararası firmaların yol haritaları genellikle şu adımları

içerebilir: kapsamlı enerji/karbon envanteri çıkarma, veri merkezlerinde PUE ve soğutma teknolojilerini iyileştirme, yenilenebilir enerji PPA'ları ve yerinde üretim çözümleri geliştirme, tedarik zinciri yazılımlarında karbon maliyetini içeren optimizasyon fonksiyonları kurma (ISO, 2024; DHL Group, 2024).

Atık yönetimi ve döngüsel ekonomi (CE) boyutunda, dijital ürün pasaportu (DPP) gibi veri araçları CE'nin tedarik zincirine yerleşmesini kolaylaştırabilir. AB Döngüsel Ekonomi Eylem Planı, yaklaşımı, ürünlerin menşeyini, bileşenlerini, kullanım geçmişini ve geri dönüşüm seçeneklerini dijital olarak takip etmeyi zorunlu hale getirmeyi amaçlamaktadır. Uygulamalar, kritik minerallerin geri kazanılması ve ikinci yaşam senaryoları için veri tabanlı bir çerçeve oluşturabilir (Zhang ve Seuring, 2024; UNCTAD, 2024). Entegrasyon, şeffaflık, gerçek zamanlı izleme ve kaynak optimizasyonu yoluyla döngüsel ekonomiye katkıda bulunabilir; ancak maliyet, ölçeklenebilirlik ve düzenleyici engeller de dikkate alınmalıdır (Liu vd., 2023).

Sosyal sorumluluk ve etik tedarik ekseninde, AB'nin Kurumsal Sürdürülebilirlik Durum Tespiti Direktifi (CSDDD) gibi düzenlemeler, insan hakları ve çevresel etki açısından değer zincirinin sorumlu yönetimini zorunlu kılabilir. Bu durum, tedarik zincirlerinde sürekli izleme ve dijital izlenebilirlik altyapısının önemini artırabilir. EPCIS/GDSN tabanlı veri değişim mekanizmaları, sosyal uygunluk denetimlerinin bulgularını ve ürün/tesise özgü risk profillerini kurumsal sistemlere bağlayarak risk-temelli karar almayı destekleyebilir (GS1, 2025; SBTi, 2024).

Dijitalleşmenin sürdürülebilirlik paradoksu ise dikkatle yönetilmelidir. Yapay zeka/ sürekli öğrenme yönetimi (AI/LLM) iş yükleri, daha fazla enerji, su, soğutma ve malzeme gerektirdiğinden emisyonları azaltmayı zorlaştırabilir. Bu durum, verimliliği artırırken aynı zamanda enerji ve kaynak tüketimini de artırır. Bu nedenle dijital paranın yalnızca verimliliğin çıkışı üzerinden değil, net iklim etkisi ve toplumsal faydanın üzerinden değerlendirilmesi yapılabilir. ISO 50001 ve SBTi çerçeveleri, proje portföylerinin bu içeriklerinin çevresinde yeniden tartılmasını teşvik edebilir (ISO, 2024; SBTi, 2024).

Sonuç olarak, teknoloji ve sürdürülebilirlik arasındaki ilişki enerji yönetimi, döngüsel ekonomi, sosyal sorumluluk ve etik yönetim gibi boyutlarla birlikte ele aydınlatma, dijital dönüşümün uzun süreli değer yaratılması mümkün olabilir. Ancak, sadece maliyet ve hız avantajı değil, aynı zamanda

pazarlama ve sosyal uyum hedefleriyle dengelenmiş bir rekabet avantajı sağlıyor.

7. ENTEGRASYON ENGELLERİ VE YOL HARİTASI

Dijital dönüşümün tedarik zincirlerinde başarıya ulaşması, yalnızca algoritmaların doğruluğuna değil; altyapı, organizasyonel kapasite, uyum yönetimi ve insan faktörünün ne kadar iyi kurgulandığına bağlı olabilir. Teknolojilerin hızlı entegrasyonu, veri standardizasyonu, OT–IT yakınsaması ve enerji yönetimi gibi başlıklar, işletmeler için hem teknik hem de yönetim düzeyinde zorluklar doğurabilir. Bu nedenle dönüşüm, birbirinden kopuk projeler yerine bütüncül bir yol haritası ile ele alınmalıdır (Lu ve Taghipour, 2025; DHL Group, 2024).

Altyapı kısıtları sürecin ilk engelleri arasında yer alabilir. Veri merkezlerinin güç ve soğutma gereksinimleri, IoT ağlarının bant genişliği ve gecikme duyarlılığı, edge–bulut topolojisinin doğru tasarlanmasını gerektirebilir. Ulaştırma tarafında sıfır emisyonlu taşımacılık teknolojilerinin ölçeklenmesi, şarj/ikmal altyapısı ve maliyet kısıtları nedeniyle kademeli ilerleyebilir; bu nedenle kısa vadede rota optimizasyonu, modal kaydırma ve yük konsolidasyonu gibi verimlilik çözümleri öncelikli olabilir (DHL Group, 2024; Xu, Elomri vd., 2024).

Veri standardizasyonu ve birlikte çalışabilirlik, entegrasyonun merkezinde yer alabilir. EPCIS/CBV gibi küresel standartlar, olay ve karbon verisinin aynı semantik çatı altında yönetilmesini kolaylaştırabilir; bu yaklaşım hem operasyonel görünürlük hem de sürdürülebilirlik raporlaması için ortak bir dil oluşturabilir. Standartların uygulanması, API uyumluluğu ve eski sistemlerin göçü gibi adımlar, zaman ve maliyet açısından işletmeler için kritik planlama gerektirebilir (GS1, t.y.; Lu ve Taghipour, 2025).

İnsan kaynağı ve dijital beceriler, dönüşümün başarısında belirleyici olabilir. Endüstri 5.0 perspektifi, teknolojiyi yalnızca otomasyon aracı olarak değil; insan–makine iş birliğini güçlendiren bir unsur olarak konumlandırabilir. Bu nedenle çalışanların veri okuryazarlığı, süreç tasarımı ve enerji farkındalığı gibi alanlarda yetkinlik kazanması gerekebilir. Mikro öğrenme modülleri, pilot uygulamalar ve sürekli eğitim programları, saha kabulünü ve değişim yönetimini destekleyebilir (DHL Group, 2024; Smyth vd., 2024).

Yatırım ve finansal engeller, dijital dönüşümün hızını etkileyebilir. CapEx/OpEx dengesi; veri merkezlerinde enerji verimliliği yatırımları, bulut entegrasyonu ve lojistikte elektrifikasyon gibi başlıklar arasında bölünebilir. Karbon fiyatlama ve emisyon ticareti mekanizmaları, bu yatırımlar için ek teşvik sağlayabilir; ancak işletmelerin kısa vadede düşük maliyetli optimizasyon çözümlerini, orta vadede altyapı modernizasyonunu ve uzun vadede yenilenebilir enerji entegrasyonunu içeren aşamalı portföy yaklaşımı benimsemesi gerekebilir (Lu ve Taghipour, 2025).

Regülasyon ve uyum eksenini, dönüşümün kurumsal risk boyutunu belirleyebilir. CSRD ve CSDDD gibi sürdürülebilirlik raporlama yükümlülükleri, GDPR ve AI düzenlemeleri ile birlikte veri gizliliği ve siber güvenlik gereksinimleri, dijital projelerin yalnızca teknik değil aynı zamanda hukuki ve etik çerçevede yönetilmesini zorunlu kılabilir. Bu nedenle uyum haritaları, veri güvenliği planları ve AI yönetişimi, yol haritasının ayrılmaz parçaları hâline gelebilir (NIST, 2023/2024; DHL Group, 2024).

Sonuç olarak, entegrasyon engellerinin aşılması için standartlara dayalı veri mimarisi, enerji ve karbon yönetimi, insan merkezli dönüşüm ve regülasyon uyumu birlikte ele alınmalıdır. Yol haritası; görünürlük ve izlenebilirlik altyapısını güçlendiren, açıklanabilir ve etik AI kullanımını teşvik eden, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu bir çerçeveye oturtulduğunda, dijital dönüşüm yalnızca teknolojik bir hamle olmaktan çıkarak uzun vadeli değer yaratma aracına dönüşebilir (Smyth vd., 2024; Xu vd., 2024).

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada ortaya konulan kuramsal ve uygulamaya dönük çerçeve, dijital dönüşümün tedarik zincirleri açısından yalnızca teknolojik bir iyileştirme ya da operasyonel otomasyon süreci olmadığını; verinin temel üretim faktörüne dönüştüğü, çok katmanlı ve sistemik bir yeniden yapılanma süreci olduğunu açık biçimde ortaya koymaktadır. Siber-fiziksel sistemlerden Nesnelerin internetine, büyük veri analitiğinden yapay zekâyâ, blokzincir ve dijital ikizlere uzanan bu bütünleşik mimari, tedarik zincirlerini statik ve gecikmeli yapılardan; olay güdümlü, öğrenen ve uyarlanabilir değer ağlarına dönüştürmektedir. Bulgular, klasik hız–maliyet–hizmet üçlüsünün artık tek

başına rekabet üstünlüğü sağlamaya yetmediğini; dayanıklılık, izlenebilirlik ve sürdürülebilirliğin stratejik rekabet parametreleri hâline geldiğini göstermektedir.

Bölüm genelinde değerlendirildiğinde, dijital dönüşümün tedarik zincirlerinde yarattığı en kritik değişim, karar alma mantığının doğasında gerçekleşmektedir. Dönemsel ve varsayım dayalı planlama anlayışı yerini; gerçek zamanlı veriyle beslenen, belirsizlik altında çalışan ve çok ölçütlü optimizasyonu mümkün kılan karar sistemlerine bırakmaktadır. IoT, RTTVP ve EPCIS 2.0 gibi standartlar aracılığıyla elde edilen bağlamsal görünürlük; yapay zekâ destekli öngörücü ve önerisel analitikle birleştiğinde, işletmelerin yalnızca ne olduğunu değil, ne olabileceğini ve ne yapılması gerektiğini aynı anda değerlendirmesine olanak tanımaktadır. Dijital ikizlerin bu mimari içerisindeki rolü, stratejik, taktik ve operasyonel karar ufuklarını tek bir veri modelinde birleştirerek plan–fiil farkını azaltmak ve senaryo tabanlı öğrenmeyi kurumsal bir yetkinlik hâline getirmektir.

Çalışma kapsamında öne çıkan bir diğer temel bulgu, blokzincir ve standartlaştırılmış izlenebilirlik altyapılarının tedarik zinciri yönetişimini dönüştürdüğüdür. EPCIS 2.0 ve benzeri üst-standartlar ile blokzincirin birlikte kullanımı, kurumlar arası güveni kişilerden ve sözlü taahhütlerden bağımsız, veriye dayalı ve denetlenebilir bir zemine taşımaktadır. Akıllı sözleşmeler aracılığıyla performans, kalite ve sürdürülebilirlik kriterlerinin otomatik olarak icra edilebilir hâle gelmesi, tedarikçi yönetimini reaktif denetim anlayışından proaktif ve delile dayalı bir yönetim modeline dönüştürmektedir. Bu durum, yalnızca operasyonel uyumsuzlukları azaltmakla kalmamakta; aynı zamanda regülasyon uyumu, etik tedarik ve kurumsal itibar açısından da yapısal bir avantaj yaratmaktadır.

Bununla birlikte bulgular, dijital dönüşümün çevresel ve sosyal boyutlarda otomatik olarak sürdürülebilirlik sağlayan bir süreç olmadığını da açıkça göstermektedir. Veriye dayalı optimizasyon, rota iyileştirme ve kaynak verimliliği potansiyel olarak karbon ve atık azaltımı sağlarken; artan veri merkezleri, yapay zekâ iş yükleri ve iletişim altyapıları enerji ve su tüketimini büyütebilmektedir. Bu durum literatürde giderek daha sık vurgulanan “dijitalleşmenin sürdürülebilirlik paradoksu”nu doğrulamakta; dijital tedarik zinciri projelerinin başarısının yalnızca operasyonel KPI’larla değil, net çevresel etkiyi de içeren bütüncül performans ölçütleriyle değerlendirilmesini

zorunlu kılmaktadır. Dolayısıyla dijital dönüşüm, iklim hedefleri, enerji yönetimi ve döngüsel ekonomi ilkeleriyle eş zamanlı kurgulanmadığı sürece uzun vadede yeni finansal ve itibari riskler üretebilir.

Stratejik düzeyde değerlendirildiğinde, dijital dönüşümün tedarik zincirlerinde yarattığı rekabet avantajı ölçek ekonomisinden çok öğrenme hızı ve duyarlı orkestrasyon kapasitesi üzerinden şekillenmektedir. VUCA ve BANI koşullarında başarılı olan yapılar; erken uyarı sinyallerini hızla anlamlandırabilen, alternatif tedarik ve dağıtım senaryolarını eş zamanlı test edebilen ve saha ile merkez arasındaki karar döngüsünü kapalı çevrim hâline getirebilen zincirlerdir. Bu çerçevede dijital görünürlük, yalnızca iç operasyonlar için değil; müşteri deneyimi, proaktif iletişim ve değer teklifi inovasyonu açısından da stratejik bir rol oynamaktadır. Müşteriye dönük şeffaflık ve güvenilir teslimat vaadi, dijital tedarik zincirlerini arka ofis verimliliğinin ötesine taşıyarak doğrudan rekabetçi konumlanmanın bir parçası hâline getirmektedir.

Uygulamaya yönelik olarak, çalışmanın sonuçları dijital dönüşümün önündeki engellerin çoğu zaman teknik olmaktan ziyade organizasyonel, yönetsel ve finansal nitelikte olduğunu göstermektedir. Veri standardizasyonu, eski sistemlerin dönüşümü, saha operasyonlarının yeni karar mantığına uyumu ve insan kaynağının yetkinlik dönüşümü; teknolojik kurulumdan çok daha uzun soluklu süreçlerdir. Bu nedenle dijital dönüşümün, birbirinden kopuk teknoloji projeleri yerine; veri mimarisi, süreç tasarımı, insan-makine iş birliği ve regülasyon uyumunu birlikte ele alan bütüncül bir yol haritası olarak kurgulanması kritik önem taşımaktadır. Endüstri 5.0 perspektifi bu noktada, insanı sistemin merkezinde tutan, açıklanabilir ve etik yapay zekâ kullanımını önceleyen, güvenlik ve iş sağlığını dijitalleşmenin ayrılmaz parçası olarak gören bir yaklaşımı zorunlu kılmaktadır.

Geleceğe yönelik öneriler, bu bütünsel çerçeve içinde değerlendirildiğinde, beş temel doğrultuda yoğunlaşmaktadır. İlk olarak, mimari düzeyde edge-bulut ayrıştırmasına dayalı, veri egemenliği ve gecikme duyarlılığını gözetken tasarımlar benimsenmelidir. İkinci olarak, veri standardizasyonu ve birlikte çalışabilirlik, EPCIS/CBV 2.0 gibi küresel standartlar temelinde tedarik zincirinin tamamına yayılmalı; izlenebilirlik, karbon ve sertifikasyon verileri aynı semantik çatı altında yönetilmelidir. Üçüncü olarak, yapay zekâ ve optimizasyon yaklaşımları dijital ikiz

ortamlarında ko-optimize edilmeli; belirsizlik duyarlı, çok hedefli ve açıklanabilir karar politikaları geliştirilmelidir. Dördüncü olarak, siber güvenlik, mahremiyet ve etik yönetim; OT-IT yakınsamasının doğal bir bileşeni olarak ele alınmalı ve düzenleyici çerçevelerle uyumlu biçimde kurumsallaştırılmalıdır. Son olarak, dijital dönüşüm yatırımları enerji yönetimi, karbon azaltımı ve finansal sürdürülebilirlikle birlikte değerlendirilerek “ikiz dönüşüm” yaklaşımı hayata geçirilmelidir.

Sonuç itibarıyla bu bölüm, dijital dönüşümün tedarik zincirlerinde yarattığı dönüşümün tek bir teknolojiye indirgenemeyeceğini; asıl değer, standartlara dayalı veri ekosistemleri, öğrenen analitik sistemler, dijital ikizler ve güven temelli yönetişimin bütünleşik biçimde uygulanmasından doğduğunu ortaya koymaktadır. Dijital tedarik zinciri vizyonu, şirketlerin iş modeli, finansal planlaması ve insan kaynağı stratejisiyle birlikte ele alındığında; belirsizlik çağında hem çevik hem dayanıklı, hem rekabetçi hem de sürdürülebilir değer ağları kurmak mümkün hâle gelmektedir. Bu bütünsel yaklaşım benimsendiğinde, dijital dönüşüm geçici bir teknoloji hamlesi değil, uzun vadeli ve sürdürülebilir büyümenin ana taşıyıcısı olarak konumlanmaktadır.

KAYNAKÇA

- Al Maqousi¹, A., & Alauthman, M. Enhancing Privacy and Usability in Blockchain Traceability Systems.
- Hardesty, L. (2019). The history of Amazon's recommendation algorithm. Amazon Science, 22.
- Bandara, L. V., & Buics, L. (2024). Digital twins in sustainable supply chains: A comprehensive review of current applications and enablers for successful adoption. Engineering Proceedings, 79(1), 64.
- Cui, P., Dixon, J., Guin, U., & Dimase, D. (2019). A blockchain-based framework for supply chain provenance. IEEE Access, 7, 157113–157125.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2940645>
- DHL Group. (2024). Logistics Trend Radar 7.0: Emerging AI trends and sustainable solutions. Erişim Adresi: <https://www.dhl.com/discover/en-global/news-and-insights/reports-and-press-releases/logistics-trend-radar-2024>
- DOE/LBNL. (2024). 2024 report on U.S. data center energy use. Erişim Adresi: <https://escholarship.org/uc/item/32d6m0d1>
- Douaioui, K., Oucheikh, R., Benmoussa, O., & Mabrouki, C. (2024). Machine Learning and Deep Learning Models for Demand Forecasting in Supply Chain Management: A Critical Review. Applied System Innovation (ASI), 7(5).
- Ellahi, R. M., Wood, L. C., & Bekhit, A. E. D. A. (2023). Blockchain-based frameworks for food traceability: a systematic review. Foods, 12(16), 3026.
- FourKites. (2024). FourKites named a Leader in the 2024 Gartner® Magic Quadrant™ for Real-Time Transportation Visibility Platforms. Erişim Adresi: <https://www.fourkites.com/press/fourkites-named-a-leader-in-the-2024-gartner-magic-quadrant-for-fourth-consecutive->

year/#:~:text=%E2%80%94April%202024%20%E2%80%94Leading,Visibility%20Platforms*%20(RTTVPs).

Gartner. (2024). Magic Quadrant for Real-Time Transportation Visibility Platforms. Erişim Adresi: <https://www.gartner.com/reviews/market/real-time-transportation-visibility-platforms>

GS1. (t.y.). EPCIS & CBV 2.0. Erişim Adresi: <https://www.gs1.org/standards/epcis>

GS1. (2025). EPCIS/GDSN implementation guideline for exchanging carbon footprint data. Erişim Adresi: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://gs1.eu/wp-content/uploads/2025/02/GDSN-Implementation-Guideline-for-exchanging-Carbon-Footprint-Data-3.pdf>

Guo, D., & Mantravadi, S. (2025). The role of digital twins in lean supply chain management: review and research directions. *International journal of production research*, 63(5), 1851-1872.

Gutierrez, J. C., Polo Triana, S. I., & León Becerra, J. S. (2025). Benefits, challenges, and limitations of inventory control using machine learning algorithms: A literature review. *OPSEARCH*, 62, 1140–1172.

ISO. (2023). ISO 14083: Greenhouse gases—Quantification and reporting of GHG emissions arising from transport chain operations. Erişim Adresi: <https://www.iso.org/standard/78864.html>

ISO. (2024). ISO 50001:2018/Amd1:2024—Energy management systems: Climate action changes. Erişim Adresi: <https://www.iso.org/standard/88430.html>

Kamath, R. (2018). Food traceability on blockchain: Walmart's pork and mango pilots with IBM. *Journal of the British Blockchain Association*, 1(1).

Karakoç, N., Eren, T., & Özcan, E. (2020). Sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi için Endüstri 4.0'daki zorlukların değerlendirilmesi. *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 31(2), 215–233.

- Liu, L., Song, W., & Liu, Y. (2023). Leveraging digital capabilities toward a circular economy: Reinforcing sustainable supply chain management with Industry 4.0 technologies. *Computers & Industrial Engineering*, 178, 109113.
- Lu, X., & Taghipour, A. (2025). A review of supply chain digitalization and emerging research paradigms. *Logistics*, 9(2), 47.
- NIST. (2023/2024). SP 800-82 Rev.3: Guide to operational technology (OT) security. Erişim Adresi: <https://csrc.nist.gov/pubs/sp/800/82/r3/ipd>
- Oğuz, A., & Perçin, S. (2022). Tedarik zinciri entegrasyonu ve dijitalleşmenin performansı etkisi. *H.Ü. İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 40(4), 837–860.
- Samuels, A. (2024). Examining the integration of artificial intelligence in supply chain management from Industry 4.0 to 6.0: A systematic literature review. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 7.
- Štreimikienė, D., Bathaei, A., & Streimikis, J. (2025). Enhancing sustainable global supply chain performance: A multi-criteria decision-making-based approach to Industry 4.0 and AI integration. *Sustainability*, 17(10), Article 4453.
- Smyth, C., Dennehy, D., Fosso Wamba, S., Scott, M., & Harfouche, A. (2024). Artificial intelligence and prescriptive analytics for supply chain resilience: A systematic literature review and research agenda. *International Journal of Production Research*, 62(23), 8537–8561.
- Terzi, S., Gür, Ş., & Eren, T. (2020). Sürdürülebilir tedarik zincirine Endüstri 4.0 etkisinin çok ölçütlü karar verme yöntemleri ile değerlendirilmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(2), 843–863.
- Toprak, B., & Nebati, E. E. (2024). Dijital tedarik zincirinin gelişen trendleri: Bibliyometrik bir değerlendirme. *Uluslararası Yönetim Akademisi Dergisi*.

- UNCTAD. (2024). Digital economy report 2024. Erişim Adresi: <https://unctad.org/publication/digital-economy-report-2024>
- WEF. (2025). How data centres can avoid doubling energy use by 2030. Erişim Adresi: <https://www.weforum.org/stories/2025/12/data-centres-and-energy-demand/>
- World Bank & ITU. (2024). Measuring the emissions and energy footprint of the ICT sector. Erişim Adresi: <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099121223165540890>
- Xu, Z., Elomri, A., Baldacci, R., Kerbache, L., & Wu, Z. (2024). Frontiers and trends of supply chain optimization in the age of Industry 4.0: An operations research perspective. *Annals of Operations Research*, 338(2), 1359–1401.
- Zamani, E. D., Smyth, C., Gupta, S., & Dennehy, D. (2023). Artificial intelligence and big data analytics for supply chain resilience: A systematic literature review. *Annals of Operations Research*, 327(2), 605–632.
- Zhang, A., & Seuring, S. (2024). Digital product passports for sustainable and circular supply chain management. *International Journal of Logistics Research and Applications*.

BÖLÜM 3

DİJİTAL ÇAĞDA TEDARİK ZİNCİRİ DİRENÇLİLİĞİ VE ESNEKLİĞİ: YAPAY ZEKÂ DESTEKLİ MODELLER VE STRATEJİLER

Dr. Öğr. Üyesi Biray KOÇAK¹

¹ İstanbul Gelişim Üniversitesi, İktisadi İdari ve Sosyal Bilimler Fakültesi, Lojistik Yönetimi Bölümü, İstanbul, Türkiye. bkocak@gelisim.edu.tr, orcid id: 0000-0002-0297-2976

1. GİRİŞ

1.1. Arka Plan ve Problem Tanımı

Küresel tedarik zincirleri COVID-19 pandemisi, jeopolitik gerilimler, enerji ve hammadde darboğazları gibi ardışık krizler sonucunda benzeri görülmemiş kırılganlıklar yaşamıştır.

Bu gelişmeler, işletmelerin yalnızca operasyonel verimlilik odaklı yapılarını yeniden değerlendirmesini değil, aynı zamanda dijitalleşme ve yapay zekâ temelli analitik sistemleri dirençlilik perspektifinden ele almasını gerekli kılmıştır (Shi vd., 2022; Ivanov, 2020). Bu bölümün temel amacı, dijital çağda tedarik zinciri dirençliliğini oluşturan dinamikleri güncel literatür ışığında incelemektir. Bu doğrultuda, yapay zekâ destekli risk tahmini ve karar destek yaklaşımları kavramsal bir bütünlük içinde sunularak mevcut akademik eğilimler sistematik biçimde organize edilmiştir. Böylelikle tedarik zincirlerinin dijital dönüşüm bağlamında nasıl daha sağlam, esnek ve uyarlanabilir yapılar hâline gelebileceği konusunda akademik ve uygulamalı bir çerçeve ortaya konulmaktadır (Nayal vd., 2021).

1.2. Amaç, Araştırma Soruları ve Katkı

Bu bölümün temel amacı, dijital dönüşümün tedarik zinciri dirençliliği üzerindeki etkisini çok katmanlı bir bakış açısıyla ele almaktır. Özellikle Yapay Zekâ (YZ), büyük veri analitiği, IoT ve dijital ikizler gibi teknolojilerin; risk yönetimi, esneklik ve çeviklik boyutlarındaki rolü kuramsal ve uygulamalı bir çerçevede incelenmiştir (Duttyal, 2025; Wu, 2023). Bu doğrultuda bölüm aşağıdaki araştırma sorularına yanıt aramaktadır:

- YZ tabanlı modeller, tedarik zincirlerinde risklerin erken aşamada tespit edilmesine nasıl katkı sağlamaktadır?
- Dijital ikizler ve simülasyon tabanlı stres testleri, kesintilere karşı hazırlık seviyesini nasıl artırmaktadır?
- Esnek kapasite planlaması ve optimizasyon teknikleri, belirsizlik koşullarında karar verme süreçlerini nasıl iyileştirmektedir?
- Teknoloji odaklı dirençlilik stratejileri, sürdürülebilirlik ve ESG hedefleriyle nasıl uyumlaştırılabilir?

Bu bölümün literatüre katkısı üç yönlüdür: (i) Dirençlilik ve esnekliği dijital dönüşüm perspektifiyle bütünleştiren kavramsal bir çerçeve sunulmuştur, (ii) YZ tabanlı modellerin pratik kullanım alanları sistematik biçimde açıklanmıştır, (iii) Politika yapıcılar için uygulanabilir bir yol haritası ortaya konulmuştur (Mari vd., 2014; Shi vd., 2022).

1.3. Kapsam ve Sınırlar

Bu çalışma, tedarik zinciri dirençliliğini teknoloji odaklı bir yaklaşımla incelemekle birlikte, özellikle YZ destekli risk tahmini, kırılabilirlik analizi, esnek kapasite planlaması ve dijital ikiz tabanlı stres testlerine odaklanmaktadır (Li vd., 2020). Bölüm, makro düzeyde tedarik zinciri ağ yapısını, veri mimarisini ve stratejik yönetim ilkelerini ele alırken, firma içi operasyonel mikro süreçler (ör. bireysel çalışan performansı) kapsam dışı bırakılmış; ancak dirençliliği etkileyen organizasyonel kültür ve yönetim boyutlarına stratejik düzeyde değinilmiştir (Riley vd., 2016). Bu yaklaşım, konuyu kitap bölümü formatına uygun biçimde hem teorik hem pratik yönleriyle derinleştirmeyi mümkün kılmaktadır.

1.4. Bölümün Yapısı

Bölüm, dijital çağda tedarik zinciri dirençliliğini teknoloji ekseninde ele alacak şekilde yapılandırılmıştır. İlk olarak 2 ve 3. başlıklarda kavramsal çerçeve ve literatürdeki boşluklar incelenmiştir. 4'te dijital çağın risk ve kırılabilirlik dinamikleri analiz edilmiştir. Bölümün analitik çekirdeğini oluşturan 5'te YZ destekli risk tahmini modelleri detaylandırılmış; bunu takiben stres testleri (6), esnek kapasite planlama (7) ve dijital kontrol kuleleri (8) ele alınmıştır. Çalışma, sektörel uygulama örneklerinin (9) ardından kuramsal katkılar, sınırlılıklar ve gelecek perspektifini içeren sonuç bölümleriyle (10-12) tamamlanmıştır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE: DİRENÇLİLİK, ESNEKLİK, KIRILGANLIK VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

2.1. Tedarik Zinciri Dirençliliği: Kavram ve Boyutlar

Tedarik zinciri dirençliliği, bir sistemin beklenmedik şoklar karşısında performansını koruma ve hızlı toparlanma kapasitesidir (Blackhurst vd., 2011;

Ambulkar vd., 2014). Literatür, işletmelerin risklere tepki veren pasif yapıdan, belirsizlikleri öngören proaktif bir yapıya dönüşmesi gerektiğini vurgular. Güncel çalışmalar dirençliliği üç temel boyutta incelemektedir (Craighead vd., 2007):

- Absorptive Kapasite: Şokun etkisini en aza indirecek tampon mekanizmaları (güvenlik stoğu, alternatif tedarikçiler vb.) içerir.
- Adaptive Kapasite: Sistemin bozulma sonrası esnek kaynak tahsisi ve hızlı karar alma süreçleriyle yeniden dengeye gelmesini sağlar.
- Transformative Kapasite: Sistemin yaşanan şoklardan öğrenerek kalıcı yapısal değişikliklere gitme ve kendini yeniden tasarlama becerisini ifade eder.

2.2. Esneklik, Çeviklik ve Sağlamlık: Kavramların Ayırımı ve Tamamlayıcılığı

Dirençlilik kavramı çoğu zaman esneklik (flexibility), çeviklik (agility) ve sağlamlık (robustness) kavramlarıyla birlikte anılmaktadır (Braunscheidel ve Suresh, 2008). Bu kavramlar birbiriyle ilişkili olsa da, tedarik zincirlerini tasarlarırken farklı roller üstlenirler.

Esneklik, bir tedarik zincirinin değişen koşullara hızlı biçimde yanıt verebilmesini sağlayan kapasitedir. Ürün karması esnekliği, üretim esnekliği, lojistik mod esnekliği ve tedarikçi değişim esnekliği bu kapsamda en sık vurgulanan türlerdir. Esneklik, özellikle talep belirsizliği yüksek sektörlerde kritik bir rol oynar.

Çeviklik, daha çok hız ve tepki verme kapasitesi ile ilişkilidir (Nayal vd., 2021). Çevik tedarik zincirleri, ani piyasa değişimlerini hızlı bir şekilde algılayıp buna uygun kararlar alabilen yapılar olarak tanımlanır. Dijitalleşme, sensör verileri ve gerçek zamanlı görünürlük çözümleri çevikliği doğrudan artıran bileşenlerdir.

Sağlamlık, şoklara rağmen performansın bozulmamasını ifade eder. Sağlam bir sistem bozulmayı tamamen ortadan kaldırmasa da şokların etkisini belirli bir eşik içinde tutabilir. Bu anlamda sağlamlık daha statik, çeviklik ise daha dinamik bir kapasiteyi temsil eder.

Bu üç kavram birlikte değerlendirildiğinde, tedarik zincirinin farklı risk türlerine karşı çok katmanlı bir savunma yapısı kurması mümkün olur. Örneğin bir sistem aynı zamanda sağlam (yüksek dayanım), esnek (alternatif üretim hatlarına geçebilir) ve çevik (hızlı karar verir) olduğunda dirençlilik kapasitesi katlanarak artar.

2.3. Kırılabilirlik Türleri ve Sistemik Risk

Kırılabilirlik, tedarik zincirinin şoklara karşı duyarlılığını belirleyen temel bir bileşendir ve risk yönetimi stratejilerinin etkili biçimde tasarlanabilmesi için kırılabilirliğin kaynaklarının doğru tanımlanması gerekir (Wagner ve Bode, 2008). Literatürde kırılabilirlik türleri genellikle talep kırılabilirliği, arz kırılabilirliği, lojistik ve altyapı kırılabilirliği, finansal kırılabilirlik, politik-jeopolitik kırılabilirlik ve siber kırılabilirlik olmak üzere altı kategoride incelenmektedir.

- Talep kırılabilirliği, tüketici tercihleri ve piyasa koşullarındaki ani dalgalanmaların yarattığı belirsizliği ifade eder.
- Arz kırılabilirliği, tedarikçilerin kapasite sorunları, iflas riski, kalite problemleri ve coğrafi riskler nedeniyle ortaya çıkar.
- Lojistik kırılabilirlik, liman darboğazları, navlun dalgalanmaları, ulaştırma altyapısının bozulması ve sınır geçişlerinde yaşanan aksamaları kapsar.
- Siber kırılabilirlik, artan dijitalleşme ile daha kritik hâle gelmiş; veri ihlalleri, sistem kesintileri ve ransomware saldırıları tedarik zincirlerinde operasyonel duruşlara neden olmuştur.

Kırılabilirliğin en önemli boyutlarından biri, **sistemik etkidir**. Bir tedarik zincirindeki küçük bir bozulma—örneğin düşük seviyeli bir tedarikçiye yaşanan üretim kesintisi—çok katmanlı ağ yapısı nedeniyle beklenenden çok daha geniş bir etki yaratabilir (Li vd., 2020; Ivanov, 2020). Bu domino etkisi, kırılabilirliğin yalnızca tekil noktalardan değil, ağ yapısının genelinden kaynaklandığını göstermektedir. Bu nedenle kırılabilirlik analizi günümüzde yalnızca maliyet veya stok düzeyi gibi yerel göstergelere değil, **ağ bilimi** yaklaşımıyla sistemin bütününe odaklanmaktadır.

2.4. Sürdürülebilirlik ve ESG Boyutunun Dirençlilikle İlişkisi

Sürdürülebilirlik ve ESG (Çevresel, Sosyal, Yönetişim) kriterleri, modern risk yönetiminin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir (Mari vd., 2014). Çevresel boyut (E), iklim kaynaklı fiziksel risklerin operasyonel kesintilere yol açabilmesi nedeniyle doğrudan dirençlilikle ilişkilidir. Sosyal boyut (S), tedarikçi çalışma koşulları ve insan hakları ihlallerinin yaratabileceği itibar ve tedarik risklerini kapsar. Yönetişim boyutu (G) ise veri şeffaflığı ve etik karar alma süreçlerini içerir.

Bu boyutlar genellikle birbirini güçlendirse de, bazı durumlarda maliyet ve esneklik arasında ödünleşim (trade-off) gerektirebilir; örneğin karbon emisyonunu azaltmak için yerel tedarikçilere geçiş, maliyet artışına neden olabilir (Fahimnia vd., 2015). Bununla birlikte yakın tarihli bulgular, ESG konusundaki yasal belirsizliklerin firmaların stok yönetim politikalarında daha korumacı davranmasına yol açtığını ve bunun da kısa vadede operasyonel esnekliği kısıtlayabildiğini ortaya koymaktadır (Lin ve Li, 2024).

2.5. Dijital Tedarik Zinciri İkizleri ve Antikırılğanlık

Dijital tedarik zinciri ikizleri (Digital Supply Chain Twins), fiziksel zincirin gerçek zamanlı veriyle beslenen dinamik bir simülasyonudur (Duttyal, 2025). Bu teknoloji, "ne olursa" senaryolarını test ederek risklerin erken tespit edilmesini ve kapasite planlamasının optimize edilmesini sağlar. Dijital ikizlerin sağladığı bu öngörü yeteneği, Taleb (2012) tarafından ortaya atılan anti kırılğanlık (antifragility) kavramıyla yakından ilişkilidir. Anti kırılğanlık, bir sistemin şoklardan yalnızca sağ çıkmasını değil, bu şoklardan öğrenerek güçlenmesini ifade eder. YZ destekli dijital ikizler, belirsizlikleri modelleyerek sistemin kendini sürekli iyileştirmesine olanak tanır (Ivanov, 2020). Literatürdeki vaka analizleri ve simülasyon çalışmaları, dijital ikiz entegrasyonunun tedarik zinciri bozulma sürelerini belirgin ölçüde azaltabileceğini ve operasyonel toparlanma süreçlerinde önemli verimlilik artışları sağlayabileceğini işaret etmektedir (Ivanov ve Dolgui, 2020).

3. LİTERATÜR TARAMASI VE ARAŞTIRMA BOŞLUKLARI

3.1. Klasik Tedarik Zinciri Dirençliliği Literatürü

Tedarik zinciri dirençliliği literatürü ilk olarak 2000’li yılların başında küresel tedarik ağlarının kırılgan yapısını açıklamaya yönelik kavramsal çerçeveler ile gelişmiştir. Christopher ve Peck (2004), Rice ve Sheffi (2005) ve Pettit, Fiksel ve Croxton (2010) gibi öncü çalışmalar, dirençliliği “öngörülemeyen bozulmalara karşı sistem performansını koruma ve hızlı toparlanma kapasitesi” olarak tanımlamış, risk kaynaklarını tedarik, talep, süreç ve ağ yapısı bağlamında sınıflandırmıştır (Blackhurst vd., 2011).

Bu dönem çalışmaları çoğunlukla reaktif yaklaşımlara dayanmış; güvenlik stoku artırma, alternatif tedarikçi kullanma ve coğrafi çeşitlendirme gibi tampon stratejiler ön plana çıkmıştır. Yakın tarihli çalışmalar da envanter yönetiminin dirençlilikteki kritik rolünü doğrulamakta, ancak klasik stok politikalarının dijital entegrasyon olmadan yetersiz kaldığını vurgulamaktadır (Guo vd., 2024). Bununla birlikte, bu literatür tedarik zincirlerinin dinamik yapısını yeterince yansıtamayan statik modellere dayanması nedeniyle günümüzün hızlı değişen risk ortamını açıklamada sınırlı kalmıştır.

3.2. Dijitalleşme ve YZ Destekli Dirençlilik Literatürü

2010 sonrası dönemde büyük veri, IoT ve makine öğrenimi teknolojilerinin yaygınlaşmasıyla birlikte dirençlilik literatürü daha veri odaklı, öngörücü ve proaktif yöntemlere yönelmiştir (Shi vd., 2022; Singh vd., 2024). Büyük veri analitiği, hem tedarik zinciri görünürlüğünü artırmakta hem de risk sinyallerini erken aşamada tespit etmeyi mümkün kılmaktadır.

Özellikle Enyejo vd. (2024), dijital ikiz teknolojisinin ve kestirimci analitiğin (predictive analytics), yalnızca risk azaltımı sağlamadığını, aynı zamanda sürdürülebilir proje yönetimi hedefleriyle de doğrudan örtüştüğünü ortaya koymuştur. Bu dönemin literatürü özellikle ağ analitiği, anomali tespiti, risk tahmini, çok amaçlı optimizasyon ve senaryo simülasyonları gibi teknikleri dirençlilik bağlamında ele almıştır (Nayal vd., 2021; Li vd., 2020). Ancak bu araştırmaların çoğu belirli bir teknolojiye odaklandığından, teknolojilerin birbirleriyle entegrasyonuna ve bütüncül bir dirençlilik mimarisinin geliştirilmesine yeterince yer verilmemiştir.

3.3. Sürdürülebilirlik ve ESG Odaklı Dirençlilik Çalışmaları

Son yıllarda dirençlilik literatürü, sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi ile güçlü bir kesişim göstermeye başlamıştır.

İklim değişikliği, karbon emisyonu, kaynak verimliliği, sosyal sorumluluk ve yönetim gibi ESG boyutları, tedarik zinciri risklerini hem artıran hem de yeni çözüm alanları yaratan faktörler hâline gelmiştir. İklim kaynaklı felaketler fiziksel altyapının bozulmasına yol açarken, sosyal uyumsuzluklar tedarikçi bazı kesintilere neden olabilmektedir. Yun ve Ülkü (2023), iklim değişikliğinin yarattığı yeni risk ortamında sürdürülebilir risk yönetiminin opsiyonel bir tercih değil, bir zorunluluk olduğunu belirterek literatürdeki bu eğilimi "iklim-odaklı dirençlilik" (climate-changed world resilience) olarak tanımlamıştır. Bu nedenle modern literatürde dirençlilik, giderek daha fazla sürdürülebilirlik hedefleri ile tasarlanan bir kapasite olarak görülmektedir.

3.4. Tematik Literatür Haritası (Pre-Digital → Digital-Enabled → AI-Native)

Dirençlilik literatürü kronolojik olarak üç ana dönemde incelenebilir:

- Pre-digital dönem, daha çok kavramsal çerçevelerin geliştiği ve tedarik zinciri bozulmalarının operasyonel etkilerinin değerlendirildiği dönemdir. Bu dönem, veri odaklı karar mekanizmalarının sınırlı olması nedeniyle reaktif ve manuel süreçlere dayanmaktadır.
- Digital-enabled dönem, veri toplama kapasitesinin artmasıyla ön plana çıkmıştır. IoT, RFID, bulut sistemleri ve sensör teknolojileri sayesinde tedarik zinciri görünürlüğü genişlemiş; karar destek sistemleri daha hızlı ve kapsamlı bilgi üretir hâle gelmiştir.
- AI-native dönem, YZ'nin sadece tahminleme değil, aynı zamanda önerici (prescriptive) ve adaptif karar mekanizmaları oluşturduğu en gelişmiş aşamadır. Bu dönemin literatürü; dijital ikizler, ağ optimizasyonu, self-learning sistemler ve reinforcement learning tabanlı kapasite planlamayı kapsamaktadır. Özellikle son dönemde Üretken Yapay Zekâ (Generative AI) teknolojileri, geçmiş verinin ötesine geçerek, daha

önce hiç yaşanmamış uç senaryoları (extreme scenarios) sentetik olarak üretmekte ve karar vericilere proaktif strateji geliştirme imkânı sunmaktadır (Li vd., 2024).

Bu sınıflandırma, literatürün nasıl evrildiğini ve tedarik zinciri dirençliliğinin teknoloji ekseninde giderek daha gelişmiş bir yapıya dönüştüğünü analitik bir biçimde ortaya koymaktadır.

3.5. Araştırma Boşlukları ve Literatüre Katkı Alanları

Mevcut literatürde değerli çalışmalar bulunmakla birlikte, sistematik bazı eksiklikler göze çarpmaktadır. Birincisi, veri entegrasyonu sorunudur; çalışmalar genellikle tekil veri kaynaklarına odaklanmakta, uçtan uca ağ verisini işleyen bütüncül mimariler sınırlı kalmaktadır. İkincisi, açıklanabilirlik (XAI) eksikliğidir; karmaşık YZ modellerinin karar süreçleri şeffaf olmadığı için yönetsel kabul ve güven düşüktür (Wu, 2023). Üçüncüsü, ESG-dirençlilik nedenselliğidir; sürdürülebilirlik ile dirençlilik arasındaki ilişki genellikle korelasyon düzeyinde kalmış, nedensel mekanizmalar yeterince açıklanmamıştır (Mari vd., 2014). Son olarak, literatür büyük ölçekli işletmelere yoğunlaşmış, KOBİ'lerin dijital kısıtları ve çözüm yolları geri planda kalmıştır.

4. DİJİTAL ÇAĞDA RİSK VE KIRILGANLIK ANALİZİ

4.1. Yeni Nesil Risk Ortamı

Küresel tedarik zincirleri, dijital çağda yalnızca geleneksel operasyonel risklerle değil, aynı zamanda hızla değişen ve birbiriyle etkileşen yeni nesil risklerle karşı karşıyadır (Kleindorfer ve Saad, 2005). Jeopolitik çatışmalar, pandemi sonrası arz-talep dengesizlikleri, iklim değişikliği kaynaklı fiziksel tehditler, enerji fiyatlarındaki oynaklık ve finansal piyasalardaki dalgalanmalar; tedarik zincirindeki kırılganlıkların artık daha karmaşık ve sistemik bir nitelik kazandığını göstermektedir. Song vd. (2024), bu tür belirsiz ortamlarda imalat odaklı dijital tedarik zincirlerinin, statik planlardan ziyade "dinamik yeteneklere" (dynamic capabilities) dayalı bir risk yönetimi yaklaşımı benimsemesi gerektiğini vurgulamaktadır. Bu risklerin büyük bir bölümü yüksek belirsizlik, yüksek etki ve düşük öngörülebilirlik özellikleri taşır; bu durum geleneksel istatistiksel tahminleme yöntemlerinin sınırlarını zorlar.

Dijital çağda riskler yalnızca daha sık ortaya çıkmamakta, aynı zamanda birbirini tetikleyen zincirleme bir yapıya sahiptir. Örneğin bir ülkedeki siber saldırı, lojistik yazılımlarını devre dışı bırakarak uluslararası taşımacılığı aksatabilir. Bu aksama, üretimde gecikmelere yol açarak nihai ürünlerde stok yokluğu riskini artırır. Bu nedenle risk analizi artık tekil olayların değil, olay kümelerinin ve senaryo ağlarının birlikte değerlendirilmesini gerektiren bir yapıya dönüşmüştür.

Ayrıca dijitalleşme sürecinin hızlanmasıyla risk döngüsü geleneksel periyodik kontrol mekanizmalarından uzaklaşarak daha dinamik, gerçek zamanlı ve otomatikleşmiş bir yapıya evrilmiştir. Bu yeni ortamda, erken uyarı sinyallerinin tespiti, veriye dayalı risk modelleme ve hızlı müdahale kapasitesi, tedarik zinciri performansını doğrudan belirleyen kritik faktörler hâline gelmiştir. Bu nedenle yeni nesil risk ortamını anlamak, modern dirençlilik stratejilerinin temelini oluşturmaktadır.

4.2. Görünürlük ve İzlenebilirlik Sorunları

Tedarik zinciri görünürlüğü (supply chain visibility), dijital risk yönetiminin merkezi bir bileşenidir; ancak birçok işletme hâlen sınırlı veri paylaşımı, silo hâlindeki bilgi sistemleri ve düşük entegrasyon seviyeleri nedeniyle görünürlük eksikliği yaşamaktadır. Geleneksel ERP sistemleri çoğu zaman gerçek zamanlı veri güncelleme kapasitesine sahip değildir ve tedarikçilerin büyük bir kısmı hâlâ manuel raporlama yöntemleri kullanmaktadır. Bu durum, bozulmaların erken tespit edilmesini güçleştirerek zincirleme kesintilerin etkisini artırmaktadır.

Görünürlük eksikliği özellikle çok katmanlı tedarikçi ağlarında ciddi bir kırılganlık kaynağıdır. Bir üretici, doğrudan çalıştığı birinci kademe tedarikçiler hakkında bilgiye sahip olsa bile, ikinci ve üçüncü kademe tedarikçilerin faaliyetleri hakkında çoğu zaman yeterli veriye ulaşamamaktadır. Oysa tedarik zincirlerindeki büyük ölçekli kesintilerin önemli bir bölümü, alt katman tedarikçilerinde yaşanan beklenmedik duruşlardan kaynaklanmaktadır.

İzlenebilirlik (traceability), tedarik zinciri boyunca ürün akışının, kalite göstergelerinin ve lojistik süreçlerinin uçtan uca takip edilebilmesini gerektirir. Ancak teknolojik altyapı eksiklikleri, standartlaşma sorunları, veri güvenliği endişeleri ve tedarikçi isteksizliği bu süreci zorlaştırmaktadır. Bunun sonucu

olarak, risk sinyallerinin tespiti hem geç gerçekleşmekte hem de müdahale kapasitesi zayıflamaktadır.

Bu nedenle modern tedarik zincirlerinde görünürlük, sadece operasyonel verimliliği artıran bir unsur olmaktan çıkmış; dirençlilik ve risk yönetiminin stratejik bir bileşeni hâline gelmiştir. IoT cihazları, RFID etiketleri, blockchain platformları ve bulut tabanlı veri paylaşım mekanizmaları görünürlük sorununu azaltmak için önemli araçlar sunmaktadır; ancak bunların yaygınlaşması hâlâ gelişmekte olan bir süreçtir.

4.3. Veri Mimarisi ve Dijital Kırılabilirlik

Dijitalleşme tedarik zincirlerinin veri akışını önemli ölçüde artırmış olsa da bu durum yeni bir kırılabilirlik türünü ortaya çıkarmıştır: Dijital kırılabilirlik; veri mimarisindeki zayıflıklar, entegrasyon sorunları, sistemler arası uyumsuzluk ve gerçek zamanlı veri senkronizasyonundaki gecikmeler, tedarik zincirlerinin operasyonel hassasiyetini artırmaktadır. Dijital kırılabilirlik; fiziksel risklerin yanı sıra yazılım, iletişim altyapısı ve veri güvenliği kaynaklı risklerin de dirençlilik analizine dâhil edilmesi gerektiğini göstermektedir (Soberanis, 2010).

Dijital kırılabilirliğin temel unsurlarından biri data latency (veri gecikmesi) problemidir. Karar destek sistemlerine ulaşan verinin gecikmesi, risklerin yanlış değerlendirilmesine veya bozulmaların geç fark edilmesine yol açar. Benzer şekilde, data inconsistency (veri tutarsızlığı) farklı sistemlerdeki rakamların birbiriyle uyuşmaması nedeniyle karar süreçlerini zayıflatır. Bu tür problemler, özellikle hızlı müdahale gerektiren kriz senaryolarında tedarik zinciri performansını ciddi biçimde düşürebilmektedir.

Bir diğer kırılabilirlik kaynağı aşırı otomasyon bağımlılığıdır. YZ tabanlı sistemlerin geniş ölçekli entegrasyonu işletmelere önemli avantajlar sağlar. Ancak bu sistemlerde yaşanacak tek bir arıza, tüm operasyonları durdurabilecek sistemik bir zafiyet yaratma riski taşır. Otomasyonun artmasıyla birlikte siber saldırı riski de yükselmekte; veri ihlalleri, ransomware saldırıları veya sistem çökmesi gibi tehditler fiziksel tedarik zincirleri üzerinde doğrudan etki yaratabilmektedir. Odimarha vd. (2024), dijital tedarik zincirini güvence altına almanın, artık sadece bir IT problemi değil, lojistik ve nakliye şirketleri için hayati bir operasyonel zorunluluk olduğunu belirtmektedir.

Bu çerçevede modern tedarik zincirlerinin dirençlilik düzeyi yalnızca fiziksel süreçlerle değil, aynı zamanda veri altyapısının sağlamlığı, entegrasyon kapasitesi ve siber güvenlik seviyeleri ile belirlenmektedir.

5. YAPAY ZEKÂ DESTEKLİ TEDARİK ZİNCİRİ RİSK TAHMİNİ MODELLERİ

Tedarik zincirlerinde risklerin erken tespiti ve proaktif yönetimi, operasyonların karmaşıklaştığı dijital çağda kritik önem taşır. YZ ve makine öğrenimi (ML) temelli yaklaşımlar; geleneksel araçlara kıyasla daha yüksek doğruluk, hız ve ölçeklenebilirlik sunarak risk yönetimini dönüştürmektedir (Shi vd., 2022). Bu modeller; finansal göstergeler, lojistik performans ve sensör verileri gibi çok çeşitli kaynakları işleyerek bozulma olasılıklarını çok boyutlu analizlerle öngörür. Literatürde YZ destekli risk analitiği süreci beş temel adımda sınıflandırılmaktadır:

- Algılama (Sensing): Çok kaynaklı verilerin toplanması ve ön işlenmesi.
- Tahmin (Prediction): ML/derin öğrenme ile bozulma olasılıklarının hesaplanması.
- Değerlendirme (Assessment): Bileşik risk skorlarının oluşturulması.
- Yanıt (Response): Optimizasyon ile en uygun aksiyonun seçilmesi.
- İzleme (Monitoring): Gerçek zamanlı geri besleme ve model güncellemesi.

5.1. Kural Tabanlı Erken Uyarı Sistemleri

Kural tabanlı sistemler, tedarik zinciri risk yönetiminde en eski ve yaygın yaklaşımdır. Bu mekanizma; ödeme vadeleri, teslimat gecikmeleri veya kalite sapmaları gibi göstergeleri önceden tanımlanmış eşik değerler üzerinden izler. Yorumlanabilir ve düşük maliyetli olması nedeniyle işletmelerde halen birincil uyarı aracı olarak kullanılır.

Ancak bu sistemler, değişkenler arasındaki karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri yakalamakta yetersiz kalabilir. Bu nedenle günümüzde sistemler dönüşüm geçirmektedir. Yang (2025), modern erken uyarı

mekanizmalarının artık statik kurallardan ziyade, makine öğrenimi ve veri madenciliği teknolojilerine dayalı işbirlikçi bir yapıya evrildiğini ve bu sayede Çin imalat sanayiinde risk tespit hızının arttığını raporlamıştır. Bu bağlamda kural tabanlı yapılar, genellikle ileri seviye ML modelleri için bir veri filtreleme basamağı olarak konumlandırılmaktadır.

5.2. Makine Öğrenimi Tabanlı Tahmin Modelleri

Makine öğrenimi modelleri, geçmiş operasyonel verilerden öğrenerek gelecekteki bozulma olasılıklarını öngörür. Bu modeller, çok boyutlu veri setleri ve karmaşık etkileşimler üzerinde geleneksel istatistiksel yöntemlere göre daha yüksek performans sergiler. Yaygın kullanılan yaklaşımlar şunlardır:

- **Ağaç Tabanlı Modeller:** Random Forest ve XGBoost gibi algoritmalar, tedarikçi bozulmalarının tahmininde yüksek doğruluk sağlar (Li vd., 2020). Özellikle eksik veri ve gürültülü sinyallerle başa çıkabilirken, değişken önem düzeylerini de raporlayarak karar vericilere içgörü sunar.
- **Destek Vektör Makineleri (SVM):** düşük örneklemli veri setlerinde dahi istikrarlı sınıflandırma yapabilmesiyle öne çıkar. Ayrıca son dönem çalışmalar, risk kapsamını genişletmiştir; örneğin Lokanan ve Maddhesia (2024), makine öğrenimi algoritmalarının tedarik zinciri dolandırıcılıklarını (fraud) ve anomali içeren finansal hareketleri tahmin etmede geleneksel denetim yöntemlerine göre çok daha etkin olduğunu ortaya koymuştur.
- **Ensemble (Birleşik) Modeller:** Birden fazla modelin çıktısını ağırlıklandırarak birleşik bir tahmin üretir. Tekil modellerin zayıf yönlerini dengeleyerek karmaşık veri setlerinde daha güvenilir sonuçlar verir.

5.3. LSTM ve Derin Öğrenme Tabanlı Tahmin Modelleri

Derin öğrenme (DL) modelleri, özellikle zaman serilerindeki ardışık bağımlılıkları yakalama kapasitesiyle ayrıştırır (Wu, 2023). Geleneksel yöntemlerin aksine Long Short-Term Memory (LSTM) ağları, "gate" (kapı) mekanizması sayesinde uzun dönemli tarihsel veriyi hafızasında tutabilir. Bu yapı; tedarik zincirindeki gecikme şokları, yavaşlama trendleri ve kümülatif performans kayıpları gibi zamana yayılı risklerin modellenmesinde kritik

avantaj sağlar. Bassiouni vd. (2024), karmaşık tedarik zincirlerinde derin öğrenme yaklaşımlarının sipariş durumlarını tanımlamada kullanıldığını ve akış anormalliklerini tespit etmede yüksek doğruluk sağladığını göstermiştir. Uygulamada LSTM modelleri; teslimat gecikmesi tahmini, stok yokluğu öngörüsü ve talep anomalisi tespitinde yüksek doğruluk oranlarıyla kullanılmaktadır.

5.4. Federated Learning: Gizlilik Korumalı Kolektif Öğrenme Yaklaşımları

Çok aktörlü tedarik zincirlerinde veri paylaşımı; ticari sırlar ve yasal düzenlemeler (KVKK, GDPR) nedeniyle kısıtlıdır. Federated Learning (FL), veriyi merkezi bir sunucuya taşımadan, her işletmenin kendi verisi üzerinde yerel model eğitmesine ve sadece model parametrelerini paylaşmasına olanak tanır (Nayal vd., 2021). Bu yaklaşım üç temel avantaj sunar: (i) Veri gizliliğini koruyarak iş birliği sağlar, (ii) Hesaplama yükünü dağıtarak ölçeklenebilirlik sunar, (iii) Farklı veri yapılarına uyum sağlayarak kolektif bir risk zekâsı oluşturur.

5.5. Açıklanabilir Yapay Zekâ (XAI) ve Model Şeffaflığı

Derin öğrenme ve ensemble modelleri yüksek doğruluk sunsa da, "kara kutu" yapıları nedeniyle karar süreçlerinde güven sorunu yaratabilir. Açıklanabilir Yapay Zekâ (XAI), model kararlarını şeffaf ve izlenebilir hale getiren araçlar bütünüdür. SHAP ve LIME gibi teknikler, bir risk tahmininde hangi değişkenin (ör. finansal zorluk, bölgesel kriz) ne kadar etkili olduğunu nicel olarak gösterir. Bu şeffaflık, yöneticilerin model çıktılarına güvenini artırırken, regülasyon uyumu ve hata analizi süreçlerini de destekler.

5.6. Ağ Tabanlı Modeller: Graph Neural Networks ve Çok Ajanlı Sistemler

Tedarik zincirleri, düğümler ve bağlantılardan oluşan karmaşık ağ yapılarıdır. Risklerin bu ağ üzerindeki yayılımını (propagation) analiz etmek için graf tabanlı yöntemler kullanılır.

- Graph Neural Networks (GNN): Tedarik zincirinin topolojik yapısını doğrudan modeller. Bir tedarikçideki kesintinin, ağdaki diğer

düğömlere nasıl sıçrayacağını tahmin eder. Geleneksel makine öğrenimi modelleri düğömler (firmalar) arasındaki dolaylı ilişkileri kaçırabilirken, GNN tabanlı modellerin tedarikçi ağındaki gizli risk bağlantılarını tespit etmede geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek doğruluk sağlayabileceğı değerlendirilmektedir (Kosasih ve Brintrup, 2022).

- Çok Ajanlı Sistemler (MAS): Tedarik zinciri aktörlerinin özerk davranışlarını ve etkileşimlerini simüle eder. Yerel kararların küresel performansa etkisini ölçmek ve stres testleri uygulamak için kullanılır.

5.7. Hibrit Modeller

Tedarik zinciri riski, hem istatistiksel belirsizlik hem de sistemsel etkileşim içerir. Hibrit yaklaşımlar, ML modellerinin tahmin gücünü simülasyon ve optimizasyonun karar destek yeteneğıyle birleştirir (Ivanov, 2020). Yaygın bir uygulamada; ML modelleri tarafından hesaplanan bozulma olasılıkları, Ayrık Olay Simülasyonu (DES) veya stokastik optimizasyon modellerine girdi olarak aktarılır. Bu entegrasyon, "ne olursa" (what-if) senaryolarının veriye dayalı ve gerçekçi bir zeminde test edilmesini sağlar.

5.8. Literatürde Raporlanan Performans Kazanımları

Yapay zekâ ve makine öğrenimi tabanlı modellerin geleneksel yöntemlere göre sağladığı performans kazanımları, risk sinyallerinin daha hızlı algılanması ve yüksek doğrulukla sınıflandırma becerileri ile ortaya çıkmaktadır (Shi vd., 2022). Bu kazanımlar, son dönemde yapılan çeşitli ampirik çalışmalarla desteklenmektedir. Örneğın Guo vd. (2024), envanter yönetimi perspektifinden yaptıkları incelemede, akıllı algoritmaların stok optimizasyonunda klasik yöntemlere göre belirgin bir esneklik sağlayabileceğini; Bassiouni vd. (2024) ise karmaşık tedarik zincirlerinde derin öğrenme modellerinin sipariş durumu ve gecikme tahminlerinde geleneksel araçlara kıyasla çok daha yüksek doğruluk oranlarına ulaşabileceğini raporlamıştır.

6. STRES TESTLERİ VE SENARYO ANALİZİ YAKLAŞIMLARI

Stres testleri ve senaryo analizi, tedarik zinciri dirençliliğının değerlendirilmesinde kullanılan temel araçlardır. Bu yaklaşımlar, sistemin

olağan dışı koşullar altında nasıl tepki vereceğini inceleyerek zayıf noktaların belirlenmesine ve karar vericilerin proaktif önlemler geliştirmesine yardımcı olur (Ye vd., 2022). Literatürde, finans sektöründe köklü bir geçmişe sahip olan stres testlerinin tedarik zinciri bağlamına uyarlanması giderek yaygınlaşmış; böylece arz şokları, talep dalgalanmaları, tedarikçi iflasları ve lojistik kesintileri gibi çok boyutlu risklerin etkilerinin sistematik biçimde analiz edilmesi mümkün hâle gelmiştir (Ivanov, 2020). Ayrıca Ivanov (2023), güncel çalışmasında dirençliliğin yalnızca eski performansla dönmek (mühendislik bakışı) değil, değişen koşullarda varlığını sürdürmek (ekolojik bakış) olarak iki farklı eksenle ele alındığını; modern stres testlerinin de bu 'yaşayabilirlik' (viability) ayrımını yapacak şekilde kurgulanmasının önemini vurgulamaktadır.

Tedarik zinciri stres testleri genellikle üç temel aşamadan oluşur. İlk aşamada, sistemin karşı karşıya kalabileceği aşırı ancak makul senaryolar tanımlanır. Bu senaryolar, tekil tedarikçi kesintilerinden çoklu bozulma durumlarına, talep patlamalarından kapasite kayıplarına kadar geniş bir yelpazeyi kapsayabilir. İkinci aşamada, bu senaryolar sistemin operasyonel performansı üzerinde test edilir. Ayrık olay simülasyonu (DES), agent-based modelling veya network-based propagation modelleri literatürde en sık kullanılan yöntemler arasındadır. Üçüncü aşamada ise, performans göstergelerindeki düşüş (örneğin hizmet seviyesi, teslimat süresi, hatalı sipariş oranı, toparlanma süresi) analiz edilerek işletmenin dayanıklılık düzeyi değerlendirilir.

Senaryo analizi ise stres testlerine paralel şekilde geliştirilmiş, ancak daha geniş bir karar destek amacı taşıyan bir yaklaşımdır. Literatürde deterministik, stokastik ve olasılık ağırlıklı senaryo değerlendirme yapıları bulunmaktadır. Amaç, farklı bozulma türlerinin ve bunların olası şiddet seviyelerinin tedarik zinciri üzerindeki etkisini karşılaştırmalı olarak incelemektir. ML tabanlı tahmin sistemleri, bozulma olasılıklarını nicelleştirerek senaryo uzayının daha gerçekçi biçimde oluşturulmasını sağlamaktadır. Örneğin tedarikçi teslimat gecikmesi olasılığının ML ile tahmin edilmesi, bu değerlerin simülasyona veya optimizasyon modellerine senaryo parametresi olarak entegrasyonuna olanak tanımaktadır.

Son yıllarda literatürde “compound disruption scenarios” olarak adlandırılan, birden fazla bozulmanın eş zamanlı veya ardışık olarak gerçekleştiği durumlara yönelik stres testleri önem kazanmıştır. Pandemi, doğal afetler, jeopolitik gerilimler veya enerji kesintileri gibi şokların birbirini tetikleyebileceği kabul edilmekte ve çoklu senaryo modellemeleri bu çerçevede uygulanmaktadır. Bu çalışmalar, tedarik zincirinin doğrusal olmayan ve yayılma temelli risk dinamiklerini ortaya koymaktadır.

Stres testlerinin tedarik zinciri yönetimine katkıları literatürde şu başlıklarda toplanmaktadır:

- Kritik tedarikçilerin ve darboğaz noktalarının belirlenmesi,
- Toparlanma süresi ve maliyet etkilerinin karşılaştırılması,
- Alternatif tedarik stratejilerinin test edilmesi,
- Envanter, kapasite ve rota planlaması üzerinde uzun vadeli etkilerin değerlendirilmesi,
- “Ne olursa olsun çalışabilirlik” (viability) analizlerinin yapılması.

7. ESNEK KAPASİTE PLANLAMA VE DİRENÇLİLİK ODAKLI KARAR YAKLAŞIMLARI

Esnek kapasite planlama, talep dalgalanmaları ve arz kesintileri karşısında operasyonel sürekliliği sağlayan stratejik bir risk azaltma mekanizmasıdır. Geleneksel yaklaşımların aksine, dijital çağda kapasite yönetimi statik tamponlar yerine, YZ destekli dinamik tahsis kararlarına dayanmaktadır. Makine öğrenimi modelleri; talep şoklarını, tedarikçi gecikmelerini veya hat arızalarını önceden tahmin ederek kapasite artış kararlarının (örneğin fazla mesai, fason üretim, alternatif rota) tam zamanında verilmesini sağlar (Riley vd., 2016).

Bu yaklaşım, "atıl kapasite maliyeti" ile "yetersiz kapasite riski" arasındaki dengeyi optimize eder. Özellikle stres testleri ile entegre edildiğinde, hangi tedarik düğümlerinde ne kadar kapasite esnekliğine ihtiyaç duyulduğu veriye dayalı olarak belirlenebilmektedir. Böylece işletmeler, kriz anlarında hizmet seviyesini korurken, gereksiz stok veya kaynak maliyetinden

kaçınılabirler. Literatür, bu dinamik planlama yeteneğinin, toparlanma süresini doğrudan kısalttığını göstermektedir.

8. RİSK İZLEME VE KONTROL KULELERİ (DİJİTAL CONTROL TOWERS)

Dijital kontrol kuleleri (Digital Control Towers), tedarik zincirlerinde uçtan uca görünürlük sağlayarak risklerin gerçek zamanlı izlenmesini, erken uyarı mekanizmalarının işletilmesini ve koordineli yanıt süreçlerinin desteklenmesini amaçlayan entegre dijital platformlar olarak tanımlanmaktadır. Literatürde kontrol kuleleri; veri toplama, analitik değerlendirme ve karar destek işlevlerini tek bir arayüzde birleştiren sosyo-teknik sistemler olarak ele alınmakta ve özellikle karmaşık, çok katmanlı tedarik zincirlerinde risk yönetiminin operasyonel omurgası olarak konumlandırılmaktadır (Duttyal, 2025; Shi vd., 2022).

Kontrol kulelerinin temel işlevi, farklı kaynaklardan gelen heterojen verileri (operasyonel süreçler, tedarikçi performansı, lojistik akışlar, dışsal risk göstergeleri) bütünleştirerek anlamlı ve zamanında bilgi üretmektir. IoT sensörleri, ERP/WMS/TMS sistemleri, tedarikçi portalları ve dış veri sağlayıcılarından elde edilen veriler, kontrol kuleleri aracılığıyla tek bir görünürlük katmanında birleştirilmektedir. Bu yapı, tedarik zinciri boyunca oluşabilecek gecikme, kapasite kaybı veya hizmet seviyesi düşüşü gibi risklerin erken aşamada tespit edilmesine olanak tanımaktadır.

YZ/ML tabanlı risk tahmin modelleri, kontrol kulelerinin analitik bileşenini güçlendiren temel unsurlar arasında yer almaktadır. Literatürde, kontrol kulelerinin yalnızca izleme (monitoring) işleviyle sınırlı kalmaması; tahmine dayalı analitik ve öngörücü karar destek sistemleriyle bütünleştirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Bu bağlamda ML modelleri tarafından üretilen risk skorları, bozulma olasılıkları veya anomali sinyalleri, kontrol kulesi panelleri üzerinden karar vericilere aktarılmakta ve operasyonel müdahaleler için tetikleyici rol üstlenmektedir.

Dijital kontrol kuleleri aynı zamanda koordinasyon ve senkronizasyon işlevi görmektedir. Tedarik zincirinde farklı aktörler arasında bilgi asimetrisini azaltarak, ortak bir durumsal farkındalık (shared situational awareness)

oluşturur. Bu durum, özellikle kriz ve kesinti anlarında karar alma sürecinin hızlanmasına ve tutarlılığının artmasına katkı sağlamaktadır. Literatürde, kontrol kulelerinin stres testleri ve senaryo analizleri ile birlikte kullanıldığında, alternatif tedarik ve kapasite senaryolarının daha etkin biçimde değerlendirilmesine olanak tanıdığı raporlanmaktadır.

Bununla birlikte dijital kontrol kulelerinin uygulanmasında bazı sınırlılıklar da bulunmaktadır. Veri entegrasyonu zorlukları, farklı sistemler arasında standart eksikliği, veri kalitesi problemleri ve organizasyonel direnç, literatürde en sık vurgulanan uygulama engelleri arasındadır. Ayrıca kontrol kulelerinin etkinliği, yalnızca teknolojik altyapıya değil; yönetim yapılarının netliğine, sorumluluk dağılımına ve karar alma yetkilerinin tanımlanmasına da bağlıdır. Bu nedenle literatür, kontrol kulelerini yalnızca bir yazılım çözümü olarak değil, bütüncül bir yönetim ve karar destek mekanizması olarak ele almaktadır.

9. UYGULAMA ALANLARI VE VAKA ÖRNEKLERİ

YZ ve dijital analitik tabanlı risk yönetimi yaklaşımları, tedarik zincirlerinin farklı sektör ve operasyonel bağlamlarında çeşitli uygulama alanları bulmaktadır. Literatürde yer alan çalışmalar, bu teknolojilerin belirli bir sektörle sınırlı olmadığını; aksine tedarik zinciri karmaşıklığı, talep belirsizliği ve kesinti riski yüksek olan alanlarda daha belirgin faydalar sağladığını göstermektedir. Bu bölümde, YZ destekli risk tahmini, stres testleri, esnek kapasite planlama ve dijital kontrol kulelerinin farklı sektörlerde nasıl konumlandırıldığı, literatürde raporlanan uygulama örnekleri üzerinden kavramsal düzeyde ele alınmaktadır.

9.1. İmalat ve Otomotiv Tedarik Zincirleri

İmalat ve otomotiv sektörleri, çok katmanlı tedarikçi ağları, uzun tedarik süreleri ve yüksek koordinasyon gereksinimi nedeniyle risk yönetimi açısından literatürde en sık incelenen alanlar arasında yer almaktadır. YZ/ML tabanlı risk tahmin modelleri, bu sektörlerde özellikle tedarikçi gecikmesi, kapasite kısıtı ve kritik bileşen bağımlılığı gibi risklerin erken tespitinde kullanılmaktadır. Pandemi sonrası çalışmalar, dijital kontrol kulelerinin önemini ortaya koymuştur. Bu sistemler, yarı iletken gibi kritik girdilerdeki arz kesintilerini

görünür kılmakta ve alternatif tedarik stratejilerinin değerlendirilmesini kolaylaştırmaktadır.

9.2. Perakende ve E-Ticaret Tedarik Zincirleri

Perakende ve e-ticaret tedarik zincirleri, yüksek talep dalgalanmaları ve kısa teslimat süreleri nedeniyle operasyonel risklere oldukça açıktır. Literatürde ML tabanlı talep tahmini, stok yokluğu riskinin öngörülmesi ve teslimat performansının izlenmesi gibi uygulamalar öne çıkmaktadır. Dijital kontrol kuleleri, çok kanallı (omnichannel) dağıtım yapılarında envanter görünürlüğünü artırarak gecikme ve hizmet seviyesi kayıplarının azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca stres testleri ve senaryo analizleri, kampanya dönemleri veya ani talep artışlarının operasyonel kapasite üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır.

9.3. Sağlık ve İlaç Tedarik Zincirleri

Sağlık ve ilaç tedarik zincirleri, ürün bulunurluğunun doğrudan toplumsal sonuçlar doğurması nedeniyle risk yönetimi açısından kritik bir konumdadır. Literatürde YZ destekli risk tahmini yaklaşımlarının, ilaç hammaddesi temini, soğuk zincir sürekliliği ve dağıtım gecikmelerinin izlenmesinde kullanıldığı bildirilmektedir (Zogaan vd., 2025).

Pandemi döneminde yapılan çalışmalar, stres testleri ve senaryo analizlerinin, yoğun talep koşullarında kapasite yetersizliklerinin ve lojistik darboğazların daha iyi anlaşılmasına katkı sağladığını göstermektedir. Bu sektörde açıklanabilirlik ve yönetim gereksinimleri, XAI tabanlı yaklaşımların önemini artırmaktadır. Ayrıca Wyrembek vd. (2025), nedensel makine öğrenimi (causal machine learning) yöntemlerinin, bu tür hassas zincirlerde sadece riskleri tahmin etmekle kalmayıp, kriz anında en doğru müdahale planlarını oluşturmada da karar vericilere rehberlik ettiğini vurgulamaktadır.

9.4. Küresel Lojistik ve Taşımacılık Ağları

Küresel lojistik ağları, jeopolitik riskler, doğal afetler ve altyapı kesintileri gibi dışsal şoklara yüksek derecede maruz kalmaktadır. Literatürde, YZ tabanlı risk izleme sistemlerinin liman tıkanıklıkları, rota kesintileri ve

taşıma süresi dalgalanmalarını öngörmeye kullanıldığı raporlanmaktadır. Dijital kontrol kuleleri, farklı taşıma modlarından gelen verileri entegre ederek gerçek zamanlı görünürlük sağlamak ve alternatif rota senaryolarının değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Bu bağlamda ağ tabanlı modeller ve simülasyon yaklaşımları, risk yayılımının analizinde tamamlayıcı bir rol üstlenmektedir.

9.5. KOBİ'ler ve Gelişmekte Olan Ekonomiler

Literatürde, KOBİ'lerin ve gelişmekte olan ekonomilerde faaliyet gösteren işletmelerin veri, teknoloji ve kurumsal kapasite kısıtları nedeniyle YZ tabanlı risk yönetimi çözümlerini sınırlı ölçüde uygulayabildiği vurgulanmaktadır. Bununla birlikte, hafif (lightweight) analitik araçlar, kural tabanlı sistemler ve bulut tabanlı kontrol kuleleri, bu bağlamda ölçeklenebilir ve erişilebilir çözümler olarak değerlendirilmektedir. Federated learning gibi gizlilik korumalı yaklaşımlar, veri paylaşımı engellerini aşma potansiyeli nedeniyle bu işletmeler için özellikle dikkat çekici bir uygulama alanı sunmaktadır.

Bu bölümde ele alınan uygulama alanları ve literatürde raporlanan örnekler, YZ ve dijital analitik tabanlı risk yönetimi yaklaşımlarının farklı sektörlerde nasıl konumlandırıldığını kavramsal düzeyde ortaya koymaktadır.

10. BÖLÜMÜN KATKILARI VE YÖNETSEL ÇIKARIMLAR

Bu bölüm, tedarik zinciri dirençliliğini yalnızca reaktif bir risk yönetimi faaliyeti olarak değil; veri odaklı, öngörücü ve dinamik bir yetkinlik alanı olarak konumlandırmıştır. Çalışmanın temel kuramsal katkısı, literatürde genellikle ayrı ayrı ele alınan makine öğrenimi, ağ tabanlı modeller ve hibrit simülasyon yaklaşımlarını bütüncül bir analitik çerçeve içinde sentezlemesidir.

Yönetsel açıdan ise, YZ tabanlı risk tahmininin tek başına yeterli olmadığı; bunun stres testleri, esnek kapasite planlama ve dijital kontrol kuleleri gibi mekanizmalarla desteklenmesi gerektiği ortaya konulmuştur (Blackhurst vd., 2011). Ayrıca bu teknolojilerin yalnızca büyük işletmeler için değil, uygun ölçeklendirmeye KOBİ'ler için de uygulanabilir olduğu vurgulanmıştır. Stratejik düzeyde ise dijital dönüşümün, teknik bir proje

olmanın ötesinde, organizasyonel kültür ve yönetim mekanizmalarıyla desteklenen bütüncül bir süreç olduğu sonucuna varılmıştır.

11. SINIRLILIKLAR VE GELECEK ARAŞTIRMA ALANLARI

Bu bölüm, konuyu kavramsal ve stratejik düzeyde ele almış olup, matematiksel modelleme ve kodlama detayları kapsam dışı bırakılmıştır. Ayrıca sunulan çerçeve, veri kalitesinin belirli bir olgunlukta olduğu varsayımına dayanmaktadır; ancak pratikte veri tutarsızlığı (data inconsistency) önemli bir uygulama engelidir. Bu bağlamda, gelecek araştırmalar için şu odak alanları önerilmektedir (Wu, 2023; Mari vd., 2014):

- Nedensel YZ (Causal AI) Geliştirilmesi: Risklerin sadece tahmin edilmesi değil, kök nedenlerinin (root-cause) ayrıştırılmasına yönelik modeller.
- Sürdürülebilirlik Entegrasyonu: ESG verilerini dışsal bir değişken olarak değil, risk modellerinin doğrudan girdisi olarak kullanan algoritmalar.
- KOBİ Odaklı Hafif Çözümler: Yüksek yatırım gerektirmeyen, bulut tabanlı ve ölçeklenebilir analitik araçların tasarımı.
- İnsan-Makine İş Birliği: Karar destek sistemlerinde "insan döngüde" yaklaşımının kriz yönetimine etkisinin deneysel analizi.

12. SONUÇ

Dijital çağda tedarik zinciri dirençliliği, teknolojik bir tercih olmaktan çıkıp stratejik bir zorunluluğa dönüşmüştür. Bu bölümde sunulan analizler, yapay zekâ destekli araçların risk yönetiminde hız ve doğruluk kazandırdığını; ancak bu potansiyelin hayata geçirilmesinin veri yönetişimi, kurumsal kültür ve iş birliği mekanizmalarıyla mümkün olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak dirençlilik; tahmin algoritmaları ile insan karar vericilerin uyumlu çalıştığı, sürekli öğrenen ve kendini yenileyen hibrit sistemler üzerine inşa edilmelidir.

KAYNAKÇA

- Ambulkar, S., Blackhurst, J., & Grawe, S. (2014). Firm's resilience to supply chain disruptions: Scale development and empirical examination. *Journal of Operations Management*, 33–34(1), 111–122. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2014.11.002>
- Bassiouni, M. M., Chakraborty, R. K., Sallam, K. M., & Hussain, O. K. (2024). Deep learning approaches to identify order status in a complex supply chain. *Expert Systems With Applications*, 250, 123947. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123947>
- Blackhurst, J., Dunn, K. S., & Craighead, C. W. (2011). An empirically derived framework of global supply resiliency. *Journal of Business Logistics*, 32(4), 374–391. <https://doi.org/10.1111/j.0000-0000.2011.01032.x>
- Braunscheidel, M. J., & Suresh, N. C. (2008). The organizational antecedents of a firm's supply chain agility for risk mitigation and response. *Journal of Operations Management*, 27(2), 119–140. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2008.09.006>
- Christopher, M., & Peck, H. (2004). Building the resilient supply chain. *The International Journal of Logistics Management*, 15(2), 1–14. <https://doi.org/10.1108/09574090410700275>
- Craighead, C. W., Blackhurst, J., Rungtusanatham, M. J., & Handfield, R. B. (2007). The severity of supply chain disruptions: design characteristics and mitigation capabilities. *Decision Sciences*, 38(1), 131–156. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.2007.00151.x>
- Duttyal, S. (2025). Leveraging supply chain digital twins: advanced route optimization for enhanced lead time predictability. *European Journal of Computer Science and Information Technology*, 13(45), 75–87. <https://doi.org/10.37745/ejcsit.2013/vol13n457587>
- Enyejo, J. O., Fajana, O. P., Jok, I. S., Ihejirika, C. J., Awotiwon, B. O., & Olola, T. M. (2024). Digital Twin Technology, Predictive Analytics, and

- Sustainable Project Management in Global Supply Chains for Risk Mitigation, Optimization, and Carbon Footprint Reduction through Green Initiatives. *International Journal of Innovative Science and Research Technology* (IJISRT), 609–630. <https://doi.org/10.38124/ijisrt/ijisrt24nov1344>
- Fahimnia, B., Sarkis, J., & Eshragh, A. (2015). A tradeoff model for green supply chain planning: A leanness-versus-greenness analysis. *Omega*, 54, 173–190. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.01.014>
- Guo, Y., Liu, F., Song, J., & Wang, S. (2024). Supply chain resilience: A review from the inventory management perspective. *Fundamental Research*, 5(2), 450–463. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2024.08.002>
- Ivanov, D. (2020). 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. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03640-6>
- Ivanov, D. (2023). Two views of supply chain resilience. *International Journal of Production Research*, 62(11), 4031–4045. <https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2253328>
- Ivanov, D., & Dolgui, A. (2020). A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0. *Production Planning & Control*, 32(9), 775–788. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1768450>
- Kleindorfer, P. R., & Saad, G. H. (2005). Managing disruption risks in supply chains. *Production and Operations Management*, 14(1), 53–68. <https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2005.tb00009.x>
- Kosasih, E. E., Margaroli, F., Gelli, S., Aziz, A., Wildgoose, N., & Brintrup, A. (2022). Towards knowledge graph reasoning for supply chain risk management using graph neural networks. *International Journal of*

- Production Research, 62(15), 5596–5612.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2100841>
- Li, Y., Chen, K., Collignon, S., & Ivanov, D. (2020). Ripple effect in the supply chain network: Forward and backward disruption propagation, network health and firm vulnerability. *European Journal of Operational Research*, 291(3), 1117–1131. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.09.053>
- Li, L., Zhu, W., Chen, L., & Liu, Y. (2024). Generative AI usage and sustainable supply chain performance: A practice-based view. *Transportation Research Part E Logistics and Transportation Review*, 192, 103761. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103761>
- Lin, Y., & Li, S. (2024). Supply chain resilience, ESG performance, and corporate growth. *International Review of Economics & Finance*, 97, 103763. <https://doi.org/10.1016/j.iref.2024.103763>
- Lokanan, M. E., & Maddhesia, V. (2024). Supply chain fraud prediction with machine learning and artificial intelligence. *International Journal of Production Research*, 63(1), 286–313.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2361434>
- Mari, S., Lee, Y., & Memon, M. (2014). Sustainable and Resilient Supply Chain Network Design under Disruption Risks. *Sustainability*, 6(10), 6666–6686. <https://doi.org/10.3390/su6106666>
- Nayal, K., Raut, R., Priyadarshinee, P., Narkhede, B. E., Kazancoglu, Y., & Narwane, V. (2021). Exploring the role of artificial intelligence in managing agricultural supply chain risk to counter the impacts of the COVID-19 pandemic. *The International Journal of Logistics Management*, 33(3), 744–772. <https://doi.org/10.1108/ijlm-12-2020-0493>
- Odimarha, N. a. C., Ayodeji, N. S. A., & Abaku, N. E. A. (2024). Securing the digital supply chain: Cybersecurity best practices for logistics and shipping companies. *World Journal of Advanced Science and*

- Technology, 5(1), 026–030.
<https://doi.org/10.53346/wjast.2024.5.1.0030>
- Pettit, T. J., Fiksel, J., & Croxton, K. L. (2010). ENSURING SUPPLY CHAIN RESILIENCE: DEVELOPMENT OF a CONCEPTUAL FRAMEWORK. *Journal of Business Logistics*, 31(1), 1–21.
<https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2010.tb00125.x>
- Rice, J. B., & Sheffi, Y. (2005). A supply chain view of the resilient enterprise. *MIT Sloan Management Review*, 47(1), 41–48.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1328931>
- Riley, J. M., Klein, R., Miller, J., & Sridharan, V. (2016). How internal integration, information sharing, and training affect supply chain risk management capabilities. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 46(10), 953–980.
<https://doi.org/10.1108/ijpdlm-10-2015-0246>
- Shi, Y., Zheng, X., Venkatesh, V., Humdan, E. A., & Paul, S. K. (2022). The impact of digitalization on supply chain resilience: an empirical study of the Chinese manufacturing industry. *Journal of Business and Industrial Marketing*, 38(1), 1–11. <https://doi.org/10.1108/jbim-09-2021-0456>
- Singh, D., Sharma, A., Singh, R. K., & Rana, P. S. (2024). Augmenting supply chain resilience through AI and big data. *Business Process Management Journal*, 31(2), 631–657. <https://doi.org/10.1108/bpmj-04-2024-0260>
- Soberanis, I. E. D. (2010). An extended Bayesian network approach for analyzing supply chain disruptions (Doctoral dissertation). University of Iowa. <https://doi.org/10.17077/etd.e4hw0b69>
- Song, H., Chang, R., Cheng, H., Liu, P., & Yan, D. (2024). The impact of manufacturing digital supply chain on supply chain disruption risks under uncertain environment—Based on dynamic capability perspective. *Advanced Engineering Informatics*, 60, 102385.
<https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102385>

- Taleb, N. N. (2012). *Antifragile: Things that gain from disorder*. New York: Random House.
- Wagner, S. M., & Bode, C. (2008). AN EMPIRICAL EXAMINATION OF SUPPLY CHAIN PERFORMANCE ALONG SEVERAL DIMENSIONS OF RISK. *Journal of Business Logistics*, 29(1), 307–325. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2008.tb00081.x>
- Wyrembek, M., Baryannis, G., & Brintrup, A. (2025). Causal machine learning for supply chain risk prediction and intervention planning. *International Journal of Production Research*, 63(15), 5629–5648. <https://doi.org/10.1080/00207543.2025.2458121>
- Wu, T. (2023). EXPLORING SUPPLY CHAIN RISK MANAGEMENT IN THE POST-PANDEMIC FUTURE: THE CASE STUDY OF HANDANHY COMPANY. *Proceedings of the International Management Conference*. <https://doi.org/10.24818/imc/2022/01.13>
- Yang, H. (2025). Design and implementation of Supply Chain Collaborative risk early warning System based on machine learning and data mining Technology: A case study of China's manufacturing supply chain. In *2025 3rd Cognitive Models and Artificial Intelligence Conference (AICCONF)* (pp. 1–4). <https://doi.org/10.1109/aicconf64766.2025.11064140>
- Ye, Y., Suleiman, M. A., & Huo, B. (2022). Impact of just-in-time (JIT) on supply chain disruption risk: The moderating role of supply chain centralization. *Industrial Management & Data Systems*, 122(7), 1665–1685. <https://doi.org/10.1108/imds-09-2021-0552>
- Yun, N. Y., & Ülkü, M. A. (2023). Sustainable Supply Chain Risk Management In a Climate-Changed World: Review of extant literature, trend analysis, and guiding framework for future research. *Sustainability*, 15(17), 13199. <https://doi.org/10.3390/su151713199>

Zogaan, W. A., Ajabnoor, N., & Salamai, A. A. (2025). Leveraging deep learning for risk prediction and resilience in supply chains: insights from critical industries. *Journal of Big Data*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s40537-025-01143-4>

BÖLÜM 4

E-TİCARET LOJİSTİĞİ, SON KİLOMETRE DAĞITIMI VE DİJİTAL İŞ MODELLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Gökhan EĞİLMEZ¹

¹ Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Yeniçağa Yaşar Çelik Meslek Yüksekokulu,
Pazarlama ve Dış Ticaret Bölümü, Bolu, TÜRKİYE, gokhan.egilmez.@ibu.edu.tr,
Orcid: 0000-0003-0450-9376

1. GİRİŞ

Dijitalleşmenin hızla ilerlediği günümüz ekonomisinde e-ticaret, küresel tedarik zincirlerinin dönüşümünde stratejik bir itici güç hâline gelmiştir. Özellikle COVID-19 pandemisi sonrasında çevrimiçi alışveriş hacmindeki belirgin artış, tüketici davranışlarını kalıcı biçimde değiştirmiş ve işletmeleri lojistik altyapılarını yeniden tasarlamaya yönlendirmiştir. Bu dönüşüm, yalnızca talep yapısındaki değişimi değil; aynı zamanda lojistik süreçlerin planlanması, yönetilmesi ve dijital araçlarla desteklenmesi açısından da yeni bir paradigma ortaya çıkarmıştır. Günümüzde e-ticaret lojistiği inovasyon, dijitalleşme, otomasyon, sürdürülebilirlik ve müşteri odaklılık ekseninde şekillenmekte; sektör, bütüncül ve çok boyutlu bir dönüşüm sürecinden geçmektedir (Eğilmez, 2025).

E-ticaret lojistiğinin hizmet seviyesini belirleyen kritik aşamalardan biri olan son kilometre dağıtımı (last-mile delivery), tedarik zincirinin en maliyetli ve en kırılgan halkalarındandır. Çalışmalar, kentsel ortamlarda hız, doğruluk ve esneklik ihtiyacı nedeniyle son kilometre faaliyetlerinin toplam dağıtım maliyetlerinin %41'ine kadar ulaşabildiğini (McKinsey & Company (2021), Gevaers vd. (2011) ise bu aşamanın tüm lojistik operasyonlar içinde en düşük verimlilik düzeyine sahip olduğunu belirtmektedir. Literatür, trafik yoğunluğu, küçük hacimli ve yüksek frekanslı siparişler, teslimat başarısızlıkları ve kentleşmenin getirdiği mekânsal kısıtlar gibi etkenlerin bu kırılganlığı artırdığını ortaya koymaktadır (Durand & Gonzalez-Feliu, 2020; Viu-Roig & Alvarez-Palau, 2020; Boysen vd., 2021; Silva vd., 2023). Ayrıca, bu teslimatlar için geleneksel içten yanmalı motorlu araçlara aşırı bağımlılık, kentsel tıkanıklığa, hava kirliliğine ve sera gazı emisyonlarına önemli ölçüde katkıda bulunarak, şehirler sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmaya çalışırken ciddi bir çevresel endişe kaynağı oluşturmaktadır. Bu nedenle son kilometre lojistiği, yalnızca maliyet/hız optimizasyonu değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da stratejik bir araştırma alanı hâline gelmiştir.

Kentsel lojistik faaliyetlerinin çevresel etkileri, bu stratejik önemi daha da pekiştirmektedir. OECD (2020) raporuna göre şehirlerdeki toplam karbon emisyonlarının yaklaşık %23–30'u kent içi taşımacılık ve dağıtım

faaliyetlerinden kaynaklanmaktadır. Dünya Ekonomik Forumu'nun (WEF, 2020) öngörülerine göre e-ticaret hacmindeki büyümenin sürmesi durumunda 2030 yılına kadar teslimat araçlarının %36, karbon salımlarının %30 ve trafik sıklığının %21 oranında artacağını göstermektedir. İşletmeler ise, bir taraftan tüketiciye hızlı teslimat vaadini sürdürmeye çalışırken, diğer taraftan sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu çözümler geliştirme baskısı altındadır. Bu ihtiyaç, son yıllarda yenilikçi dağıtım sistemlerinin hızla benimsenmesini beraberinde getirmiştir. Mikro-depo (micro-fulfillment center) mimarileri, elektrikli dağıtım araçları, kargo bisikletleri, rota optimizasyon algoritmaları, yapay zekâ tabanlı talep tahmini ve otonom teslimat sistemleri gibi uygulamalar hem literatürde hem de sektör pratiklerinde ön plana çıkmıştır (Ferreira & Esperança, 2025; Speranza, 2018; Mangiaracina vd., 2019; Boysen vd., 2021; Silva vd., 2023). Bu teknolojik dönüşüm, dijital platformlar tarafından desteklenen yeni iş modellerinin ortaya çıkmasını sağlayarak e-ticaret lojistiğinin geleceğini şekillendirmektedir. Bu platformların operasyonel mimarileri, ekonomik çıktıların ötesinde toplumsal erişilebilirlik ve çevresel sürdürülebilirlik açısından da akademik tartışmalarda önemli yer edinmiştir.

Bu bölümde; i) E-ticaret lojistiğinin kuramsal çerçevesi, ii) Son kilometre teslimatının operasyonel ve çevresel zorlukları, iii) Sürdürülebilir lojistik çözümlerinin gelişim dinamikleri, iv) Dijital iş modelleri ve platform mimarisi ve v) Türkiye’de yenilikçi lojistik yaklaşımlarının örnek uygulamaları bütüncül bir bakış açısıyla ele alınacak; hız-karbon dengesi bağlamında e-ticaret lojistiğinin geleceğine yönelik akademik değerlendirmelere yer verilecektir.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

E-ticaret lojistiği, dijital tedarik zincirlerinin yeniden yapılandığı, operasyonel süreçlerin büyük ölçüde veri analitiği, otomasyon ve yapay zekâ teknolojileri ile entegre edildiği çok katmanlı bir sistem olarak değerlendirilmektedir. E-ticaret lojistiği; sipariş yönetimi, stok yönetimi, depo ve mikro-depo operasyonları, taşımacılık, son kilometre dağıtım, müşteri ilişkileri ve geri dönüşler ve tersine lojistik olmak üzere geniş bir kapsamda ele alınabilir. Bu kapsam, geleneksel lojistik operasyonlardan farklı olarak daha

yüksek frekansta küçük hacimli siparişler, kısa teslimat süreleri ve yoğun talep dalgalanmalarıyla karakterize edilmektedir. Bu bölümde e-ticaret lojistiğini şekillendiren temel kavramlar; performans göstergeleri, son kilometre dağıtımı, mikro-depoya dayalı lojistik modelleri, sürdürülebilir teslimat teknolojileri ve dijital platform ekonomisi çerçevesinde ele alınmaktadır.

2.1. E-Ticaret Lojistiğinin Tanımı ve Yapısal Bileşenleri

E-ticaret lojistiği, çevrimiçi ortamda verilen siparişlerin doğru zaman, en uygun maliyet ve doğru şartlar altında müşteriye ulaştırılmasını amaçlayan, dijital platformlar aracılığı ile bilgi, finansal akış ve fiziksel dağıtım süreçlerinin bütünleşik bir şekilde yönetildiği sistemlerdir. Dolayısı ile e-ticaretin yalnızca dağıtım faaliyetlerinden ibaret olmadığı, bilgi yönetimi, veri analitiği ve müşteri deneyimiyle yakından ilişkili bir süreçtir.

E-ticaret lojistiğinin geleneksel perakende lojistiğinden ayıran temel özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir (Hübner vd., 2016; Mangiaracina vd., 2019; Shuaibu vd., 2025):

- Sipariş hacimlerinin yüksek, sipariş miktarlarının düşük olması,
- Teslimat hızına yönelik müşteri beklentilerinin artması,
- İade oranlarının geleneksel perakendeye kıyasla çok daha yüksek olması,
- Gelişmiş dijital entegrasyon gereksinimleri,
- Son kilometre operasyonlarının maliyet baskısı.

Bu faktörler, e-ticaret lojistiğinin operasyonel açıdan çok daha karmaşık bir yapı sergilemesine yol açmaktadır. Özellikle hızlı teslimat beklentisi, stok görünürlüğü, gerçek zamanlı lojistik koordinasyon ve müşteri deneyimini önceleyen yapıların zorunlu hâle gelmesine neden olmuştur.

Literatürde, e-ticaret lojistiğinin etkinliğinin stok ve sipariş görünürlüğü, gerçek zamanlı takip sistemleri ve uçtan uca veri bütünlüğü ile yakından ilişkili olduğu vurgulanmaktadır. Özellikle son kilometre lojistiğinde görünürlük eksikliği kritik bir risk faktörü olarak öne çıkarken, paketin konumuna ilişkin

gerçek zamanlı bilgi ve GPS tabanlı takip uygulamaları, operasyonel verimliliği artıran temel kriterler arasında yer almaktadır (Raj vd., 2024; Shuaibu vd., 2025; Ooi vd., 2025; Jean, 2024). Başka bir çalışmada ise, Fikar (2018) e-ticaret lojistiğinde veri altyapısı ve bilgi yönetiminin kritik önem taşıdığını; rota optimizasyonu, teslimat hızının artırılması, enerji verimliliğinin sağlanması, tersine lojistik kapasitesinin geliştirilmesi ve süreçlerin genel anlamda çevre dostu hâle getirilmesinde ileri analitik sistemlerin zorunlu olduğunu ifade etmektedir. Dolayısıyla dijitalleşme, e-ticaret lojistiğinin hem performansını hem de sürdürülebilirliğini belirleyen çekirdek unsur hâline gelmiştir.

2.1.1. E-Ticaret Lojistiğinde Performans Göstergeleri

Lojistik performans değerlendirmesi, geleneksel ölçütlerin ötesine geçerek çevresel ve deneyimsel boyutları da içeren çok boyutlu bir yapıya dönüşmüştür. Huang ve Benyoucef'in (2013) e-ticaret lojistiği performans modeline göre temel göstergeler şunlardır:

- Teslimat hızı (delivery speed)
- Zamanında teslimat oranı (on-time delivery rate)
- Stok bulunurluğu (inventory availability)
- Teslimat başına maliyet (cost per delivery)
- İade oranı (return rate)
- Müşteri deneyimi ve memnuniyet göstergeleri
- Karbon yoğunluğu (CO₂/teslimat)

E-ticaret lojistiğinde performans göstergelerinin yalnızca operasyonel verimlilik ekseninde ele alınması yeterli görülmemekte; karbon yoğunluğu ve kaynak verimliliği gibi çevresel kriterlerle bütünlük bir değerlendirme yaklaşımının benimsenmesi gerekmektedir. Özellikle hızlı teslimat beklentilerinin artması ve küçük hacimli siparişlerin yaygınlaşması, kent içi dağıtım faaliyetlerinden kaynaklanan karbon emisyonlarını önemli ölçüde artırmakta; bu durum, sürdürülebilirlik performansını lojistik başarının değerlendirilmesinde zorunlu bir bileşen hâline getirmektedir. Bu bağlamda yeşil lojistik uygulamaları, enerji verimliliği stratejileri ve karbon ayak izi ölçüm sistemleri, e-ticaret lojistiğinde hem rekabet avantajı yaratan hem de

uzun vadeli operasyonel sürdürülebilirliği destekleyen temel stratejik unsurlar olarak öne çıkmaktadır (Eğilmez, 2025).

2.1.2. Tüketici Davranışları ve Teslimat Beklentileri

E-ticaret lojistiğinin yapısı yalnızca operasyonel parametrelerle değil, tüketici davranışları ile de belirlenmektedir. Nitekim hızlı teslimat, teslimat esnekliği ve uygun zaman aralıkları, müşteri bağlılığında kritik rol oynamaktadır. Flashbox (2023) tarafından yapılan kullanıcı anketi şu bulguları ortaya koymuştur:

- Tüketicilerin %88'i aynı gün teslimat için ek ücret ödemeyi tercih etmektedir.
- %53'ü, kargo süresinin uzunluğu nedeniyle satın alma sürecini terk etmektedir.
- %55'i, daha hızlı teslimat sunan rakip firmaya geçmeye hazır olduğunu belirtmektedir.
- Çevrimiçi alışveriş yapanların %72'si, "hızlı teslimattan ziyade uygun teslimat zaman aralıklarını" tercih etmektedir.

Bu bulgular, e-ticaret lojistiğinin yalnızca hız odaklı değil; aynı zamanda zamanlama optimizasyonu, müşteri esnekliği ve beklenti yönetimi temelli bir yapıda tasarlanması gerektiğini göstermektedir. Kapsel ve Abdelrahman (2020), sürdürülebilir son kilometre teslimatı bağlamında e-tüketici davranışlarını incelemiş ve daha çevreci teslimat seçeneklerini tercih etme eğilimini belirleyen faktörler arasında fiyat duyarlılığının en güçlü belirleyici olduğunu bulmuştur. Araştırmaya göre çevreci teslimat tercihlerini artırmada performans beklentisi, sosyal etki veya kolaylaştırıcı koşullar etkili olmakla birlikte fiyat duyarlılığı hâlen en baskın faktördür. Bu durum, çevreci lojistik modellerinin daha fazla benimsenebilmesi için fiyatlandırma stratejilerinin kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

Sonuç olarak e-ticaret lojistiği; dijital altyapı, tüketici davranışları, teslimat hızı, stok yönetimi, veri analitiği ve çevresel sürdürülebilirliğin eşzamanlı işlediği çok boyutlu bir yapıdır. Dijitalleşme, bu yapının hem

performans düzeyini hem de sürdürülebilirlik kapasitesini belirleyen temel faktörlerdendir. Gerek operasyonel performans göstergeleri gerek tüketici beklentileri, e-ticaret lojistiğini geleneksel lojistikten ayırıştıran ana unsurlardır.

2.2. Son Kilometre Dağıtım

Son kilometre teslimatı (last-mile delivery), büyük hacimli gönderilerin dağıtım merkezlerinde ayırıştırılmasını takiben gerçekleştirilen paket dağıtımları, toptancıların ürünleri perakende satış noktalarına veya bakkaliye işletmelerine ulaştırması ile hazır yemeklerin üretildiği işletmelerden nihai tüketiciye teslim edilmesini kapsayan, tedarik zinciri ağının son aşamasındaki lojistik faaliyetler bütünü olarak tanımlanabilir. Bu süreç, tedarik zincirinde yer alan son taşıma merkezi, mikro-depo, perakende noktası ya da ürünün hazırlandığı işletmeden nihai müşteriye doğru gerçekleşen fiziksel akışı ifade etmektedir. Son kilometre mesafesi, dağıtım modeli ve sunulan hizmet türüne bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik gösterebilmekte; özellikle kurye ve ekspres kargo hizmetlerinde görev alan lojistik personeli, yoğun zaman baskısı ve yüksek hizmet seviyesi beklentileri altında faaliyet göstermektedir.

Ayrıca, son kilometre dağıtım temelli lojistik ağları, çoğu zaman aşağıdaki yenilikçi uygulamalarla birlikte tasarlanmaktadır:

- Elektrikli dağıtım araçları
- Kargo bisikletleri
- Paket teslimat dolapları (parcel lockers)
- AI tabanlı rota ve talep tahmin algoritmaları
- Otonom teslimat robotları
- İnsansız hava araçları (dronlar)

Son kilometre dağıtımı (SKD), ürünlerin dağıtım merkezlerinden, mikro-depolardan veya yerel dağıtım noktalarından nihai tüketiciye ulaştırıldığı tedarik zincirinin en kritik ve en maliyetli aşamalarındandır. Gevaers vd. (2011), bu aşamanın toplam lojistik maliyetlerinin ürün kategorisine göre %30–53'üne karşılık geldiğini belirterek SKD'nin tedarik zincirindeki stratejik önemini vurgulamaktadır. Kentsel lojistiğin temel amacı, şehir içindeki tedarik ve dağıtım faaliyetlerini **trafik yoğunluğu, güvenlik, enerji tüketimi ve**

çevresel etkiler gibi unsurları dikkate alarak optimize etmektir. Taniguchi (2014), şehir lojistiğini “pazar ekonomisi dinamikleri içinde lojistik operasyonların bilgi sistemleri desteğiyle optimize edilmesi süreci” olarak tanımlar. Bu tanım, SKD'nin yalnızca dağıtım değil; **şehir planlaması, çevresel sürdürülebilirlik ve ulaşım politikalarıyla iç içe geçen çok boyutlu** bir yapı olduğunu göstermektedir.

Kiba-Janiak vd. (2021), e-ticaretin hızla büyümesiyle SKD'nin sürdürülebilirliğinin kritik hâle geldiğini ve sürecin çevrimiçi satın alınan ürünlerin planlanması, uygulanması, koordinasyonu ve kontrolünü içeren bir kentsel lojistik faaliyetleri bütünü olduğunu ifade etmektedir. Buna göre ***sürdürülebilir SKD; maliyetleri azaltmayı, karbon emisyonlarını düşürmeyi, dağıtım güvenliğini artırmayı ve kaynak verimliliğini sağlamayı amaçlamalıdır.*** E-ticaretin hızlı yükselişi, evlere teslim paket hacimlerinde hızlı bir artışa yol açmıştır. Viu-Roig ve Alvarez-Palau (2020), her hanenin potansiyel teslimat noktası hâline gelmesiyle şehir içi teslimat trafiğinin yoğunlaştığını ve bunun kentsel yük dağıtımının etkilerini olumsuzlaştırdığını vurgulamaktadır. Bu açıdan optimize edilmiş rotaların çevresel, ekonomik ve operasyonel faydalar sağlayacağı yönündeki bulgular literatürde geniş destek bulmaktadır (Javanpour vd., 2025; Moradi vd., 2024).

2.2.1. Son Kilometre Dağıtımında Temel Sorunlar

Son kilometre dağıtımı (SKD), e-ticaret ekosisteminin **en yüksek maliyetli, çevresel etkisi en yoğun ve operasyonel açıdan yönetilmesi en güç** aşaması olarak kabul edilmektedir. Mevcut literatür, SKD süreçlerinin; operasyonel verimsizlikler, artan kentleşme baskıları ve sürdürülebilirlik gerekliliklerinin etkisiyle giderek daha karmaşık ve kırılgan bir yapıya dönüştüğünü ortaya koymaktadır (Zennaro vd., 2022; Banerjee vd., 2025). Özellikle teslimat hacmindeki hızlı artış, tüketici beklentilerinin teslimat hızı ve esnekliği yönünde yoğunlaşması ile kentsel lojistik altyapısının fiziksel ve yönetsel sınırlılıkları, SKD süreçlerinde hem maliyetlerin yükselmesine hem de çevresel etkilerin artmasına neden olmaktadır. Son kilometre teslimatının temel yapısal sorunları, siparişlerin büyük ölçüde ayrı ayrı siparişlerden oluşmasından ve her bir siparişin farklı bir adrese teslim edilmesi gerekliliği ve

varış noktalarının yüksek derecede mekânsal olarak dağılması ile ilişkilendirilmektedir (Macioszek, 2017). Bu durum, dağıtım ağlarının etkin biçimde planlanmasını zorlaştırmakta ve rota optimizasyonu ile kapasite kullanımında önemli kısıtlar oluşturmaktadır.

Bilimsel çalışmalar SKD operasyonlarını zorlaştıran unsurları çeşitli boyutlar altında ele almakta ve belirli problem alanlarını öne çıkarmaktadır (Durand & Gonzalez-Feliu, 2020; Mangiaracina vd., 2019; Macioszek, 2017; Boysen vd., 2021; Zennaro vd., 2022; Banerjee vd., 2025). Literatürde öne çıkan başlıca sorun alanları aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir:

- **Trafik yoğunluğu ve kentsel sıkışıklık:** Şehir merkezlerinde artan araç yoğunluğu, teslimat sürelerini uzatmakta ve lojistik operasyonların toplam maliyetini yükseltmektedir.
- **Düşük araç doluluk oranları:** Bireyselleşmiş teslimat yapısı, araç başına taşınan gönderi miktarını azaltmakta ve birim teslimat başına karbon yoğunluğunu artırmaktadır.
- **Teslimat başarısızlıkları ve yeniden teslimat ihtiyacı:** Alıcının adreste bulunmaması, iade süreçleri ve adres hataları, ek teslimat turları gerektirerek maliyetleri ve sera gazı emisyonlarını artırmaktadır.
- **Fosil yakıt bağımlılığı:** Son kilometre teslimatlarının büyük ölçüde içten yanmalı motorlu araçlarla gerçekleştirilmesi, SKD süreçlerinin karbon ayak izinin büyümesine yol açmaktadır.
- **Aşırı parçalanmış teslimat yapısı:** Çok sayıda küçük paketli ve tekli gönderinin ayrı dağıtım turları gerektirmesi, operasyonel verimliliği ve sürdürülebilirliği olumsuz etkilemektedir.

Bu sorunlar çerçevesinde son kilometre dağıtımı, tedarik zinciri yönetimi içerisinde **en karmaşık, en maliyetli** ve aynı zamanda **yenilikçi lojistik çözümlere en fazla ihtiyaç duyulan** aşama olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle literatürde, mikro-depo yapılanmaları, elektrikli mobilite çözümleri, veri temelli rota optimizasyonu ve alternatif teslimat modelleri gibi inovatif yaklaşımların SKD süreçlerinin iyileştirilmesinde kritik bir rol oynadığı vurgulanmaktadır. Ayrıca, bu sorun alanlarının giderek derinleşmesi, son kilometre teslimatını yalnızca operasyonel bir mesele olmaktan çıkararak çok

aktörlü bir yönetim problemine dönüştürmektedir. Nitekim SKD süreçlerinde karşılaşılan güçlüklerin önemli bir bölümü, sürece dâhil paydaşların farklı beklenti ve önceliklerinden kaynaklanmaktadır. Bu çerçevede, son kilometre teslimatı çok aktörlü bir süreçtir ve her paydaşın farklı beklentileri bulunmaktadır:

- E-müşteriler: hızlı, ucuz ve esnek teslimat talep ederken,
- Perakendeciler: müşteri memnuniyetini korumak amacıyla hız ve maliyet arasında optimal bir denge kurmaya çalışmaktadır,
- Dağıtım/Kurye şirketleri: operasyonel verimlilik ve maliyet minimizasyonuna odaklanmaktadır,
- Yerel yönetimler: trafik yoğunluğu, çevresel etkiler ve kentsel yaşam kalitesi gibi kamusal yararı önceleyen politikalar yürütmektedir.

Bu farklılaşan beklenti setleri, SKD’de sürdürülebilirliğin çok paydaşlı ve bütüncül bir yönetim modeli gerektirdiğini açık biçimde göstermektedir. Dünya Ekonomik Forumu’nun WEF (2020; 2024) gerçekleştirdiği senaryo analizleri, kentlerde e-ticaret kaynaklı teslimat trafiğine yönelik politika müdahalesi yapılmadığı takdirde 2030 yılına kadar karbon emisyonlarının yaklaşık %30 artacağını ortaya koymaktadır. Benzer biçimde OECD/ITF (2020) raporları da kentsel taşımacılığın şehir temelli sera gazı emisyonlarında kritik bir paya sahip olduğunu ve mevcut eğilimin sürdürülemez bir düzeye doğru ilerlediğini vurgulamaktadır. Sonuç olarak, bir yandan tüketicilerin hız beklentisi artarken diğer yandan sürdürülebilirlik gereklilikleri daha katı hâle gelmekte; bu durum son kilometre dağıtımının geleceğini şekillendiren temel gerilim alanını meydana getirmektedir.

2.2.2. Son Kilometre Dağıtımında Dönüşüm ve Yeni Lojistik Modeller

Son kilometre dağıtımı, dijitalleşme, kentleşme ve sürdürülebilirlik baskılarının kesiştiği noktada en hızlı dönüşen lojistik alanlarından biri hâline gelmiştir. Artan e-ticaret hacmi, tüketicilerin teslimat hızına yönelik beklentilerinin yükselmesi ve şehir içi altyapının sınırlılıkları, geleneksel SKD modellerinin yeniden tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır. Literatür, özellikle

pandemi sonrası dönemde hız odaklı q-commerce uygulamalarının, veri temelli optimizasyon yaklaşımlarının ve sürdürülebilir kentsel mobilite çözümlerinin SKD süreçlerinde belirleyici bir rol üstlendiğini ortaya koymaktadır (Savelsbergh & Van Woensel, 2016). Aynı zamanda yerel yönetimlerin şehir lojistiğine yönelik düzenlemeleri, karbon emisyonu azaltım hedefleri ve tüketici davranışlarındaki değişim, lojistik işletmelerini yenilikçi, çevre dostu ve esnek teslimat modellerine yönlendirmektedir. Bu çerçevede aşağıda, son kilometre dağıtımında dönüşümü şekillendiren temel yönelimler ve yeni lojistik modeller ele alınmaktadır.

Son kilometre dağıtımındaki dönüşüm genel olarak iki ana eksen üzerinde şekillenmektedir:

- **Hızlı teslimat (q-commerce) modelleri:** Mikro-depo yapılanmaları, dikey entegrasyon ve yoğun veri kullanımı ile teslimat süreleri 10–15 dakikaya kadar düşmüştür.
- **Sürdürülebilir şehir lojistiği gereksinimleri:** Elektrikli araç kullanımı, kargo bisikletleri, paket dolapları ve teslimat konsolidasyonu her geçen gün yaygınlaşmaktadır.

Bu iki eğilim birlikte değerlendirildiğinde, SKD'nin geleceğinde mikro-depo temelli hibrit mimarilerin, elektrikli mikro mobilitenin, AI tabanlı rota ve talep tahmin sistemlerinin ve kentsel lojistik düzenlemelerinin belirleyici olacağı öngörülmektedir (Gruber vd., 2019). Son kilometre dağıtımındaki teknoloji odaklı çözümler dört temel kategori altında sınıflandırılabilir (Silva vd., 2023; Bertolini vd., 2024):

- **Yenilikçi araç teknolojileri** (elektrikli mikro mobilite, robotik teslimat, drone sistemleri),
- **Otonom sistemler** (Otonom teslimat robotları, drone teslimat sistemleri),
- **Alternatif teslimat noktaları ve konsolidasyon çözümleri** (Paket dolapları, teslim alma noktaları, transit taşımacılık, mikro-depo ağları ve crowdshipping),

- **Politika ve planlama yaklaşımları** (kentsel teslimat kısıtlamaları, düşük emisyon bölgeleri).

Sonuç olarak son kilometre dağıtımı, modern e-ticaret tedarik zincirinin en hızlı dönüşen ve en fazla baskı altında olan bileşenidir. Hız, maliyet, çevresel sürdürülebilirlik ve kent içi yaşam kalitesi arasındaki çok boyutlu denge, SKD'nin geleceğini belirlemektedir. Güncel literatür, son kilometre dağıtımındaki dönüşümün temel itici güçlerinin inovatif lojistik modelleri, mikro-depo yapılanmaları, elektrikli mobilite çözümleri ve veri temelli optimizasyon yaklaşımları olduğunu açık biçimde ortaya koymaktadır (Shuaibu vd., 2025; Bertolini vd., 2024; Ferreira & Esperança, 2025). Bu kapsamda, aşağıda mikro-depo modelinin yapısal özellikleri, e-ticaret ekosistemindeki stratejik rolü ile elektrikli araçlar ve temiz dağıtım teknolojilerine ilişkin gelişmeler ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.

2.2.2.1. Depolar: Yapısal Özellikler ve E-Ticaretteki Stratejik Rolü

Mikro-depo (Micro-Fulfillment Center, MFC) modeli, e-ticaret faaliyetlerinin yoğunlaştığı büyük kentlerde son kilometre lojistiğinin hız, maliyet ve sürdürülebilirlik boyutları açısından yeniden kurgulanmasına olanak tanıyan yenilikçi bir dağıtım altyapısı olarak öne çıkmaktadır. Bu model, teslimat mesafesinin kısaltılması ve dağıtım ağlarının daha etkin biçimde yapılandırılması yoluyla, kentsel lojistikte karşılaşılan operasyonel ve çevresel baskıların azaltılmasını hedeflemektedir. Speranza (2018), mikro-depoların teslimat sürelerini kısaltma ve araç rotalarının etkinliğini artırma potansiyeline sahip olduğunu vurgulamakta; bu yapının yalnızca operasyonel hız açısından değil, aynı zamanda karbon yoğunluğu ve enerji tüketiminin azaltılması bakımından da önemli kazanımlar sağlayabileceğini ifade etmektedir.

Literatürde mikro-depolar, belirli ortak özellikler etrafında tanımlanmaktadır (Hübner vd., 2016; Gevaers vd., 2014; Speranza, 2018). Buna göre **mikro-depolar**; *şehir merkezlerine veya yüksek talep yoğunluğuna sahip bölgelere yakın konumlanan, küçük ölçekli ancak yüksek devir hızına sahip lojistik birimlerdir*. Bu yapılar, sınırlı ürün çeşitliliğine karşın hızlı dönen stoklara odaklanmakta ve özellikle hızlı teslimat ile q-commerce iş

modellerinin temel lojistik altyapısını oluşturmaktadır. Ayrıca depo otomasyonu, robotik sipariş toplama sistemleri ve gerçek zamanlı stok görünürlüğü gibi dijital teknolojilerle entegre edilerek operasyonel verimlilikleri artırılmaktadır.

Mikro-depo tabanlı lojistik modellerin, yüksek talep yoğunluğuna sahip kentsel alanlarda teslimat mesafelerini kısalttığı, araç doluluk oranlarını artırdığı ve yeniden teslimat oranlarını düşürdüğü; bu sayede toplam karbon emisyonlarında kayda değer azalmalar sağladığı literatürde yaygın biçimde kabul edilmektedir. Mangiaracina vd. (2019), mikro-fulfillment teknolojilerinin çevresel maliyetleri düşürürken operasyonel esnekliği artırdığını vurgulamakta ve bu yapıları geleceğin sürdürülebilir kentsel lojistik altyapısı olarak tanımlamaktadır. Benzer şekilde Yang vd. (2024), q-commerce ağları için geliştirilen mikro-depo konumlandırma modellerinin teslimat süreleri ve işletme kârlılığı üzerinde belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Mikro-depo temelli lojistik sistemler, çoğu zaman mikro mobilité çözümleri ile bütünleşik şekilde tasarlanmaktadır. Kentsel alanlarda son kilometre teslimatları, elektrikli kargo bisikletleri, scooterlar ve benzeri küçük ölçekli araçlar aracılığıyla gerçekleştirilebilmekte; bu araçlar düşük emisyon değerleri sayesinde çevresel açıdan avantaj sunmaktadır. Bununla birlikte, mikro mobilité araçlarının sınırlı taşıma kapasiteleri ve görece düşük hızları, yüksek sefer sayısı ve büyük filo gereksinimi gibi operasyonel kısıtları beraberinde getirmektedir. Bu kısıtların aşılabilmesi amacıyla literatürde, çok modlu lojistik sistemler ön plana çıkmaktadır. Bu kapsamda önerilen yaklaşımda, gönderiler yüksek kapasiteli ve verimli taşıma modlarıyla kentsel alanların çevresine veya uygun koşullarda kent içine taşınmakta; ardından mikro-depolarda konsolide edilerek mikro mobilité araçları aracılığıyla nihai alıcılara ulaştırılmaktadır. Stokkink ve Geroliminis (2025), bu tür çok modlu yapıların, büyük ölçekli taşıma araçlarının ölçek ekonomilerinden yararlanırken, kentsel alanlardaki emisyon, gürültü ve erişim kısıtlarını önemli ölçüde azaltabildiğini ortaya koymaktadır. Böylece sistem, mikro mobilitenin çevresel ve mekânsal esnekliğini korurken, kapasite sınırlılıklarını büyük ölçüde dengeleyebilmektedir.

Sonuç olarak mikro-depolar, modern e-ticaretin hız, doğruluk ve çevresel sürdürülebilirlik baskıları altında yeniden şekillenen lojistik mimarisinin merkezinde yer almaktadır. Hem q-commerce iş modellerinin temelini oluşturmakta hem de kentsel lojistik bağlamında yeni planlama ve politika tartışmalarını beraberinde getirmektedir. Dijital teknolojiler, yenilikçi teslimat araçları ve sürdürülebilir şehir planlaması ile bütüncül biçimde değerlendirildiğinde, mikro-depolar son kilometre dağıtımının geleceğini belirleyen en kritik lojistik altyapı unsurlarından biri hâline gelmektedir.

2.2.2.2. Elektrikli Araçlar ve Temiz Dağıtım Teknolojileri

Elektrikli araçlar (EV), kargo bisikletleri ve diğer temiz dağıtım teknolojileri, artan e-ticaret hacmiyle birlikte kentsel alanlarda yoğunlaşan lojistik baskılar sonucunda, son kilometre dağıtımının dönüşümünde stratejik bir rol üstlenmiştir. Kent içi teslimat faaliyetlerinin hem maliyet hem de çevresel etkiler bakımından giderek daha sorunlu hâle gelmesi, lojistik işletmelerini düşük emisyonlu ve enerji verimli alternatiflere yönleltmektedir. Bu bağlamda, elektrikli mobiliteye yönelik kamu teşvikleri, görece düşük işletme ve bakım maliyetleri ile birlikte lityum-iyon batarya teknolojilerindeki hızlı maliyet düşüşleri, elektrikli dağıtım araçlarını kentsel lojistik operasyonları açısından giderek daha cazip bir seçenek hâline getirmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA, 2024) verileri, batarya maliyetlerinin 2010 dan bu yana yaklaşık %90 oranında azaldığını ortaya koymakta; bu gelişme, elektrikli araçların ölçeklenebilirliğini ve ticari uygulanabilirliğini önemli ölçüde artırmaktadır.

Elektrikli dağıtım araçlarının enerji tüketimi, bakım gereksinimleri ve kullanım ömürleri dikkate alındığında, içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla daha düşük toplam sahip olma maliyeti sunduğu görülmektedir (Ferreira & Esperança, 2025). Bunun yanı sıra, çevresel performans açısından da anlamlı avantajlar sağlamaktadırlar. WEF (2020), elektrikli dağıtım filolarının kent içi karbon emisyonlarını %60'a kadar azaltabildiğini ortaya koyarken; Castillo ve Álvarez (2023) elektrikli hafif ticari araçların (e-van) yoğun teslimat bölgelerinde karbon ve azot salımlarını belirgin biçimde düşürdüğünü

göstermektedir. Ayrıca, düşük gürültü seviyeleri sayesinde bu araçlar kentsel yaşam kalitesine olumlu katkı sunmaktadır.

Elektrikli ve temiz dağıtım teknolojileri farklı operasyonel gereksinimlere yanıt veren çeşitli araç ve sistemler altında sınıflandırılabilir:

- **Elektrikli scooter ve motosikletler;** özellikle q-commerce operasyonlarında hızlı tepki süresi ve düşük birim maliyet avantajı nedeniyle yaygın biçimde kullanılmaktadır.
- **Kargo bisikletleri;** DHL, UPS, DPD ve Amazon gibi küresel lojistik aktörleri tarafından Avrupa kentlerinde yaygın olarak benimsenmiş olup, kısa mesafe teslimatlarda yüksek enerji verimliliği sunmaktadır.
- **Elektrikli hafif ticari araçlar;** kent içi yoğun yük dağıtımı için düşük emisyonlu bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.
- **Drone teslimat sistemleri;** Amazon Prime Air ve Google Wing örneklerinde görüldüğü üzere, özellikle düşük ağırlıklı gönderilerde teslimat sürelerini önemli ölçüde kısaltma potansiyeline sahiptir.
- **Otonom teslimat robotları;** Starship, Kiwibot ve Amazon Scout gibi otonom teslimat robotları, kampüs ve mahalle ölçeğinde lojistik faaliyetlerde giderek daha görünür hâle gelmektedir.

Bu teknolojilerin her biri, operasyonel süreç ve teslimat yapısına bağlı olarak farklı avantajlar sunmakta; ancak ortak noktaları, toplam karbon yoğunluğunu azaltma ve operasyonel verimliliği artırma potansiyelleridir. Özellikle kargo bisikletleri, kentsel lojistik literatüründe en verimli araçlardan biri olarak değerlendirilmektedir. Papaioannou (2023), kargo bisikletlerinin kısa mesafe teslimatlarda motorlu araçlara kıyasla %70-80'e varan enerji tasarrufu sağlayabildiğini ortaya koyarken; güncel çalışmalar, bu araçların trafik sıkışıklığını ve karbon salımını azaltmada yüksek bir potansiyele sahip olduğunu doğrulamaktadır.

Sonuç olarak, elektrikli araçlar, kargo bisikletleri, drone sistemleri, otonom robotlar ve alternatif teslimat noktaları, modern e-ticaret lojistiğinde daha temiz, daha sessiz ve daha enerji verimli bir dağıtım altyapısının oluşmasına imkân tanımaktadır. Bu teknolojilerin:

- Operasyonel maliyetleri azaltabileceği,
- Karbon salımını anlamlı ölçüde düşürebileceği,
- Trafik ve gürültü kirliliğini azaltabileceği,
- Teslimat kalitesini ve müşteri deneyimini iyileştirebileceği,
- Sürdürülebilir şehir lojistiğinin gelişimine katkı sağlayabileceği,

güncel çalışmalar (Ferreira & Esperança, 2025; Mohammad vd., 2023; Bertolini vd., 2024; Castillo & Álvarez, 2023; Papaioannou 2023) tarafından tutarlı şekilde ortaya konulmuştur. Bu nedenle elektrikli ve temiz dağıtım teknolojileri, geleceğin kentsel lojistik sistemlerinin temel yapı taşları arasında değerlendirilmektedir.

2.2.3. Dijital İş Modelleri ve Platform Ekonomisinin Lojistikteki Rolü

Dijitalleşmenin hız kazandığı 21. yüzyılda yapay zekâ ile birlikte işletmelerin stratejik karar alma süreçlerinden insan kaynakları yönetimine, müşteri ilişkilerinden üretim süreçlerine kadar pek çok alanda dönüştürücü bir etki yaşanmaktadır (Kanoğlu ve Durak, 2025). Ekonomide artan dijitalleşme eğilimi ve ileri teknolojik sistemlerin yaygınlaşması, işletmelerin değer oluşturma, sunma ve yakalama biçimlerini köklü biçimde dönüştürmektedir. Bu dönüşümden doğrudan etkilenen alanlardan biri olan lojistik sektörü, özellikle son kilometre dağıtımının giderek dijitalleşen yapısı sayesinde platform ekonomisinin modern e-ticaret lojistiğinin en kritik bileşenlerinden biri hâline gelmesine tanıklık etmektedir. Lojistik faaliyetlerin dijital altyapılar aracılığıyla platform temelli yapılara entegre edilmesi, yalnızca operasyonel süreçlerin yeniden tasarlanmasını değil, aynı zamanda sektörün gelecekteki iş evrimini belirleyen temel dinamiklerin oluşmasını da beraberinde getirmektedir. Bu yapı, işletmeler arası iş birliklerini güçlendirerek farklı aktörlerin aynı değer ağı içerisinde koordineli biçimde faaliyet göstermesini sağlamakta ve müşterilere uçtan uca entegre hizmet sunulmasını mümkün kılmaktadır (Turienzo vd., 2024).

Platform ekonomisinin ayırt edici özelliği, çok taraflı platform mimarileri aracılığıyla değer yaratma sürecini yeniden tanımlamasıdır. Çok

tarafli platformlar (multi-sided platforms), ürün veya hizmetlerin mülkiyetini doğrudan üstlenmek yerine; pazarın farklı taraflarında yer alan aktörler tarafından sağlanan kaynaklara ve faaliyetlere dayanmaktadır. Bu bağlamda platformların temel işlevi, ürün veya hizmet geliştirmek ya da satmak değil; farklı kullanıcı grupları arasında etkileşim, eşleşme ve koordinasyon sağlamaktır. Bu özellik, platformları geleneksel üretim veya tedarik odaklı yapılardan ayırmakta ve onları ağ temelli değer yaratma mekanizmalarının merkezine yerleştirmektedir (Zhao vd., 2020).

İş modelleri, müşterilere değer üreten, bu değeri ortaya çıkaran ve sunan organizasyonel mekanizmalar olarak tanımlanmakta olup (Bouncken vd., 2021), dijital iş modellerine veya platform temelli yapılara dayalı firmalar, görece düşük yatırım ve varlık gereksinimleri sayesinde yüksek büyüme potansiyeline sahiptir. Bu firmalar, dijital teknolojiler aracılığıyla müşteri ihtiyaçlarını daha etkin biçimde analiz edebilmekte ve veriye dayalı çözümlerle hedefe yönelik değer önerileri geliştirebilmektedir (Ruutu vd., 2017). Bununla birlikte, literatür; yerelleşme zorunlulukları, teknoloji eskimesi, finansal yapı, yasal düzenlemeler ve işgücü özellikleri gibi şirket içi faktörlerin bazı sektörlerde iş modellerinin uyarlanmasını güçleştirdiğini ve bu durumun yıkıcı yeniliklerin olumsuz etkilerini artırabildiğini ortaya koymaktadır.

Platform ekonomisi, yalnızca operasyonel verimliliği artıran bir araç olmanın ötesinde, yeni değer yaratma biçimlerini mümkün kılan bütüncül bir ekosistem sunmaktadır. Parker vd. (2016), platform mimarilerinin çok taraflı kullanıcı grupları arasında veri akışını optimize ederek güçlü ağ etkileri yarattığını; bu ağ etkilerinin platform ölçeği büyüdükçe operasyonel maliyetleri düşürdüğünü ve pazar gücünü artırdığını vurgulamaktadır. Bu çerçevede platform ekonomisi, lojistik sektöründe rekabet dinamiklerini dönüştürmekte; müşteri deneyimi, işgücü yönetimi ve sürdürülebilirlik boyutlarında yeni normların oluşmasına katkı sağlayarak son kilometre lojistiğinin yapısal dönüşümünde belirleyici bir rol üstlenmektedir.

Son kilometre dağıtımının giderek dijitalleşen yapısı, platform ekonomisini modern e-ticaret lojistiğinin en kritik bileşenlerinden biri hâline getirmiştir. Dijital platformlar; tüketiciler, satıcılar, kuryeler ve lojistik hizmet

sağlayıcılarını aynı ağ üzerinde buluşturarak çok taraflı bir değer oluşturmakta ve böylece geleneksel tedarik zinciri modellerinden köklü biçimde ayrılmaktadır. Amazon Flex, DoorDash, Getir, Trendyol Go, Uber Eats ve Instacart gibi işletmeler, bu çok taraflı platform (multi-sided platform) mimarisini kullanarak arz–talep eşleşmesini gerçek zamanlı veriye dayalı biçimde optimize eden yenilikçi lojistik iş modelleri geliştirmiştir. Bu dijital mimari hem operasyonel esneklik sağlaması hem de ölçeklenebilirliği artırması nedeniyle son kilometre dağıtımında stratejik unsur olarak değerlendirilebilir (Rai vd., 2019).

Platform temelli lojistik modelleri, geleneksel dağıtım yapılarından farklı olarak tamamen veri odaklı dijital altyapılar üzerinden yönetilmektedir. Bu altyapının temel bileşenleri arasında dinamik kurye tahsisi, yoğunluk haritalarıyla talebin gerçek zamanlı takibi, yapay zekâ tabanlı rota optimizasyonu, makine öğrenimi temelli talep tahmini algoritmaları, gerçek zamanlı sipariş görünürlüğü, esnek işgücü kullanımı (gig logistics) ve algoritmik performans yönetimi yer almaktadır. Platform temelli lojistik modelleri özellikle talep dalgalanmalarının yoğun olduğu kentsel bölgelerde kritik avantajlar sunabilir; operasyonel kapasitenin kolayca ölçeklenmesine, teslimat sürelerinin anlamlı şekilde kısılmasına ve işletme maliyetlerinin azalmasına katkı sağlayabilir. Literatür, bu tür platform altyapılarının teslimat hızını artırdığını, operasyonel dalgalanmalara hızlı adaptasyon sağladığını ve maliyet etkinliğini güçlendirdiğini göstermektedir (Gevaers vd., 2011; Hübner vd., 2016; Tiwari vd., 2024).

Platform ekonomisinin lojistik alanındaki yetkinliklerini üç temel alanda toplayabiliriz:

- **Algoritmik arz–talep eşleştirmesi:** Dijital platformlar esnek iş ve lojistik bağlamında algoritmik görev eşleştirmesi ile talebe uygun iş dağıtımı sağlayabilir,
- **Yüksek görünürlüklü şeffaf operasyon yönetimi:** Dijitalleşme lojistikte gerçek zamanlı veri akışı ve görünürlük yaratarak operasyon yönetimini güçlendirebilir,

- **Gig-ekonomi üzerinden ölçeklenebilir işgücü kullanımı:** Platformlar, iş gücünü talebe göre esnek ve ölçeklenebilir şekilde organize eder ve algoritmik araçlarla yönetebilir.

Bu yetkinliklerin birleşimi, platform bazlı lojistik işletmelerine geleneksel modellerin ötesinde hız, verimlilik ve esneklik sağlayabilmektedir.

Mobil teknolojilerin gelişimiyle birlikte gerçek zamanlı veri akışı, platform ekonomisinin lojistikteki işleyişini belirleyici hâle gelmiştir. Rai vd. (2019), anlık veri akışının platform operasyonlarının en kritik bileşeni olduğunu; müşteri taleplerindeki mikro değişikliklerin saniyeler içinde rota planlarına, kurye tahsisine ve fiyatlandırmaya yansıtılabildiğini vurgulamaktadır. Benzer biçimde Serpin (2025), dinamik ücretlendirme ve talep tabanlı işgücü planlamasının platform tabanlı modellerin rekabet avantajını artırdığını, özellikle yoğun dönemlerde maliyet ve teslimat performansını optimize ettiğini belirtmektedir.

Platform ekonomisi yalnızca operasyonel verimlilik sağlayan bir sistem değil, aynı zamanda yeni değer yaratma biçimlerini de mümkün kılan bir ekosistemdir. Parker vd. (2016), platform düzeneklerinin çok taraflı kullanıcı grupları arasında veri akışını optimize ederek güçlü ağ etkileri yarattığını, bu etkinin büyüdükçe platformların operasyonel maliyetlerini düşürdüğünü ve pazar gücünü artırdığını ifade etmektedir. Bu kapsamda platform ekonomisi, lojistik sektöründe hem rekabet dinamiklerini dönüştürmekte hem de müşteri deneyimi, işgücü yönetimi ve sürdürülebilirlik açısından yeni normlar oluşturmaktadır.

Son kilometre lojistiği açısından platform ekonomisinin etkileri şu başlıklar altında toplanabilir (Wang vd., 2025; Tudisco vd., 2025; García-Herrera vd., 2025):

- **Teslimat süresinde önemli kısalma** (AI tabanlı rota ve dinamik kurye atanması yoluyla),
- **Operasyonel esneklik ve hızlı ölçeklenebilirlik,**
- **Birim teslimat maliyetlerinde düşüş,**

- **Müşteri memnuniyetinde artış** (Gerçek zamanlı müşteri deneyimi ve şikâyet yönetimi ile),
- **Karbon emisyonunda azalma** (Elektrikli araç, rota ve araç optimizasyonu ile),
- **Yenilikçi iş gücü modellerinin gelişimi.**

Bu kapsamda platform ekonomisi, e-ticaret lojistiğini yalnızca hız ve maliyet açısından değil, aynı zamanda veri yönetimi, müşteri deneyimi, işgücü dinamikleri, teknoloji kullanımı ve sürdürülebilirlik boyutlarında da yeniden şekillendirerek son kilometre dağıtımının geleceğine yön veren stratejik bir dönüşüm mekanizması hâline gelmiştir.

3. VAKA ANALİZLERİ: GETİR, TRENDYOL VE YEMEKSEPETİ ÖRNEĞİ

Bu bölümde Türkiye'nin e-ticaret ve hızlı teslimat ekosisteminde kritik bir konumda bulunan Getir, Trendyol ve Yemeksepeti platformlarının lojistik mimarileri, operasyonel süreçleri, sürdürülebilirlik stratejileri ve dijital iş modelleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir. Söz konusu üç platform, Türkiye'de son kilometre dağıtımının farklı alt modellerini temsil etmekte ve literatürde tanımlanan üç ana lojistik kategoriyle örtüşmektedir:

- Mikro-depo temelli q-commerce modeli (*Getir*),
- Çok katmanlı e-ticaret lojistiği ve hızlı teslimat hibrit modeli (*Trendyol*),
- Platform tabanlı talep üzerine (on-demand) yemek teslimat modeli (*Yemeksepeti*).

Bu üç modelin birlikte incelenmesi, Türkiye'nin kentsel lojistik dönüşümünü bütüncül bir çerçevede değerlendirmeye olanak sağlamaktadır.

Türkiye bağlamında Getir ve Trendyol gibi platformlar, küresel e-ticaret ve q-commerce dönüşümünün yerel ölçekteki en görünür örnekleri arasında değerlendirilmektedir. Getir'in İstanbul merkezli mikro-depo tabanlı “dakik teslimat” iş modeli, uluslararası literatürde quick commerce'in öncü

örneklerinden biri olarak konumlandırılmakta; şirketin hiper-yerel depo yapılanması, yoğun veri kullanımı ve gerçek zamanlı rota optimizasyonu, q-commerce operasyonlarının evrimini anlamak için referans niteliği taşımaktadır (McKinsey & Company, 2022; Yang, 2024).

Benzer şekilde Trendyol Express ve Trendyol Go, platform ekonomisi yaklaşımını çok katmanlı depo ağı, sözleşmeli ve bağımsız kurye modelleri, dijital ödeme çözümleri ve veri temelli operasyon mimarisi ile bütünleştiren kapsamlı bir e-ticaret lojistik ekosistemi sunmaktadır. Trendyol'un yayınladığı sürdürülebilirlik raporları, platformun hem son kilometre filosuna hem de bölgesel depo altyapısına yaptığı yatırımların operasyonel verimliliği artırdığını göstermektedir (Trendyol, 2023; Trendyol, 2024).

Türkiye’de son kilometre pazarının gelişimine ilişkin sektör analizleri de bu bulguları desteklemektedir. Ken Research (2024) tarafından hazırlanan Türkiye kentsel teslimat pazar raporu, Getir, Trendyol Express, Hepsijet ve Yemeksepeti gibi platformların kentsel lojistik altyapısının şekillenmesinde belirleyici aktörler olduğunu; özellikle mikro-depo yapılanmaları, esnek kurye ağları ve dijital yönetim mekanizmaları sayesinde operasyonel kapasitenin hızlı ölçeklenebildiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca Yemeksepeti’nin on-demand yemek teslimat modeli, gig-temelli kurye ağı ve gerçek zamanlı müşteri-etkileşim platformu ile Türkiye’nin platform lojistiğinde öncü uygulamalardan biridir.

3.1. Getir: Mikro-Depo Temelli Hızlı teslimat Modeli

Getir, 2015 yılında İstanbul’da kurulan ve 10 dakikada teslimat vaadiyle dünya genelinde hızlı teslimat (quick commerce) iş modelinin öncülerinden biri olarak konumlanan yenilikçi bir lojistik platformudur. Q-commerce yaklaşımı; mikro-depo temelli hiper-yerel dağıtım ağları, sınırlı fakat yüksek devir hızına sahip stok portföyü, gerçek zamanlı veri analitiği ve algoritmik karar mekanizmaları sayesinde geleneksel e-ticaret lojistiğinden önemli ölçüde ayrılmaktadır. Getir’in Türkiye’de bir ilk olarak sunduğu “Alışveriş Listem” özelliği, kullanıcıların yazılı alışveriş listelerinin görsel tanıma ve yapay zekâ destekli eşleştirme algoritmaları aracılığıyla otomatik olarak sepete

dönüştürülmesini sağlayarak sipariş oluşturma süresini önemli ölçüde kısaltmaktadır. Benzer şekilde, kullanıcıların geçmiş satın alma davranışlarına dayalı olarak önerilen “Hazır Sepet” uygulaması, kişiselleştirilmiş ürün kombinasyonları aracılığıyla karar verme yükünü azaltmakta ve işlem hızını artırmaktadır. Operasyonel tarafta ise Getir, kendi bünyesinde geliştirdiği yapay zekâ sistemleriyle süreçlerini uçtan uca veriye dayalı biçimde yönetmekte; yüz milyonlarca kurye yolculuğundan elde edilen büyük veri setlerini kullanarak geliştirilen Tahmini Varış Süresi (TVS) sistemi sayesinde trafik yoğunluğu, aktif kurye sayısı, anlık sipariş hacmi ve hava koşulları gibi değişkenleri saniyeler içinde analiz edebilmektedir (URL: Getir, 2025). Bu yapı, teslimat performansının istikrarlı biçimde sürdürülmesine katkı sağlarken, lokasyon bazlı teklifler, kişiye özel kampanyalar ve bölgesel talep örüntülerine uygun depo stok yönetimi gibi akıllı perakende uygulamalarıyla her kullanıcı için bağlamsal olarak farklılaştırılmış bir deneyim sunulmasına olanak tanımaktadır. Böylece Getir, yapay zekâ destekli karar mekanizmalarını hem operasyonel verimlilik hem de müşteri deneyimi ekseninde bütünleştirerek q-commerce ekosisteminde veri temelli rekabet avantajı elde etmektedir.

Getir’i q-commerce ekosisteminde faaliyet gösteren diğer işletmelerden ayıran temel unsur, yüksek düzeyde dijitalleşmiş ve veri odaklı biçimde yapılandırılmış lojistik yönetim sistemidir. *Yoğun hız baskısı altında faaliyet gösteren bu tür platform temelli işletmelerde operasyonel süreçler; gerçek zamanlı veri akışı, algoritmik karar mekanizmaları ve yapay zekâ destekli optimizasyon araçları etrafında kurgulanmaktadır.* Dünya Ekonomik Forumu (2020), bu tarz algoritmik yönetim mekanizmalarının ultra-hızlı teslimat ağlarında kritik bir rol oynadığını ifade etmektedir. Getir, q-commerce sektöründe ileri veri analitiği altyapısı, elektrikli mobilite kullanımı ve müşteri odaklı ultra-hızlı teslimat yaklaşımı sayesinde q-commerce literatürünün en belirgin örneklerinden birini oluşturmaktadır.

3.2. Trendyol: Hibrit E-Ticaret Lojistiği ve Hızlı Teslimat Modeli

Trendyol, Türkiye’nin en büyük e-ticaret platformlarından biri olarak hem geleneksel e-ticaret siparişlerinin yürütüldüğü Trendyol Express

operasyonlarını hem de hızlı market ve yemek teslimatını kapsayan Trendyol Go hizmetini bünyesinde barındıran hibrit bir lojistik mimari ile faaliyet göstermektedir. Bu yapı, literatürde “multi-channel last-mile logistics” ve “hybrid fulfillment architecture” kavramlarıyla tanımlanan; e-ticaret ve q-commerce süreçlerinin aynı platform üzerinde bütünleşik biçimde yönetildiği özgün bir modeldir. Bu hibrit model, Trendyol’a hem yüksek hacimli standart e-ticaret siparişlerini yönetme hem de dakik teslimat gerektiren on-demand ihtiyaçlara hızlı yanıt verme kapasitesi kazandırmaktadır. Trendyol’un 2023 kurumsal sürdürülebilirlik raporuna göre, platform Türkiye çapında milyonlarca aktif müşteriye geniş ürün yelpazesi, farklı teslimat hız seçenekleri ve veri odaklı lojistik süreçler sunarak güçlü ve esnek bir tedarik zinciri altyapısı oluşturmaktadır (Trendyol, 2023).

Trendyol’un lojistik mimarisi, literatürde çok katmanlı dağıtım yapısı olarak sınıflandırılan (Hübner et al., 2016) geniş bir mekânsal model üzerine kuruludur. Bu yapı dört temel bileşenden oluşmaktadır:

- **Ana Dağıtım Merkezleri (Fulfillment Centers):** Yüksek hacimli stoklama, sipariş toplama ve paketleme operasyonlarının yürütüldüğü merkezler.
- **Bölgesel Transfer Merkezleri (Cross-Dock Hubs):** Siparişlerin kısa süreli aktarıldığı ve bölgesel dağıtıma hazırlandığı geçiş noktaları.
- **Yerel Dağıtım İstasyonları:** Siparişlerin son kilometreye yönlendirildiği ve kuryelere teslim edildiği operasyon merkezleri.
- **Kurye Ağı (Trendyol Express / Trendyol Go):** Farklı hizmet hızlarına göre özelleştirilmiş teslimat hatları.

Bu bütünleşik yapı, Trendyol’un Türkiye’nin en büyük son kilometre dağıtım ağlarından birine sahip olmasını sağlamakta ve ölçek ekonomisi oluşturmaktadır. Ayrıca Trendyol’un fulfillment yapısına 3PL entegrasyonlarını dahil etmesi, literatürde “collaborative fulfillment” olarak adlandırılan esnek kapasite modelini desteklemektedir (Wang vd., 2021). Bu model, Trendyol’a: Yoğun dönemlerde kapasite artırımı, operasyonel maliyetlerde düşüş, teslimat hızında gelişme sağlayabilmektedir. Getir örneğinde olduğu gibi Trendyol da lojistik süreçlerinin önemli bir bölümünü

ileri veri analitiği, yapay zekâ, makine öğrenimi ve gerçek zamanlı optimizasyon teknolojileriyle yönetmektedir. Trendyol'un dijital operasyon altyapısını şu bileşenlerle açıklanabilir:

- Makine öğrenimi temelli (Tahmini Varış Süresi) ETA tahmin modelleri,
- Talep tahmini ve kapasite planlama algoritmaları,
- AI tabanlı gerçek zamanlı rota optimizasyonu,
- Isı haritaları ile kurye dağılım planlaması,
- Dinamik fiyatlandırma (peak pricing) algoritmaları,
- Uçtan uca sipariş görünürlüğü ve takip sistemleri.

Trendyol'un hibrit e-ticaret lojistik yapısı, akademik literatürde çeşitli avantaj ve sınırlılıklarla ele alınmaktadır.

Avantajlar

- Geniş ürün çeşitliliği ile hızlı teslimat seçeneklerinin birlikte sunulabilmesi,
- Çok katmanlı yapı sayesinde güçlü ulusal kapsama imkânı,
- Veri odaklı operasyon yönetimi ile yüksek teslimat doğruluğu,
- Paket dolapları ve elektrikli mobilite ile sürdürülebilirlik performansının artması.

Sınırlılıklar

- Çok katmanlı ağ yapısının yüksek sabit yatırım gerektirmesi,
- Kentsel bölgelerde kurye yoğunluğunun artmasına bağlı operasyonel baskılar,
- Paket sayısının artmasıyla ambalaj atığının yükselmesi,
- Elektrikli araç altyapısının henüz tam ölçekli yaygınlaşmamış olması.

Trendyol, lojistik operasyonlarında yalnızca verimlilik odaklı değil, aynı zamanda **çevresel sürdürülebilirlik odaklı bir dönüşüm stratejisi**

benimsemektedir. Trendyol 2023–2024 Sürdürülebilirlik Raporlarında öne çıkan stratejik adımlar şunlardır:

- *Enerji verimli depo ve operasyon altyapısı,*
- *Geri dönüştürülebilir ambalaj malzemeleri kullanımı ve atık azaltımı,*
- *Trendyol Dolap teslimat noktalarının yaygınlaştırılması,*
- *Elektrikli araç ve mikro mobilite yatırımları,*
- *Karbon emisyonu azaltımına yönelik veri temelli optimizasyon stratejileri.*

WEF (2020) ve OECD (2020), teslimat dolapları ve mikro konsolidasyon merkezlerinin teslimat turlarını %15–25 oranında azaltarak karbon yoğunluğunu düşürdüğünü göstermektedir; Trendyol’un teslimat dolabı çözümü bu bulgularla önemli ölçüde örtüşmektedir. Sonuç olarak, Trendyol’un hibrit e-ticaret lojistiği modeli, Türkiye’nin en kapsamlı dağıtım ağlarından biri olarak hem geleneksel e-ticarete özgü geniş kapsamlı operasyonları hem de q-commerce’in hız odaklı yapısını entegre bir sistemde birleştirmektedir. Çok katmanlı depo ağı, veri analitiği temelli operasyon yönetimi ve çevresel sürdürülebilirlik odaklı stratejileri sayesinde Trendyol, akademik ve sektörel literatürde hibrit lojistik mimarisinin güçlü bir örneği olarak konumlanmaktadır.

3.3. Yemeksepeti: Platform Tabanlı Talep Üzerine Teslimat Modeli

Yemeksepeti, Türkiye’de 2001 yılında kurulan ve çevrimiçi yemek siparişi alanında öncü konumda bulunan bir platform olarak, şehir içi lojistikte on-demand (talep üzerine) teslimat modelinin en belirgin örneklerinden birini temsil etmektedir. Getir’in mikro-depo (dark store) temelli hızlı teslimat yapısından ve Trendyol’un hibrit lojistik modelinden farklı olarak Yemeksepeti, tamamen restoranları tedarik noktası olarak kullanan stok gerektirmeyen bir operasyon mimarisi yürütmektedir. Bu modelde ürünler depolanmaz; siparişler doğrudan restoranlardan müşterilere yönlendirilir. Dolayısıyla sistem yüksek stok devir hızından ziyade, **gerçek zamanlı kurye**

koordinasyonu, dinamik rota planlaması ve talep dalgalanmalarının anlık yönetimi gibi operasyonel kabiliyetler üzerine inşa edilmektedir. Bu yapının literatürde “just-in-time urban delivery” veya “urban instant service platforms” olarak tanımlanan lojistik mimarilerle örtüştüğü belirtilmektedir (Durand vd., 2020; Boysen vd., 2021). Şirket, yüzlerce restoranı “dağıtım noktası” olarak konumlandırarak klasik e-ticaret modellerinde görülen depo maliyetlerini ortadan kaldırmakta ve operasyonu tamamen platform koordinasyonuna dayandırmaktadır.

Platform tabanlı talep üzerine teslimat modelinin temel özellikleri şu şekilde sıralanabilir:

- Teslimatlar stoktan değil, doğrudan restoranlardan müşterilere yapılır.
- Mikro-depo veya yeniden stoklama süreçleri bulunmaz.
- Kurye konumlandırması nüfus yoğunluğu ve sipariş dağılımı esas alınarak yapılır.
- Ortalama teslimat süreleri 10–40 dakika aralığında şekillenir.
- Talep ve rota belirsizlikleri algoritmik iş akışı yönetimi ile minimize edilir.

Bu yapı, platformun yüksek sipariş hacminde dahi operasyonel esnekliğini korumasını sağlamakta ve ölçeklenebilir bir iş modeli oluşturmaktadır. Yemeksepeti’nin lojistik operasyonları, tıpkı q-commerce modellerinde olduğu gibi yoğun dijital izleme, veri analitiği ve algoritmik yönlendirme bileşenlerinden oluşmaktadır.

Diğer tarafta platform tabanlı yönetilen bu tarz kurye ağlarında **çalışma güvencesi eksikliği, kazalara karşı kırılganlık, gelir istikrarsızlığı ve algoritmik denetim baskısı** gibi temel sorunlara dikkat çekmektedir. Türkiye’de STGM (2024) ve çeşitli bağımsız araştırmalar, Yemeksepeti özelinde kurye çalışanlarının karşılaştığı başlıca zorlukları şu şekilde raporlamaktadır:

- Sosyal güvence ve uzun vadeli gelir istikrarı eksikliği,
- Yoğun şehir içi trafikte yüksek kaza riski,

- Koruyucu ekipman standartlarının yetersizliği,
- Algoritmik performans baskısının iş yükünü artırması.

Yemeksepeti, Türkiye’de platform tabanlı on-demand teslimat modelinin en kapsamlı ve olgun örneklerinden biridir. Mikro-depo yerine restoran temelli dağıtım ağı, algoritmik kurye yönetim sistemleri, bisikletli teslimat uygulamaları, karbon dengeleme programları ve sosyal sürdürülebilirlik alanındaki gelişen politika ihtiyaçlarıyla şirket, hem operasyonel hem çevresel hem de sosyal boyutlarda dikkate değer bir lojistik model sunmaktadır (URL: Yemeksepeti, 2023). Bu yapı, Getir’in mikro-depo temelli q-commerce yaklaşımından ve Trendyol’un hibrit e-ticaret-q-commerce modelinden ayrı bir operasyonel paradigmayı temsil etmekte olup, Türkiye’de kent içi lojistik modellerinin çeşitliliğine önemli katkı sağlamaktadır.

4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

E-ticaret lojistiği, dijitalleşmenin hızlanması, kentleşme dinamikleri ve çevrimiçi tüketim alışkanlıklarının kalıcı biçimde dönüşmesi sonucunda küresel tedarik zincirlerinin en hızlı evrilen alt sistemlerinden biri hâline gelmiştir. COVID-19 sonrası dönemde e-ticaret hacminin beklenenden daha yüksek oranlarda artması, özellikle son kilometre dağıtımı, mikro-depo yapılanmaları, sürdürülebilir mobilité teknolojileri ve platform ekonomisine dayalı algoritmik yönetim gibi temaların hem akademik literatürde hem de sektörel uygulamalarda merkezî bir konuma yerleşmesine yol açmıştır. Son kilometre faaliyetlerinin lojistik maliyetler içindeki %30–53’lük yüksek payı (Gevaers et al., 2011; McKinsey, 2021), işletmeleri teslimat hızını artıran ve operasyonel maliyetleri azaltan teknolojilere yöneltmektedir. Bu çerçevede **rota optimizasyonu, dinamik kurye ataması, talep tahmini ve gerçek zamanlı veri akışı** gibi yapay zekâ tabanlı uygulamalar, güncel literatürde dağıtım süresi ve maliyet üzerinde anlamlı iyileşme sağlayan temel araçlar olarak gösterilmektedir (Tiwari vd., 2024; Ferreira & Esperança, 2025).

Türkiye’de ise Getir, Trendyol ve Yemeksepeti örnekleri, literatürde tartışılan q-commerce (hızlı ticaret), hibrit e-ticaret lojistiği ve on-demand (talep üzerine) platform lojistiği modellerinin eşzamanlı olarak

uygulanabildiğini gösteren özgün bir ekosistem sunmaktadır. Bu üç model, kentsel dağıtım altyapılarının, yapay zekâ tabanlı karar destek sistemlerinin ve algoritmik kaynak operasyonel performansı nasıl dönüştürdüğünü ortaya koyan güçlü birer örnektir. Getir'in mikro-depo temelli q-commerce mimarisi, 10 dakikanın altındaki teslimat hedefiyle hiper-yerelleştirilmiş envanter, kısa mesafeli rota ve algoritmik atama prensiplerinin bütünleşik bir modelini sunmaktadır. Trendyol ise çok katmanlı depo ve transfer merkezi ağıyla literatürde çok kanallı/hibrid fulfillment olarak tanımlanan yapının Türkiye'deki en gelişmiş örneklerinden birini temsil etmektedir. Yemeksepeti'nin restoran temelli platform ekonomisi modeli ise stoksuz, esnek, ölçeklenebilir ve düşük sermaye yoğunluklu yapısı ile talep/sipariş üzerine sistemlerin öncü kuruluşlarından.

Sürdürülebilirlik açısından ise, e-ticaret lojistiğinin çevresel etkileri son yıllarda daha görünür hâle gelmiş; OECD (2020) ve WEF (2020) raporları, artan sipariş hacmi nedeniyle kentsel karbon salımlarında ve trafik yükünde büyüme beklendiğini, müdahale edilmediği takdirde 2030'a kadar kent içi emisyonların %30 artabileceğini ortaya koymuştur. Son kilometre dağıtımı hızlı teslimat talebi, düşük araç doluluk oranları, dağıtık adresler ve sınırlı konsolidasyon kapasitesi nedeniyle karbon artışına sebep olmaktadır. Türkiye'de Getir'in elektrikli scooter filosu, Trendyol'un elektrikli dağıtım araçlarına geçişi ve Yemeksepeti'nin bisikletli kurye programı, sürdürülebilir mobiliteye yönelik farklı stratejik yanıtları temsil etmektedir.

Tedarik zincirlerinin son halkalarından olan, son mil taşımacılığının etkin kullandığı mikro-depo yapılanmaları teslimat süresini önemli ölçüde azaltmakla birlikte, yüksek kira maliyetleri, yoğun işgücü ihtiyacı ve ölçek ekonomilerinin sınırlı oluşu gibi konular sürdürülebilirlik açısından tartışma başlıkları olarak sayılabilir. Bu durum q-commerce işletmelerini hız ile maliyet arasında hassas bir denge kurmaya zorlamaktadır. Buna karşılık hibrit modeller (ör. Trendyol) ve platform temelli on-demand modeller (ör. Yemeksepeti) daha düşük sermaye yoğunlukları sayesinde uzun vadede rekabetçiliği artıran esnek bir yapı sunmaktadır. Üç platformun ortak paydası, **dijitalleşme, yapay zekâ uygulamaları ve veri temelli yönetimdir**. Rota optimizasyonu, talep tahmini, kurye eşleştirme ve gerçek zamanlı operasyon kontrolü gibi algoritmik

süreçlerin Türkiye’de bu denli yaygın ve bütünleşik kullanımı, ülkenin lojistik inovasyon kapasitesinin yüksekliğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, e-ticaret lojistiğinde operasyonel inovasyon, dijital dönüşüm, müşteri deneyimi yönetimi ve sürdürülebilir mobilite alanlarında gözlenen gelişmeler, sektörün rekabet dinamiklerini köklü biçimde dönüştürmektedir. Bu dönüşüm, son kilometre lojistiğinin geleceğinin yalnızca teslimat hızı ve erişilebilirlik ekseninde değil; aynı zamanda **düşük karbonlu, kentle uyumlu, veri temelli ve sosyal açıdan sürdürülebilir** bir ekosistem çerçevesinde yeniden şekillendiğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, **dijitalleşme, operasyonel verimlilik ve çevresel sürdürülebilirlik** arasındaki etkileşim, e-ticaret lojistiğinde rekabet kriterlerini yeniden tanımlamakta; işletmelerin stratejik yatırım kararları ile kamu politikalarının uzun vadeli yönelimleri üzerinde belirleyici bir rol üstlenmektedir.

5. POLİTİKA YAPICILAR VE KENT YÖNETİMLERİ İÇİN ÖNERİLER

E-ticaret lojistiği, kentsel yaşam üzerinde trafik yoğunluğu, park alanı ihtiyacı, karbon salımı, gürültü, iş sağlığı ve güvenliği ve kamusal alan kullanımı gibi çok boyutlu etkiler oluşturmaktadır. Bu nedenle sürdürülebilir ve kentle uyumlu bir lojistik yapısının oluşturulabilmesi, kamu otoriteleri, yerel yönetimler, lojistik işletmeleri ve e ticaret platform yöneticilerinin ortak politika geliştirmesini gerektirmektedir. Son kilometre lojistiğinin sürdürülebilir bir yapıya kavuşması, **altyapı yatırımları, dijital entegrasyon, çevreci mobilite ve sosyal sürdürülebilirlik** bileşenlerinin birbirini tamamladığı bütüncül bir şehir lojistiği ekosistemi ile mümkün olacaktır. Bu yönde geliştirilecek politikalar yalnızca çevresel performansı iyileştirmeyecek, aynı zamanda işletmelerin rekabet gücünü artıracak, şehrin trafik yükünü hafifletecek ve yaşam kalitesinin yükselmesine katkı sağlayacaktır.

Şehir lojistiğinin iyileştirilebilmesi için geliştirilebilecek temel alanlar şu şekilde özetlenebilir:

- **Alternatif Teslimat Modellerinin Yaygınlaştırılması:** Paket dolapları, otonom robotlar, dronlar ve gece teslimat modelleri desteklenmelidir.

- **Mikro-Mobilite Altyapısının Geliştirilmesi:** Mikro-mobilite araçları (e-bisiklet, kargo bisikleti ve scooter gibi) için güvenli sürüş koridorları, bisiklet yolları ve mikro-kargo istasyonları kurulmalıdır.
- **Elektrikli Araç ve Temiz Enerji Teşviklerinin Artırılması:** Elektrikli dağıtım araçları için vergi teşvikleri, şarj altyapısı destekleri artırılmalıdır.
- **Kurye Çalışma Koşullarının İyileştirilmesi:** Kurye ve çalışanlar için sosyal güvence, iş sağlığı ve güvenliği eğitimleri, standartlaştırılmış istihdam protokolleri ve adil ücretlendirme mekanizmaları geliştirilmelidir.
- **Kentsel Konsolidasyon Merkezlerinin Kurulması:** Şehir merkezine yakın noktalarda mikro-konsolidasyon merkezleri kurularak konsolide teslimat modelleri yaygınlaştırılmalıdır.
- **Veri Paylaşımı ve Dijital Entegrasyonun Geliştirilmesi:** Platformlar ile yerel yönetimler arasında trafik yoğunluğu, sipariş yoğunluğu ve rota optimizasyonu verilerinin paylaşımına yönelik dijital protokoller geliştirilmelidir.
- **Kent Merkezi Erişim Düzenlemeleri:** Düşük emisyon bölgeleri, teslimat zaman çizelgeleri (mesai öncesi-sonrası), yükleme/boşaltma alanlarının yeniden tasarımı ve tonajlı araçlar için kentsel erişim sınırlamaları uygulanmalıdır.

KAYNAKÇA

- Banerjee, D., Erera, A. L., & Toriello, A. (2025). Pricing and demand management for integrated same-day and next-day delivery systems. *Transportation Science*, 59(2), 279–300.
- Bertolini, M., De Matteis, G., & Nava, A. (2024). Sustainable last-mile logistics in economics studies: A systematic literature review. *Sustainability*, 16(3), 1205. <https://doi.org/10.3390/su16031205>
- Bouncken, R. B., Kraus, S., & Roig-Tierno, N. (2021). Knowledge- and innovation-based business models for future growth: Digitalized business models and portfolio considerations. *Review of Managerial Science*, 15(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s11846-019-00366-z>
- Boysen, N., Fedtke, S., & Schwerdfeger, S. (2021). Last-mile delivery concepts: A survey from an operational research perspective. *OR Spectrum*, 43(1), 1–58. <https://doi.org/10.1007/s00291-020-00607-8>
- Cano, J. A., Londoño-Pineda, A., & Rodas, C. (2022). Sustainable logistics for e-commerce: A literature review and bibliometric analysis. *Sustainability*, 14(19), 12247. <https://doi.org/10.3390/su141912247>
- Castillo, O., & Álvarez, R. (2023). Electrification of last-mile delivery: A fleet management approach with a sustainability perspective. *Sustainability*, 15(24), 16909. <https://doi.org/10.3390/su152416909>
- Durand, B., & Gonzalez-Feliu, J. (2012). Impacts of proximity deliveries on e-grocery trips. *Supply Chain Forum: An International Journal*, 13(1), 10–19. <https://doi.org/10.1080/16258312.2012.11517289>
- Eğilmez, G. (2024). Sürdürülebilir akıllı lojistik. Duvar Yayınları. https://www.duvaryayinlari.com/Webkontrol/IcerikYonetimi/Dosyalar/surdurulebilir-akilli-lojistik_icerik_g4440_Rj9Z3UgX.pdf
- Eğilmez, G. (2025). E-ticaret lojistiğinde inovatif yaklaşımlar: Sektörel bir literatür incelemesi. In X. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi (INSAC-2025) (9–11 Ekim 2025, ss. 123–137).

- Ferreira, J. C., & Esperança, M. (2025). Enhancing sustainable last-mile delivery: The impact of electric vehicles and AI optimization on urban logistics. *World Electric Vehicle Journal*, 16(5), 242. <https://doi.org/10.3390/wevj16050242>
- Fikar, C. (2018). A decision support system to investigate food losses in e-grocery deliveries. *Computers & Industrial Engineering*, 117, 282–290. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.02.020>
- FlashBox. (2022). 6 stats highlighting the importance of last-mile delivery in e-commerce. <https://flashbox.co/blog/business/6-stats-highlighting-importance-of-last-mile-delivery-in-e-commerce/>
- García-Herrera, A., Serrano-Hernandez, A., & Faulin, J. (2025). Understanding the dynamics of crowdshipping in last-mile distribution within urban mobility: A comprehensive framework. *Socio-Economic Planning Sciences*, 102249. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2025.102249>
- Gevaers, R., Van de Voorde, E., & Vanelander, T. (2011). Characteristics and challenges of last-mile logistics. In *City distribution and urban freight transport* (pp. 1–20). Edward Elgar Publishing.
- Gruber, J., Kihm, A., & Lenz, B. (2014). A new vehicle for urban freight? An ex-ante evaluation of electric cargo bikes in courier services. *Research in Transportation Business & Management*, 11, 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2014.03.004>
- Huang, Z., & Benyoucef, M. (2013). From e-commerce to social commerce: A close look at design features. *Electronic Commerce Research and Applications*, 12(4), 246–259. <https://doi.org/10.1016/j.elerap.2012.12.003>
- Hübner, A. H., Kuhn, H., & Wollenburg, J. (2016). Last mile fulfilment and distribution in omni-channel grocery retailing: A strategic planning framework. *International Journal of Retail & Distribution Management*, 44(3), 228–247. <https://doi.org/10.1108/IJRDM-11-2015-0186>

- International Energy Agency. (2024). Batteries and secure energy transitions. IEA.
- Javanpour, S., Radman, A., Saeedi, S., Karimabadi, S. F., Larson, D. A., & Jones, E. C. (2025). Sustainable multi-modal transportation and routing focusing on costs and carbon emissions reduction. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2502.00056>
- Jean, G. (2024). Supply chain visibility and transparency [Unpublished manuscript]. ResearchGate.
- Kanoğlu, M.F., & Durak, H. S. (2025). Yapay zekâyâ uyum ölçeği (yzyö): geçerlik ve güvenirlik çalışması. *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi SBE Dergisi, Sosyal Bilimlerde Yapay Zekâ: Kuram, Uygulama ve Gelecek Perspektifleri Özel Sayısı*, 1-55.
- Kapser, S., & Abdelrahman, M. (2020). Acceptance of autonomous delivery vehicles for last-mile delivery in Germany: Extending UTAUT2 with risk perceptions. *Transportation Research Part C*, 111, 210–225. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.12.016>
- Ken Research. (2024). Turkey last mile delivery market 2019–2030. <https://www.kenresearch.com/turkey-last-mile-delivery-market>
- Kiba-Janiak, M., Marcinkowski, J., Jagoda, A., & Skowrońska, A. (2021). Sustainable last mile delivery on e-commerce market in cities from the perspective of various stakeholders: A literature review. *Sustainable Cities and Society*, 71, 102984. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102984>
- Macioszek, E. (2017). First and last mile delivery—Problems and issues. In *Transport systems theory and practice* (pp. 147–154). Springer.
- Mangiaracina, R., Perego, A., Seghezzi, A., & Tumino, A. (2019). Innovative solutions to increase last-mile delivery efficiency in B2C e-commerce: A literature review. *International Journal of Physical Distribution &*

- Logistics Management, 49(9), 901–920.
<https://doi.org/10.1108/IJPDLM-02-2019-0048>
- McKinsey & Company. (2021). The future of the last-mile ecosystem.
- Mohammad, W. A., Elomri, A., Diab, Y. N., & Triki, C. (2023). Innovative solutions in last mile delivery: Concepts, practices, challenges, and future directions. *Supply Chain Forum: An International Journal*, 24(2), 151–169.
- Moradi, N., Boroujeni, N. M., Aftabi, N., & Aslani, A. (2024). Two-echelon electric vehicle routing problem in parcel delivery: A literature review. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2412.19395>
- OECD. (2020). Decarbonising urban mobility with land use and transport policies. OECD Publishing.
- Ooi, T. K., Hsieh, C.-H., Wang, S.-M., & Huang, Y.-K. (2025). Orchestrating agile omnichannel supply chain planning through big data analytics and end-to-end visibility. *Asian Journal of Shipping and Logistics*, 41(2), 110–117.
- Papaiouannou, E., Iliopoulou, C., & Kepaptsoglou, K. (2023). Last-mile logistics network design under e-cargo bikes. *Future Transportation*, 3(2), 403–416.
- Parker, G. G., Van Alstyne, M. W., & Choudary, S. P. (2016). Platform revolution. W. W. Norton & Company.
- Rai, A., Constantinides, P., & Sarker, S. (2019). Editor's comments: Next-generation digital platforms: Toward human–AI hybrids. *MIS Quarterly*, 43(1), iii–ix.
- Raj, R., Singh, A., Kumar, V., De, T., & Singh, S. (2024). Assessing the e-commerce last-mile logistics' hidden risk hurdles. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 10, 100131. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2023.100131>

- Ruutu, S., Casey, T., & Kotovirta, V. (2017). Development and competition of digital service platforms: A system dynamics approach. *Technological Forecasting and Social Change*, 117, 119–130.
- Savelsbergh, M., & Van Woensel, T. (2016). City logistics: Challenges and opportunities. *Transportation Science*, 50(2), 579–590.
- Shuaibu, A. S., Mahmoud, A. S., & Sheltami, T. R. (2025). A review of last-mile delivery optimization: Strategies, technologies, drone integration, and future trends. *Drones*, 9(3), 158.
- Silva, V., Amaral, A., & Fontes, T. (2023). Sustainable urban last-mile logistics: A systematic literature review. *Sustainability*, 15(3), 2285.
- Speranza, M. G. (2018). Trends in transportation and logistics. *European Journal of Operational Research*, 264(3), 830–836.
- STGM. (2024). Türkiye’de platform işçiliği ve kurye emek süreçleri raporu. <https://www.stgm.org.tr/sites/default/files/2025-07/2024-stgm-faaliyet-raporu.pdf>
- Taniguchi, E. (2014). Concepts of city logistics for sustainable and liveable cities. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 151, 310–317.
- Tiwari, M. K., Bidanda, B., Geunes, J., Fernandes, K., & Dolgui, A. (2024). Supply chain digitisation and management. *International Journal of Production Research*, 62(8), 2918–2926.
- Trendyol. (2023). Sustainability report 2023. https://cdn.dsmdn.com/corpcomm/TRNDYL_2023_Sustainability_Report.pdf
- Trendyol. (2024). Sustainability report 2024. https://cdn.dsmdn.com/corpcomm/TRNDYL_SurdurulebilirlikRaporu2024.pdf
- Tudisco, V., Perotti, S., Yetkin Ekren, B., & Aktas, E. (2025). Sustainable e-grocery home delivery: An optimization model considering on-demand vehicles. *Computers & Industrial Engineering*, 201, 110874.

- Turienzo, J., Blanco, A., Lampón, J. F., & Muñoz-Deñás, M. P. (2024). Logistics business model evolution: Digital platforms and connected and autonomous vehicles as disruptors. *Review of Managerial Science*, 18(9), 2483–2506.
- Viu-Roig, M., & Alvarez-Palau, E. J. (2020). The impact of e-commerce-related last-mile logistics on cities: A systematic literature review. *Sustainability*, 12(16), 6492.
- Wang, X., Ji, C., Xu, H., & Guo, K. (2025). Research on dynamic optimization of takeout delivery routes considering food preparation time. *Sustainability*, 17(6), 2771.
- WEF. (2020). The future of the last-mile ecosystem. World Economic Forum. <https://www.weforum.org/publications/the-future-of-the-last-mile-ecosystem/>
- WEF. (2024). Transforming urban logistics. World Economic Forum. <https://www.weforum.org/publications/transforming-urban-logistics-a-path-to-sustainable-and-efficient-last-mile-delivery-in-cities/>
- Yang, X., Ostermeier, M., & Hübner, A. (2024). Winning the race to customers with micro-fulfillment centers. *Central European Journal of Operations Research*, 32(2), 295–334.
- Zennaro, I., Finco, S., Calzavara, M., & Persona, A. (2022). Implementing e-commerce from logistic perspective. *Sustainability*, 14(2), 911.
- Zhao, Y., Von Delft, S., Morgan-Thomas, A., & Buck, T. (2020). The evolution of platform business models. *Long Range Planning*, 53(4), 101892.

BÖLÜM 5

AKILLI DEPOLAMA SİSTEMLERİ VE OTONOM LOJİSTİK: DİJİTALLEŞEN DEPOLARDA VERİMLİLİK VE ENERJİ YÖNETİMİ

Dr. Öğr. Üyesi Muharrem ÜNVER ¹

¹ Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü,
Karabük, TÜRKİYE. muharremunver@karabuk.edu.tr, orcid id:0000-0001-7587-6849

1. GİRİŞ

Küresel tedarik zincirlerinin son yıllarda karşı karşıya kaldığı belirsizlik, dalgalanma ve karmaşıklık düzeyi; depolama ve lojistik faaliyetlerini yalnızca operasyonel bir destek fonksiyonu olmaktan çıkararak stratejik bir rekabet alanına dönüştürmüştür. Özellikle e-ticaret hacmindeki hızlı artış, müşteri beklentilerinin hız, esneklik ve şeffaflık ekseninde yeniden şekillenmesi ve sürdürülebilirlik odaklı regülasyonların yaygınlaşması, depo sistemlerinin dijitalleşmesini kaçınılmaz kılmıştır. Bu bağlamda, geleneksel depolama yaklaşımlarının yerini; bilgi teknolojileri, otomasyon, sensör ağları ve veri analitiğiyle bütünlük **akıllı depolama sistemleri** almaktadır.

Akıllı depolama sistemleri; fiziksel depo altyapısının siber bileşenlerle desteklendiği, gerçek zamanlı veri üretimi ve analizine dayalı karar mekanizmalarının işletildiği ve insan-makine etkileşiminin optimize edildiği bütüncül yapılardır. Bu sistemler yalnızca ürünlerin depolanmasını değil; stok doğruluğunun artırılmasını, sipariş karşılama sürelerinin kısaltılmasını, enerji tüketiminin azaltılmasını ve operasyonel sürdürülebilirliğin sağlanmasını hedeflemektedir. Dolayısıyla akıllı depolama, Endüstri 4.0 ve giderek Toplum 5.0 paradigması çerçevesinde, siber-fiziksel sistemlerin lojistik alandaki somut yansımalarından biri olarak değerlendirilmektedir (Xu vd., 2024).

Bu dönüşüm sürecinin merkezinde **Depo Yönetim Sistemleri (Warehouse Management Systems – WMS)** yer almaktadır. WMS; stok takibi, yerleştirme stratejileri, sipariş toplama, sevkiyat planlama ve performans ölçümü gibi temel depo süreçlerini dijital ortamda yöneten yazılım tabanlı sistemlerdir. Ancak güncel yaklaşımlar, WMS'yi yalnızca bir bilgi sistemi olarak değil; robotik depolama çözümleri, otonom taşıma araçları, sensör teknolojileri ve enerji yönetim sistemleriyle entegre çalışan bir karar destek platformu olarak ele almaktadır. Bu bütünlük yapı, depo operasyonlarında hem verimlilik artışı hem de kaynak kullanımında optimizasyon sağlamaktadır.

Robotik depolama ve otonom lojistik uygulamaları, akıllı depolama sistemlerinin bir diğer temel bileşenini oluşturmaktadır. Otomatik yönlendirmeli araçlar (AGV), otonom mobil robotlar (AMR), robotik kol sistemleri ve otomatik raf servis makineleri (AS/RS), depo içi malzeme hareketlerini insan müdahalesine gerek duymadan gerçekleştirebilmektedir. Bu teknolojiler, iş gücü maliyetlerini azaltmanın ötesinde; hata oranlarını

düşürmekte, operasyonel sürekliliği artırmakta ve özellikle yüksek hacimli sipariş yapılarında ölçeklenebilir çözümler sunmaktadır. Ayrıca, robotik depolama sistemlerinin sipariş karşılama sürelerinde %30–50 arasında iyileşme sağladığı ve alan kullanım verimliliğini önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmektedir (Boysen, de Koster & Weidinger, 2019).

Akıllı depolama altyapısının etkin biçimde çalışabilmesi için **sensör teknolojileri ve Nesnelerin İnterneti (IoT)** kritik bir rol üstlenmektedir. RFID, barkod sistemleri, sıcaklık ve nem sensörleri, enerji tüketim ölçerleri ve konum tabanlı izleme teknolojileri; depo ortamından sürekli veri toplanmasına olanak tanımaktadır. Bu veriler, WMS ve üst seviye analitik platformlar aracılığıyla işlenerek hem operasyonel hem de stratejik kararların desteklenmesini sağlamaktadır. Gerçek zamanlı görünürlük sayesinde, stok seviyeleri dinamik olarak izlenebilmekte, bozulabilir ürünlerde kalite kayıpları önlenebilmekte ve enerji tüketim profilleri optimize edilebilmektedir.

Akıllı raf sistemleri ise depolama alanının fiziksel verimliliğini artırmaya yönelik yenilikçi çözümler sunmaktadır. Dinamik yük taşıma kapasitesine sahip, sensörlerle donatılmış ve WMS ile entegre çalışan bu raf sistemleri; ürün yerleştirme stratejilerini otomatik olarak güncelleyebilmekte ve depo içi hareketleri minimize etmektedir. Özellikle yüksek tavanlı depolarda kullanılan otomatik raf sistemleri, metrekaşe başına düşen depolama kapasitesini artırarak hem arazi kullanımını hem de enerji ihtiyacını azaltmaktadır.

Akıllı depolama sistemlerinin giderek artan önemi, yalnızca operasyonel performansla sınırlı değildir; aynı zamanda **enerji yönetimi ve sürdürülebilirlik** boyutlarını da kapsamaktadır. Depolar, aydınlatma, ısıtma-soğutma, taşıma ekipmanları ve bilişim altyapısı nedeniyle yüksek enerji tüketimine sahip tesislerdir. Enerji verimliliği odaklı depo tasarımları, LED aydınlatma sistemleri, akıllı iklimlendirme çözümleri, yenilenebilir enerji entegrasyonu ve enerji izleme yazılımları sayesinde karbon ayak izinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Bu yönüyle akıllı depolama sistemleri, sürdürülebilir lojistik ve yeşil tedarik zinciri yaklaşımlarının somut uygulama alanlarından biri hâline gelmiştir (IEA, 2023).

Bu kitap bölümünün temel amacı; akıllı depolama sistemleri ve otonom lojistik kavramlarını bütüncül bir çerçevede ele alarak, dijitalleşen depo operasyonlarında verimlilik ve enerji yönetiminin nasıl sağlandığını akademik bir bakış açısıyla incelemektir. Bölüm kapsamında; WMS tabanlı dijital

entegrasyon, robotik ve otonom sistemler, sensör teknolojileri, akıllı raf çözümleri, enerji tasarruflu depo tasarımı ve sürdürülebilir operasyonlar birbiriyle ilişkili biçimde değerlendirilecektir. Böylece, hem akademisyenler hem de uygulayıcılar için güncel literatürle desteklenmiş, kavramsal ve uygulamaya dönük bir referans çerçevesi sunulması hedeflenmektedir.

2. DEPO YÖNETİM SİSTEMLERİ (WMS) VE DİJİTAL ENTEGRASYON

Dijitalleşen lojistik ekosisteminde depo operasyonlarının etkin biçimde yönetilmesi, büyük ölçüde Depo Yönetim Sistemleri (Warehouse Management Systems – WMS) aracılığıyla mümkün hâle gelmiştir. WMS, depo içerisindeki tüm fiziksel akışların dijital ortama aktarılmasını sağlayan, veri temelli karar alma süreçlerini destekleyen ve operasyonel performansın ölçülmesine olanak tanıyan bütünlüklü yazılım sistemleri olarak tanımlanmaktadır. Günümüzde WMS, yalnızca stok kayıtlarının tutulduğu bir bilgi sistemi olmanın ötesine geçerek; otomasyon teknolojileri, sensör ağları ve kurumsal bilgi sistemleriyle entegre çalışan stratejik bir yönetim aracı hâline gelmiştir.

Geleneksel depo yönetimi yaklaşımlarında planlama ve kontrol faaliyetleri büyük ölçüde insan deneyimine dayalı olarak yürütülmekteyken, WMS tabanlı sistemlerde bu süreçler algoritmalar ve gerçek zamanlı veriler aracılığıyla optimize edilmektedir. Stok doğruluğu, ürün yerleştirme stratejileri, sipariş toplama rotaları ve sevkiyat planlaması gibi kritik karar alanları; WMS'nin sunduğu analitik yetenekler sayesinde daha öngörülebilir ve ölçülebilir bir yapıya kavuşmaktadır. WMS kullanımının stok doğruluk oranlarını %95'in üzerine çıkardığı ve sipariş toplama hatalarını anlamlı düzeyde azalttığı belirtilmektedir (Frazelle, 2016).

WMS'nin temel fonksiyonları arasında; ürün kabulü ve kayıt, lokasyon bazlı stok yönetimi, sipariş toplama (picking), paketleme, sevkiyat ve iade yönetimi yer almaktadır. Bununla birlikte modern WMS çözümleri, dalgalı talep yapıları ve çok kanallı dağıtım (omnichannel) stratejileri doğrultusunda esnek ve ölçeklenebilir mimariler sunmaktadır. Özellikle e-ticaret odaklı depo operasyonlarında, küçük parti büyüklükleri ve yüksek sipariş frekansı, WMS'nin karar destek yeteneklerini kritik hâle getirmektedir. (Kembro vd., 2018)

Dijital entegrasyon, WMS'nin etkinliğini belirleyen en önemli unsurlardan biridir. WMS; Kurumsal Kaynak Planlama (ERP), Taşıma Yönetim Sistemleri (TMS), Üretim Yürütme Sistemleri (MES) ve müşteri ilişkileri yönetimi (CRM) gibi kurumsal sistemlerle entegre çalışarak uçtan uca bir bilgi akışı sağlamaktadır. Bu entegrasyon sayesinde, siparişten teslimata kadar olan süreçte veri tutarlılığı korunmakta, gecikmeler ve bilgi kayıpları minimize edilmektedir. Özellikle ERP–WMS entegrasyonu, üretim ve dağıtım planlarının depo kapasitesi ve stok durumu ile uyumlu biçimde yönetilmesine olanak tanımaktadır.

Endüstri 4.0 paradigması çerçevesinde WMS sistemleri, siber-fiziksel sistemlerin lojistik boyuttaki dijital çekirdeği olarak konumlandırılmaktadır. Robotik depolama çözümleri, otonom taşıma araçları ve otomatik raf sistemleri, WMS üzerinden yönlendirilmekte ve kontrol edilmektedir. Bu yapı içerisinde WMS, yalnızca veri toplayan bir sistem değil; aynı zamanda fiziksel ekipmanlara komut veren ve operasyonel akışı senkronize eden merkezi bir kontrol katmanı olarak işlev görmektedir. Böylece depo operasyonlarında insan müdahalesi azalmakta, süreç standardizasyonu ve izlenebilirlik artmaktadır.

WMS ile Nesnelerin İnterneti (IoT) tabanlı sensör teknolojileri arasındaki entegrasyon, gerçek zamanlı görünürlüğün sağlanmasında kritik bir rol oynamaktadır. RFID, barkod okuyucular, konum sensörleri ve çevresel ölçüm cihazları aracılığıyla elde edilen veriler, WMS üzerinde anlık olarak işlenmektedir. Bu sayede stok hareketleri gecikmesiz izlenebilmekte, bozulabilir ürünlerde sıcaklık ve nem koşulları kontrol altında tutulabilmekte ve operasyonel riskler erken aşamada tespit edilebilmektedir. Gerçek zamanlı veri akışı, aynı zamanda ileri analitik ve tahmine dayalı modellerin geliştirilmesine de zemin hazırlamaktadır.

Enerji yönetimi perspektifinden bakıldığında, WMS'nin depo operasyonlarındaki rolü giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Modern WMS çözümleri, enerji tüketim verilerini izleyebilen ve analiz edebilen modüllerle desteklenmektedir. Aydınlatma sistemleri, otomatik taşıma ekipmanları ve iklimlendirme altyapısı gibi enerji yoğun bileşenlerin kullanım profilleri, WMS üzerinden raporlanabilmekte ve optimizasyon senaryoları geliştirilebilmektedir. Bu yaklaşım, enerji verimliliğini yalnızca bina tasarımıyla sınırlı olmayan, operasyonel kararlarla bütünleşik bir unsur hâline getirmektedir. (Richards, 2018)

WMS'nin sağladığı dijital entegrasyonun bir diğer önemli çıktısı, performans ölçümü ve sürekli iyileştirme süreçleridir. Sipariş çevrim süresi, hatalı teslimat oranı, stok devir hızı ve alan kullanım verimliliği gibi göstergeler, WMS aracılığıyla sistematik biçimde izlenebilmektedir. Bu göstergeler, depo performansının objektif kriterler üzerinden değerlendirilmesine ve veri temelli iyileştirme stratejilerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Özellikle sürdürülebilirlik odaklı yaklaşımlarda, bu tür ölçütler karbon ayak izi ve enerji yoğunluğu göstergeleriyle birlikte ele alınmaktadır.

Tablo 6.1'de geleneksel depo yönetimi ile WMS tabanlı dijital depo yönetimi arasındaki temel farkları özetlemektedir.

Tablo 6.1. Geleneksel Depo Yönetimi ve WMS Tabanlı Dijital Depo Yönetiminin Karşılaştırılması

Kriter	Geleneksel Depo Yönetimi	WMS Tabanlı Dijital Yönetim
Stok Takibi	Manuel / periyodik	Gerçek zamanlı
Sipariş Toplama	Deneyime dayalı	Algoritma destekli
Hata Oranı	Görece yüksek	Düşük
Sistem Entegrasyonu	Sınırlı	ERP-TMS-IoT entegrasyonu
Enerji Yönetimi	İzlenemez	Ölçülebilir ve optimize edilebilir
Karar Alma	Reaktif	Proaktif ve öngörücü

WMS'nin sunduğu bu bütünleşik yapı, depo operasyonlarını yalnızca daha hızlı ve hatasız hâle getirmekle kalmamakta; aynı zamanda sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu bir operasyonel mimarinin oluşturulmasına katkı sağlamaktadır. Enerji tüketiminin izlenebilir hâle gelmesi, kaynak kullanımının optimize edilmesi ve karbon emisyonlarının azaltılması, WMS destekli dijital entegrasyonun uzun vadeli stratejik çıktıları arasında yer almaktadır. Bu yönüyle WMS, akıllı depolama sistemlerinin dijital omurgası olarak değerlendirilebilir.

Bu bölümde ele alınan kavramsal çerçeve, bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak incelenecek olan **robotik depolama ve otonom lojistik sistemleri** için teorik bir temel oluşturmaktadır. WMS'nin merkezî rolü olmaksızın robotik ve otonom çözümlerin etkin biçimde işletilmesi mümkün değildir. Dolayısıyla

dijital entegrasyon, akıllı depolama sistemlerinin başarısını belirleyen en kritik faktörlerden biri olarak öne çıkmaktadır.

3. ROBOTİK DEPOLAMA VE OTONOM LOJİSTİK SİSTEMLER

Depo operasyonlarında artan hız, doğruluk ve esneklik gereksinimleri; insan gücüne dayalı geleneksel süreçlerin yerini giderek robotik ve otonom çözümlere bırakmasına yol açmıştır. Özellikle yüksek hacimli, çok ürünlü ve dalgalı talep yapısına sahip lojistik sistemlerde, manuel süreçler hem operasyonel verimlilik hem de maliyet kontrolü açısından yetersiz kalmaktadır. Bu bağlamda robotik depolama ve otonom lojistik sistemler, akıllı depolama mimarisinin temel yapı taşlarından biri hâline gelmiştir. (Zhong vd., 2017).

Robotik depolama sistemleri; depo içi malzeme taşıma, ürün yerleştirme, sipariş toplama ve yükleme gibi faaliyetlerin otomatik veya yarı otomatik ekipmanlar aracılığıyla gerçekleştirilmesini ifade etmektedir. Bu sistemler, yalnızca fiziksel iş yükünü azaltmakla kalmamakta; aynı zamanda hata oranlarını düşürmekte, işlem sürelerini kısaltmakta ve operasyonel sürekliliği artırmaktadır. Robotik sistemlerin yoğun kullanıldığı depolarda sipariş toplama doğruluğunun %99 seviyelerine ulaştığı ve iş kazalarının anlamlı ölçüde azaldığı rapor edilmektedir (de Koster vd., 2007).

Robotik ve otonom depo sistemlerinin en yaygın bileşenlerinden biri Otomatik Yönlendirmeli Araçlar (Automated Guided Vehicles – AGV) ve Otonom Mobil Robotlar (Autonomous Mobile Robots – AMR)’dir. AGV’ler genellikle sabit rotalar ve önceden tanımlanmış yönlendirme altyapıları (manyetik şeritler, lazer kılavuzlar vb.) üzerinden hareket ederken, AMR’ler çevresel algılama ve yapay zekâ tabanlı navigasyon yetenekleri sayesinde dinamik rota planlaması yapabilmektedir. Bu özellik, özellikle değişken depo düzenlerine ve esnek üretim sistemlerine sahip işletmeler için AMR çözümlerini daha cazip hâle getirmektedir.

Robotik depolama çözümlerinin bir diğer önemli bileşeni Otomatik Depolama ve Geri Alma Sistemleri (Automated Storage and Retrieval Systems – AS/RS)’dir. AS/RS sistemleri; yüksek raflı depolarda ürünlerin otomatik olarak depolanması ve geri alınmasını sağlayan entegre mekanik ve yazılım bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu sistemler, depo alanının dikey yönde daha

etkin kullanılmasına olanak tanıyarak metrekaşe başına düşen depolama kapasitesini artırmakta ve arazi kullanım maliyetlerini azaltmaktadır. Aynı zamanda, ürünlere erişim süresinin standartlaşması sayesinde operasyonel planlama daha öngörülebilir bir yapıya kavuşmaktadır.

Robotik kollar ve otomatik paketleme sistemleri, özellikle sipariş toplama ve hazırlama süreçlerinde kritik rol oynamaktadır. Görüntü işleme, makine öğrenmesi ve sensör teknolojileriyle desteklenen bu sistemler; farklı boyut ve ağırlıktaki ürünleri yüksek hassasiyetle ayırt edebilmekte ve insan benzeri manipülasyon yetenekleri sergileyebilmektedir. Bu durum, e-ticaret depolarında sıkça karşılaşılan küçük parti ve yüksek çeşitlilik sorununa etkin bir çözüm sunmaktadır.

Robotik depolama ve otonom lojistik sistemlerin etkin biçimde çalışabilmesi, Depo Yönetim Sistemleri (WMS) ile olan entegrasyon düzeyine doğrudan bağlıdır. WMS, robotik ekipmanların görev atamalarını yapmakta, önceliklendirme kurallarını belirlemekte ve depo içi trafik akışını koordine etmektedir. Bu entegrasyon sayesinde, robotlar yalnızca önceden tanımlı görevleri yerine getiren pasif bileşenler olmaktan çıkarak, sistem genelindeki operasyonel hedeflere uyum sağlayan aktif karar unsurları hâline gelmektedir.

Enerji tüketimi, robotik ve otonom sistemlerin değerlendirilmesinde giderek daha önemli bir kriter hâline gelmiştir. Robotik ekipmanların elektrikle çalışması, ilk bakışta enerji tüketimini artıran bir unsur olarak algılsa da, bütüncül bir perspektiften bakıldığında operasyonel verimlilik artışı sayesinde toplam enerji yoğunluğunun azaldığı görülmektedir. Daha kısa işlem süreleri, optimize edilmiş hareket rotaları ve insan kaynaklı hataların azalması, birim işlem başına düşen enerji tüketimini düşürmektedir. Bu durum, robotik sistemlerin enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu biçimde değerlendirilebileceğini göstermektedir (Boysen vd., 2019).

İnsan-robot etkileşimi, robotik depolama sistemlerinin başarısını belirleyen kritik faktörlerden biridir. Tam otomasyonun mümkün olmadığı veya ekonomik olarak tercih edilmediği durumlarda, insan ve robotların aynı çalışma ortamını paylaştığı hibrit modeller ön plana çıkmaktadır. Bu modellerde robotlar ağır, tekrarlı ve ergonomik açıdan riskli görevleri üstlenirken; insanlar karar verme, denetim ve istisna yönetimi gibi bilişsel yetenek gerektiren faaliyetlere odaklanmaktadır. Toplum 5.0 yaklaşımı

çerçevesinde, bu tür insan merkezli otomasyon modelleri hem verimlilik hem de çalışan refahı açısından avantaj sağlamaktadır (Samuels, 2025).

Tablo 6.2’de depo operasyonlarında kullanılan başlıca robotik ve otonom sistem türlerini ve temel özelliklerini özetlemektedir.

Tablo 6.2. Depo Operasyonlarında Kullanılan Robotik ve Otonom Sistemler

Sistem Türü	Temel Fonksiyon	Avantajları
AGV	Sabit rotalı taşıma	Yüksek güvenilirlik, düşük hata
AMR	Dinamik taşıma	Esneklik, uyarlanabilirlik
AS/RS	Otomatik depolama	Alan verimliliği, hız
Robotik kollar	Sipariş toplama	Hassasiyet, çeşitlilik
Otomatik paketleme	Hazırlama ve yükleme	Zaman tasarrufu

Robotik depolama ve otonom lojistik sistemler, yalnızca güncel operasyonel sorunlara çözüm sunmakla kalmamakta; aynı zamanda geleceğin dijital ve sürdürülebilir lojistik altyapısının da temelini oluşturmaktadır. Yapay zekâ, büyük veri analitiği ve dijital ikiz teknolojileriyle desteklenen bu sistemlerin, depo operasyonlarında öngörücü ve uyarlanabilir bir yapı oluşturması beklenmektedir. Bu dönüşüm, depoların statik tesisler olmaktan çıkarak, çevresel koşullara ve talep değişimlerine gerçek zamanlı yanıt verebilen dinamik sistemlere dönüşmesini sağlamaktadır.

Bu bölümde ele alınan robotik ve otonom çözümler, bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak incelenecek olan **sensör teknolojileri ve akıllı raf sistemleri** için operasyonel bir zemin oluşturmaktadır. Robotik sistemlerin etkinliği, sensörler aracılığıyla sağlanan veri kalitesi ve raf sistemlerinin fiziksel tasarımıyla doğrudan ilişkilidir. Dolayısıyla akıllı depolama yaklaşımı, bu bileşenlerin birbirini tamamladığı bütünsel bir sistem olarak değerlendirilmelidir.

4. SENSÖR TEKNOLOJİLERİ VE AKILLI RAF SİSTEMLERİ

Akıllı depolama sistemlerinin etkinliği, büyük ölçüde fiziksel operasyonlardan elde edilen verinin doğruluğu, sürekliliği ve gerçek zamanlı işlenebilir kapasitesine bağlıdır. Bu bağlamda sensör teknolojileri ve akıllı raf sistemleri, depo operasyonlarının dijitalleşmesinde kritik bir rol üstlenmektedir. Depo ortamında konum, miktar, çevresel koşullar ve ekipman durumu gibi çok boyutlu verilerin sürekli olarak izlenebilmesi, karar alma

süreçlerinin sezgisel yaklaşımlardan veri temelli modellere evrilmesini sağlamaktadır.

Sensör teknolojileri, Nesnelerin İnterneti (Internet of Things – IoT) altyapısı çerçevesinde depo içindeki fiziksel nesnelerin dijital ortama bağlanmasını mümkün kılmaktadır. RFID etiketleri, barkod sistemleri, ağırlık sensörleri, konum belirleyiciler, sıcaklık ve nem sensörleri gibi bileşenler; ürünlerin depo içerisindeki hareketlerini ve koşullarını anlık olarak izleyebilmektedir. Bu sayede stok seviyeleri, ürün konumları ve çevresel riskler gecikme olmaksızın tespit edilmekte ve WMS üzerinden yönetilmektedir.

RFID tabanlı izleme sistemleri, özellikle yüksek hacimli ve hızlı hareket eden stok yapılarında önemli avantajlar sunmaktadır. Barkod sistemlerinden farklı olarak görüş hattı gerektirmeyen RFID teknolojisi, ürünlerin toplu ve eş zamanlı olarak tanımlanmasına olanak tanımaktadır. Bu durum, stok sayım sürelerini kısaltmakta, insan kaynaklı hataları azaltmakta ve depo içi izlenebilirliği artırmaktadır. RFID destekli depo sistemlerinin stok doğruluğunu %98 seviyelerine çıkardığı ve manuel sayım ihtiyacını büyük ölçüde ortadan kaldırdığı belirtilmektedir (Kärkkäinen, 2003).

Sensör teknolojilerinin sağladığı gerçek zamanlı veri akışı, yalnızca stok yönetimi açısından değil; aynı zamanda kalite kontrol ve risk yönetimi açısından da büyük önem taşımaktadır. Özellikle gıda, ilaç ve kimya gibi bozulabilir veya hassas ürünlerin depolandığı tesislerde sıcaklık, nem ve titreşim gibi çevresel parametrelerin sürekli izlenmesi gerekmektedir. Sensörler aracılığıyla elde edilen bu veriler, belirlenen eşik değerlerin aşılması durumunda otomatik uyarı mekanizmalarını tetiklemekte ve ürün kayıplarının önlenmesine katkı sağlamaktadır.

Akıllı raf sistemleri, sensör teknolojilerinin fiziksel depolama altyapısıyla bütünleştiği yenilikçi çözümler olarak öne çıkmaktadır. Bu raf sistemleri; ağırlık sensörleri, konum algılayıcılar ve RFID okuyucular ile donatılarak, raf üzerindeki ürün miktarını ve hareketlerini otomatik olarak izleyebilmektedir. Böylece stok seviyeleri manuel müdahaleye gerek kalmaksızın güncellenmekte ve WMS ile eş zamanlı olarak senkronize edilmektedir. Akıllı raflar, özellikle yüksek ürün çeşitliliğine sahip depolarda stok tükenme riskinin azaltılmasında etkin bir araç olarak değerlendirilmektedir.

Akıllı raf sistemlerinin bir diğer önemli katkısı, depo alanının daha verimli kullanılmasına olanak tanınmasıdır. Dinamik yerleştirme algoritmalarıyla desteklenen bu sistemler, ürünlerin talep sıklığına, boyutuna ve ağırlığına göre raf konumlarını otomatik olarak optimize edebilmektedir. Bu yaklaşım, depo içi taşıma mesafelerini azaltarak hem operasyonel süreleri kısaltmakta hem de enerji tüketimini düşürmektedir. Özellikle robotik depolama sistemleriyle entegre çalıştığında, akıllı raflar depo içi trafik yoğunluğunu minimize eden bir yapı sunmaktadır.

Sensör verilerinin analitik platformlar aracılığıyla işlenmesi, akıllı depolama sistemlerinin katma değerini önemli ölçüde artırmaktadır. Büyük veri analitiği ve makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak, sensörlerden elde edilen veriler üzerinden talep tahminleri, bakım planlaması ve süreç optimizasyonu yapılabilmektedir. Örneğin, raf üzerindeki titreşim ve kullanım verileri analiz edilerek ekipman arızaları önceden tahmin edilebilmekte ve plansız duruşların önüne geçilebilmektedir. Bu tür öngörücü yaklaşımlar, depo operasyonlarının sürekliliğini ve güvenilirliğini artırmaktadır.

Enerji yönetimi açısından değerlendirildiğinde, sensör teknolojileri ve akıllı raf sistemleri önemli bir destek mekanizması sunmaktadır. Aydınlatma, iklimlendirme ve otomatik taşıma ekipmanlarının kullanım yoğunluğu, sensörler aracılığıyla izlenebilmekte ve gerçek ihtiyaçlara göre ayarlanabilmektedir. Örneğin, hareket sensörleri sayesinde yalnızca aktif alanların aydınlatılması veya düşük kullanım dönemlerinde enerji tüketiminin sınırlandırılması mümkün hâle gelmektedir. Bu uygulamalar, depo tesislerinin enerji yoğunluğunu azaltarak sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlamaktadır (IEA, 2023).

Tablo 6.3'te depo operasyonlarında kullanılan başlıca sensör türlerini ve kullanım amaçlarını özetlemektedir.

Tablo 6.3. Depo Operasyonlarında Kullanılan Sensör Teknolojileri

Sensör Türü	Kullanım Amacı	Sağladığı Fayda
RFID	Ürün tanımlama ve izleme	Gerçek zamanlı stok görünürlüğü
Ağırlık sensörleri	Miktar kontrolü	Otomatik stok güncelleme
Sıcaklık / nem sensörleri	Çevresel izleme	Ürün kalitesinin korunması
Konum sensörleri	Yer tespiti	Taşıma süresi optimizasyonu
Hareket sensörleri	Alan kullanımı	Enerji tasarrufu

Sensör teknolojileri ve akıllı raf sistemleri, akıllı depolama mimarisinin veri üretim katmanını oluşturmaktadır. Bu katmandan elde edilen yüksek kaliteli veriler olmaksızın, WMS tabanlı dijital entegrasyonun, robotik sistemlerin ve enerji yönetimi çözümlerinin etkin biçimde çalışması mümkün değildir. Dolayısıyla sensörler ve akıllı raflar, depo operasyonlarını görünür, ölçülebilir ve optimize edilebilir hâle getiren temel unsurlar olarak değerlendirilmektedir.

Bu bölümde ele alınan yaklaşımlar, bir sonraki bölümde incelenecek olan **enerji tasarruflu depo tasarımı** için analitik ve operasyonel bir zemin oluşturmaktadır. Sensörlerden elde edilen veriler, depo tasarım kararlarının yalnızca statik planlama kriterlerine değil; gerçek kullanım profillerine dayandırılmasına olanak tanımaktadır. Bu bütünlük yaklaşım, akıllı depolama sistemlerinin sürdürülebilirlik potansiyelini güçlendiren temel faktörlerden biridir.

5. ENERJİ TASARRUFLU DEPO TASARIMI VE YEŞİL DEPOLAR

Depolama tesisleri, lojistik sistemler içerisinde yüksek enerji tüketimine sahip operasyonel birimler arasında yer almaktadır. Aydınlatma, ısıtma-soğutma sistemleri, otomatik taşıma ekipmanları ve bilgi teknolojileri altyapısı, depolarda toplam enerji tüketiminin temel bileşenlerini oluşturmaktadır. Artan enerji maliyetleri, karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik küresel regülasyonlar ve sürdürülebilirlik odaklı kurumsal stratejiler, depo tasarımında enerji verimliliğini stratejik bir öncelik hâline getirmiştir. Bu bağlamda enerji tasarruflu depo tasarımı ve yeşil depo yaklaşımları, akıllı depolama sistemlerinin ayrılmaz bir parçası olarak değerlendirilmektedir (McKinnon vd., 2015).

Enerji tasarruflu depo tasarımı, yalnızca binanın fiziksel özelliklerini kapsayan bir mimari yaklaşım değil; operasyonel süreçler, teknoloji kullanımı ve enerji yönetim stratejileriyle bütünlük bir sistem olarak ele alınmalıdır. Depo yerleşimi, bina yönelimi, yalıtım özellikleri, doğal aydınlatma olanakları ve malzeme seçimi gibi unsurlar, enerji verimliliğinin ilk aşamasını oluşturmaktadır. Özellikle gün ışığından maksimum düzeyde faydalanmayı

amaçlayan tasarımlar, yapay aydınlatma ihtiyacını azaltarak elektrik tüketiminde anlamlı tasarruflar sağlamaktadır.

Aydınlatma sistemleri, depolarda enerji tüketiminin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Geleneksel floresan ve metal halide lambaların yerini alan LED tabanlı aydınlatma çözümleri, hem daha düşük enerji tüketimi hem de daha uzun kullanım ömrü sunmaktadır. Bununla birlikte sensör teknolojileriyle desteklenen akıllı aydınlatma sistemleri, yalnızca aktif kullanılan alanların aydınlatılmasını mümkün kılmakta ve gereksiz enerji kullanımını önlemektedir. Hareket ve varlık sensörleriyle entegre edilen bu sistemler, depo operasyonlarının dinamik yapısına uyum sağlayan esnek bir enerji yönetimi yaklaşımı sunmaktadır.

Isıtma, havalandırma ve iklimlendirme (HVAC) sistemleri, özellikle büyük hacimli depo tesislerinde önemli bir enerji yükü oluşturmaktadır. Enerji tasarruflu depo tasarımlarında, yüksek verimli HVAC sistemlerinin kullanımı, ısı geri kazanım teknolojileri ve doğal havalandırma çözümleri ön plana çıkmaktadır. Ayrıca sensörlerden elde edilen sıcaklık ve nem verilerinin WMS ve bina yönetim sistemleriyle entegre edilmesi, iklimlendirme ihtiyacının gerçek zamanlı olarak optimize edilmesine olanak tanımaktadır. Bu yaklaşım, enerji tüketimini azaltırken ürün kalitesinin korunmasını da desteklemektedir.

Yeşil depo kavramı, enerji verimliliğinin ötesine geçerek çevresel sürdürülebilirliği bütüncül bir bakış açısıyla ele almaktadır. Yeşil depolar; enerji tüketiminin azaltılması, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, su yönetimi, atık azaltımı ve çevre dostu malzeme kullanımı gibi kriterler doğrultusunda tasarlanan tesislerdir. Güneş panelleri, rüzgâr türbinleri ve enerji depolama sistemleri gibi yenilenebilir enerji çözümleri, depoların enerji ihtiyacının bir kısmının yerinde karşılanmasına olanak tanımakta ve karbon ayak izini azaltmaktadır.

Enerji yönetiminde dijitalleşme, yeşil depo uygulamalarının etkinliğini artıran önemli bir unsurdur. Enerji izleme ve yönetim yazılımları, depo genelindeki enerji tüketim profillerini ayrıntılı biçimde analiz edebilmekte ve anomali tespiti yapılmasını sağlamaktadır. Bu sistemler, hangi operasyonların veya ekipmanların daha fazla enerji tükettiğini ortaya koyarak iyileştirme fırsatlarının belirlenmesine katkı sunmaktadır. Özellikle sensör teknolojileriyle entegre çalışan enerji yönetim sistemleri, proaktif ve öngörücü bir yaklaşımın benimsenmesine olanak tanımaktadır.

Robotik depolama ve otonom lojistik sistemlerin enerji tasarruflu depo tasarımıyla birlikte değerlendirilmesi, bütüncül bir verimlilik yaklaşımını beraberinde getirmektedir. Robotik ekipmanların enerji tüketimi, manuel operasyonlara kıyasla daha öngörülebilir ve optimize edilebilir bir yapıya sahiptir. Rota optimizasyonu, görev önceliklendirme ve şarj yönetimi gibi unsurlar, robotik sistemlerin enerji verimliliğini artırmaktadır. Bu durum, otomasyon yatırımlarının yalnızca operasyonel performans değil, aynı zamanda enerji verimliliği açısından da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Tablo 6.4'te enerji tasarruflu depo tasarımında öne çıkan başlıca uygulamaları ve sağladıkları katkıları özetlemektedir.

Tablo 6.4. Enerji Tasarruflu Depo Tasarımı Uygulamaları

Uygulama Alanı	Kullanılan Çözüm	Sağlanan Katkı
Aydınlatma	LED ve sensörlü sistemler	Elektrik tüketiminin azalması
İklimlendirme	Yüksek verimli HVAC	Enerji yoğunluğunun düşmesi
Bina tasarımı	Yalıtım ve doğal ışık	Isıtma-soğutma ihtiyacının azalması
Yenilenebilir enerji	Güneş panelleri	Karbon ayak izinin azaltılması
Enerji izleme	Dijital yönetim sistemleri	Sürekli iyileştirme

Enerji tasarruflu depo tasarımı ve yeşil depo uygulamaları, lojistik işletmelerin yalnızca çevresel sorumluluklarını yerine getirmelerine değil; aynı zamanda uzun vadeli maliyet avantajı elde etmelerine de katkı sağlamaktadır. Enerji verimliliği yatırımlarının geri dönüş süresi, teknolojik gelişmeler ve teşvik mekanizmaları sayesinde giderek kısalmakta; bu da yeşil depo çözümlerini ekonomik açıdan daha cazip hâle getirmektedir (Tompkins vd., 2010).

Bu bölümde ele alınan yaklaşımlar, bir sonraki bölümde incelenecek olan **sürdürülebilir depo operasyonları ve performans ölçümü** için temel bir altyapı oluşturmaktadır. Enerji verimliliği odaklı tasarım kararları, ancak sürdürülebilir operasyonel stratejiler ve performans göstergeleriyle desteklendiğinde kalıcı bir etki yaratabilmektedir. Bu nedenle enerji tasarruflu depo tasarımı, akıllı depolama sistemlerinin sürdürülebilirlik boyutunun merkezinde yer almaktadır.

6. SÜRDÜRÜLEBİLİR DEPO OPERASYONLARI VE PERFORMANS ÖLÇÜMÜ

Sürdürülebilirlik, günümüzde depo operasyonlarının yalnızca çevresel etkilerle sınırlı olmayan, ekonomik ve sosyal boyutları da içeren çok boyutlu bir performans kriteri hâline gelmiştir. Akıllı depolama sistemlerinin sunduğu dijital altyapı, sürdürülebilirliğin soyut bir hedef olmaktan çıkarılarak ölçülebilir, izlenebilir ve yönetilebilir bir operasyonel yaklaşıma dönüştürülmesini mümkün kılmaktadır. Bu bağlamda sürdürülebilir depo operasyonları; enerji verimliliği, kaynak kullanımının optimizasyonu, iş gücü sağlığı ve güvenliği ile operasyonel dayanıklılığın bütünleşik biçimde ele alındığı bir yönetim anlayışını ifade etmektedir.

Sürdürülebilir depo operasyonlarının temelinde **verimlilik odaklı süreç tasarımı** yer almaktadır. WMS, robotik sistemler ve sensör teknolojileri sayesinde depo süreçleri ayrıntılı biçimde analiz edilebilmekte; gereksiz taşıma, bekleme ve yeniden işlem gibi katma değer yaratmayan faaliyetler tespit edilebilmektedir. Yalın lojistik ilkeleriyle uyumlu bu yaklaşım, hem operasyonel maliyetleri düşürmekte hem de enerji ve kaynak tüketimini azaltmaktadır. Böylece sürdürülebilirlik, operasyonel mükemmelliğin doğal bir çıktısı hâline gelmektedir.

Enerji ve kaynak yönetimi, sürdürülebilir depo operasyonlarının en kritik bileşenlerinden biridir. Enerji tasarruflu depo tasarımıyla elde edilen kazanımlar, ancak günlük operasyonlarda doğru uygulamalarla desteklendiğinde kalıcı hâle gelmektedir. Sensörler aracılığıyla izlenen enerji tüketim verileri, operasyonel planlama kararlarıyla ilişkilendirilerek analiz edilmekte ve enerji yoğunluğu yüksek faaliyetler için iyileştirme senaryoları geliştirilmektedir. Bu yaklaşım, birim sipariş veya birim ürün başına düşen enerji tüketiminin sistematik biçimde azaltılmasına olanak tanımaktadır.

Sürdürülebilirliğin sosyal boyutu, depo operasyonlarında çalışan refahı ve iş sağlığı–güvenliği uygulamalarıyla doğrudan ilişkilidir. Robotik ve otonom sistemlerin yaygınlaşması, ağır kaldırma, tekrarlı hareketler ve ergonomik açıdan riskli görevlerin otomasyon yoluyla azaltılmasını sağlamaktadır. Bu durum, iş kazalarının azalmasına ve çalışanların daha nitelikli, bilişsel beceri gerektiren görevlere yönlendirilmesine katkı sunmaktadır. Toplum 5.0 yaklaşımı çerçevesinde, insan merkezli otomasyon

modelleri sürdürülebilir depo operasyonlarının önemli bir bileşeni olarak öne çıkmaktadır.

Sürdürülebilir depo yönetiminde **performans ölçümü**, alınan kararların etkinliğinin değerlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Geleneksel performans göstergeleri çoğunlukla hız, maliyet ve hizmet seviyesi odaklıyken; sürdürülebilirlik perspektifi bu göstergelere çevresel ve sosyal ölçütlerin de eklenmesini gerektirmektedir. WMS ve analitik platformlar aracılığıyla elde edilen veriler, çok boyutlu performans ölçüm sistemlerinin kurulmasına olanak tanımaktadır.

Depo operasyonlarında yaygın olarak kullanılan sürdürülebilirlik odaklı performans göstergeleri arasında; enerji yoğunluğu (kWh/sipariş), karbon emisyonu (CO₂e), stok devir hızı, alan kullanım verimliliği, sipariş doğruluk oranı ve iş kazası sıklık oranı yer almaktadır. Bu göstergeler, depo performansının yalnızca operasyonel çıktılar üzerinden değil; uzun vadeli sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda da değerlendirilmesini sağlamaktadır. Özellikle enerji ve emisyon göstergelerinin düzenli olarak izlenmesi, çevresel performansın iyileştirilmesinde önemli bir geri bildirim mekanizması sunmaktadır.

Tablo 6.5, sürdürülebilir depo operasyonlarında kullanılan temel performans göstergelerini ve değerlendirme amaçlarını özetlemektedir.

Tablo 6.5. Sürdürülebilir Depo Operasyonları İçin Performans Göstergeleri

Performans Göstergesi	Ölçüm Amacı	Sürdürülebilirlik Boyutu
Enerji yoğunluğu	Enerji verimliliği	Çevresel
Karbon emisyonu	Çevresel etki	Çevresel
Sipariş doğruluk oranı	Hizmet kalitesi	Ekonomik
Alan kullanım verimliliği	Kaynak optimizasyonu	Ekonomik
İş kazası sıklık oranı	Çalışan güvenliği	Sosyal
Stok devir hızı	Operasyonel etkinlik	Ekonomik

Dijitalleşme, sürdürülebilir depo operasyonlarında yalnızca ölçüm değil; aynı zamanda **öngörücü ve önleyici yönetim** anlayışının benimsenmesini de mümkün kılmaktadır. Büyük veri analitiği ve yapay zekâ destekli modeller sayesinde, talep dalgalanmaları, enerji tüketim pik değerleri ve ekipman arızaları önceden tahmin edilebilmekte ve gerekli önlemler zamanında

alınabilmektedir. Bu durum, depo operasyonlarının etkinliğini artırarak belirsizliklere karşı daha esnek bir yapı oluşturulmasını sağlamaktadır. (Zijm vd., 2019).

Sürdürülebilir depo operasyonlarının başarısı, teknoloji yatırımlarının yanı sıra kurumsal kültür ve yönetim yaklaşımıyla da yakından ilişkilidir. Çalışanların sürdürülebilirlik hedefleri konusunda bilinçlendirilmesi, performans göstergelerinin şeffaf biçimde paylaşılması ve sürekli iyileştirme kültürünün benimsenmesi, dijital sistemlerden elde edilen kazanımların kalıcı hâle gelmesini desteklemektedir. Bu bütüncül yaklaşım, sürdürülebilirliğin kısa vadeli bir proje değil; uzun vadeli bir kurumsal strateji olarak ele alınmasını gerektirmektedir (Štreimikienė vd., 2025).

Bu bölümde ele alınan sürdürülebilir depo operasyonları ve performans ölçümü yaklaşımları, kitap bölümünün son kısmında yer alacak olan **genel değerlendirme ve gelecek perspektifleri** için analitik bir temel oluşturmaktadır. Akıllı depolama sistemleri, ancak performansı sistematik biçimde ölçülen ve sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu olarak yönetilen operasyonlar aracılığıyla gerçek potansiyeline ulaşabilmektedir.

7. GENEL DEĞERLENDİRME, SONUÇ VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ

Bu kitap bölümünde, akıllı depolama sistemleri ve otonom lojistik yaklaşımları; dijitalleşen depo operasyonlarında verimlilik ve enerji yönetimi ekseninde bütüncül bir çerçeve içerisinde ele alınmıştır. Depo Yönetim Sistemleri (WMS), robotik depolama çözümleri, sensör teknolojileri, akıllı raf sistemleri, enerji tasarruflu depo tasarımı ve sürdürülebilir operasyonel stratejiler; birbirinden bağımsız teknolojik bileşenler olarak değil, entegre bir akıllı depolama ekosisteminin tamamlayıcı unsurları olarak değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, modern depo sistemlerinin yalnızca operasyonel performans değil; aynı zamanda çevresel ve sosyal sürdürülebilirlik açısından da stratejik bir rol üstlendiğini ortaya koymaktadır.

Çalışmanın temel bulguları, dijitalleşmenin depo operasyonlarında verimlilik artışı sağlamanın ötesinde, karar alma süreçlerini daha öngörücü, şeffaf ve ölçülebilir hâle getirdiğini göstermektedir. WMS merkezli dijital entegrasyon, robotik ve otonom sistemlerin etkin biçimde yönetilmesini

mümkün kılarken; sensör teknolojileri ve akıllı raf sistemleri bu entegrasyonun veri üretim ve görünürlük katmanını oluşturmaktadır. Bu yapı sayesinde depo operasyonları, statik planlama anlayışından dinamik ve uyarlanabilir bir yönetime evrilmektedir.

Enerji tasarruflu depo tasarımı ve yeşil depo uygulamaları, akıllı depolama sistemlerinin sürdürülebilirlik boyutunu güçlendiren kritik unsurlar olarak öne çıkmaktadır. Enerji verimliliğine yönelik mimari ve teknolojik çözümler, sensör tabanlı izleme ve dijital enerji yönetim sistemleriyle desteklendiğinde, birim operasyon başına düşen enerji tüketiminin ve karbon emisyonlarının anlamlı biçimde azaltılabildiği görülmektedir. Bu durum, depoların yalnızca lojistik maliyet merkezleri değil; aynı zamanda sürdürülebilir değer üretim noktaları olarak yeniden konumlandırılmasına olanak tanımaktadır.

Sürdürülebilir depo operasyonları ve performans ölçümü bağlamında elde edilen değerlendirmeler, çok boyutlu performans göstergelerinin önemini açık biçimde ortaya koymaktadır. Geleneksel hız, maliyet ve hizmet seviyesi odaklı göstergelere ek olarak; enerji yoğunluğu, karbon emisyonu ve iş sağlığı–güvenliği gibi kriterlerin sistematik biçimde izlenmesi, sürdürülebilirlik hedeflerinin operasyonel kararlara entegre edilmesini sağlamaktadır. Dijitalleşme sayesinde bu göstergelerin gerçek zamanlı olarak izlenebilmesi, sürekli iyileştirme kültürünün kurumsal düzeyde benimsenmesine katkı sunmaktadır.

Bu bölümde sunulan bütüncül çerçeve, literatürde sıklıkla ayrı ayrı ele alınan teknolojik ve operasyonel yaklaşımların entegrasyonuna yönelik önemli bir katkı sağlamaktadır. Akıllı depolama sistemlerinin başarısının, tekil teknoloji yatırımlarından ziyade; bu yatırımların stratejik hedeflerle uyumlu, entegre ve sürdürülebilir bir yönetim anlayışıyla uygulanmasına bağlı olduğu vurgulanmaktadır. Bu yönüyle çalışma, hem akademik literatüre kavramsal bir katkı sunmakta hem de uygulayıcılar için yol gösterici bir referans niteliği taşımaktadır.

Gelecek perspektifleri açısından değerlendirildiğinde, akıllı depolama ve otonom lojistik alanında yapay zekâ, büyük veri analitiği ve dijital ikiz teknolojilerinin belirleyici bir rol üstleneceği öngörülmektedir. Talep tahmini, rota optimizasyonu, enerji tüketimi öngörüsü ve bakım planlaması gibi alanlarda geliştirilecek ileri analitik modeller, depo operasyonlarının daha

özerk ve uyarlanabilir hâle gelmesini sağlayacaktır. Ayrıca dijital ikizler aracılığıyla depo sistemlerinin sanal ortamda modellenmesi, farklı senaryoların test edilmesine ve yatırım kararlarının daha sağlıklı biçimde alınmasına olanak tanıyacaktır.

Bununla birlikte, gelecekteki akıllı depolama sistemlerinin tasarımında insan merkezli yaklaşımların öneminin artacağı değerlendirilmektedir. Toplum 5.0 perspektifi doğrultusunda, robotik ve otonom sistemlerin çalışanları ikame eden değil; onları destekleyen ve tamamlayan çözümler olarak kurgulanması beklenmektedir. Bu yaklaşım, hem operasyonel verimliliği hem de çalışan refahını birlikte ele alan sürdürülebilir bir lojistik modelinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak, akıllı depolama sistemleri ve otonom lojistik çözümleri; dijitalleşen depo operasyonlarında verimlilik, enerji yönetimi ve sürdürülebilirlik hedeflerinin gerçekleştirilmesinde stratejik bir araç olarak öne çıkmaktadır. Bu kitap bölümü, söz konusu dönüşümü bütüncül bir bakış açısıyla ele alarak, geleceğin lojistik ve depolama sistemlerine yönelik kavramsal ve uygulamaya dönük bir yol haritası sunmayı amaçlamaktadır. Akıllı depolama yaklaşımının, teknolojik gelişmeler ve sürdürülebilirlik gereksinimleri doğrultusunda önümüzdeki yıllarda daha da yaygınlaşacağı ve lojistik ekosisteminin temel bileşenlerinden biri hâline geleceği öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

- Boysen, N., de Koster, R., & Weidinger, F. (2019). Warehousing in the e-commerce era: A survey. *European Journal of Operational Research*, 277(2), 396–411. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.08.023>
- Christopher, M. (2016). *Logistics & supply chain management* (5th ed.). Pearson Education.
- de Koster, R., Le-Duc, T., & Roodbergen, K. J. (2007). Design and control of warehouse order picking: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 182(2), 481–501. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.07.009>
- Frazelle, E. (2016). *World-class warehousing and material handling* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.
- International Energy Agency (IEA). (2023). *Energy efficiency 2023*. IEA Publications.
- Kärkkäinen, M. (2003). Increasing efficiency in the supply chain for short shelf life goods using RFID tagging. *International Journal of Retail & Distribution Management*, 31(10), 529–536. <https://doi.org/10.1108/09590550310497058>
- Kembro, J., Norrman, A., & Eriksson, E. (2018). Adapting warehouse operations and design to omni-channel logistics: A literature review and research agenda. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 48(9), 890–912. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-01-2017-0052>
- McKinnon, A., Browne, M., Whiteing, A., & Piecyk, M. (2015). *Green logistics: Improving the environmental sustainability of logistics* (3rd ed.). Kogan Page.
- Richards, G. (2018). *Warehouse management: A complete guide to improving efficiency and minimizing costs in the modern warehouse* (3rd ed.). Kogan Page.

- Samuels, A. (2025). Examining the integration of artificial intelligence in supply chain management from Industry 4.0 to 6.0: A systematic literature review. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 7, 1477044. <https://doi.org/10.3389/frai.2024.1477044>
- Štreimikienė, D., Bathaee, A., & Streimikis, J. (2025). Sustainable logistics systems and digital transformation: A review. *Sustainability*, 17(10), 4453. <https://doi.org/10.3390/su17104453>
- Tompkins, J. A., White, Y. A., Bozer, Y. A., & Tanchoco, J. M. A. (2010). *Facilities planning* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Xu, Z., Elomri, A., Baldacci, R., Kerbache, L., & Wu, Z. (2024). Frontiers and trends of supply chain optimization in the age of Industry 4.0. *Annals of Operations Research*, 338, 1359–1401. <https://doi.org/10.1007/s10479-024-05879-9>
- Zijm, W. H. M., Klumpp, M., Heragu, S. S., & Regattieri, A. (2019). *Operations, logistics and supply chain management*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92447-2>
- Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017). Intelligent manufacturing in the context of Industry 4.0. *Engineering*, 3(5), 616–630. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015>

BÖLÜM 6

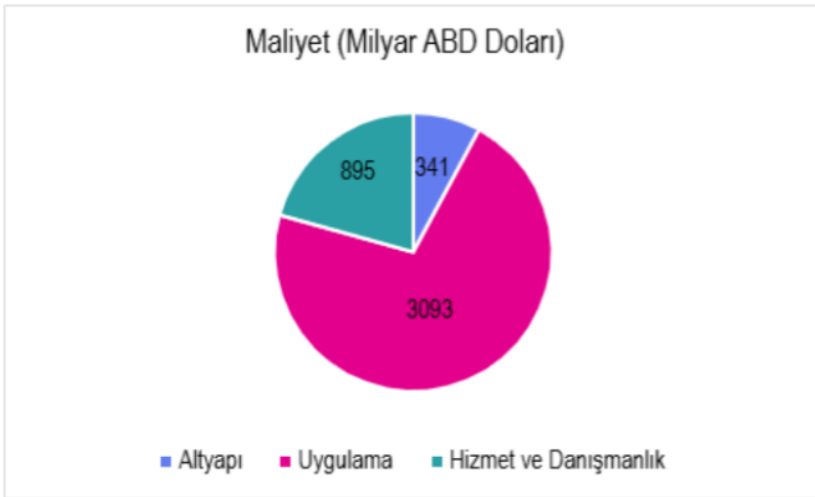
SEVKİYAT VE DAĞITIM PLANLAMASINDA YAPAY ZEKÂ TABANLI OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ, ROTA OPTİMİZASYONU, ÇOK KRİTERLİ KARAR MODELLERİ, KARBON EMİSYONU MİNİMİZE EDEN ALGORİTMALAR

Dr. Burçin PAÇACI¹

¹ Mail: burcinpcc@gmail.com , orcid: 0000-0001-6053-0458

1. GİRİŞ

Sevkiyat ve dağıtım bir ürünün depodan müşterilerin istedikleri noktalara dağıtımını amacıyla yapılan aktivitelerin tamamı olarak ifade edilmektedir (Eymen, 2007). Sevkiyat planlaması problemlerine yönelik geliştirilen analitik çözüm yöntemleri, lojistik açıdan daha az maliyetli, daha kısa sürede taşımacılığın gerçekleşmesini sağlayabilmektedir (Camcı ve Özpeynirci, 2018). Lojistik sistemleri altyapı, uygulama ve danışmanlık alt sınıflarından oluşmaktadır. Altyapı; limanlar, havaalanları ve depolar, uygulama; kara, deniz, hava taşımacılıkları ve kurye, ekspres ve paket teslimatını oluşturmaktadır. Yapılan bir araştırmada sınıflandırılan üç grubun dünya çapındaki maliyeti Şekil 1’de gösterilmektedir (Kern, 2021; Riedl ve ark. 2016).



Şekil 1: Lojistik sektörünün alt kategorilerine göre maliyeti (Kern, 2021; Riedl vd., 2016)

Şekil 1’den en fazla maliyetin uygulama alanına ait olduğu anlaşılmaktadır. Tedarik zinciri, lojistiği kapsamakta (Tien vd., 2019) olup tedarik zincirinde küreselleşme terimi motive edici unsurdur (Ray ve Nayak, 2023). Bu kapsamda küresel çapta rekabete ayak uydurmada maliyet verimliliğini optimize etmeyi amaçlayan geleneksel tedarik zinciri modellerinden ayrı, modern lojistik ağlarında dijitalleşme, sürdürülebilirlik,

yapay zekâ destekli karar alma gibi değişimlere gidilmektedir (Neway, 2024; Moghaddam ve Karimzadeh, 2025).

Bu çalışmada sevkiyat ve dağıtım planlaması üzerine “Yapay zekâ tabanlı optimizasyon yöntemleri”, “Rota optimizasyonu”, “Çok kriterli karar modelleri”, “Karbon emisyonu minimize eden algoritmalar” konuları incelenmiştir.

2. YAPAY ZEKÂ TABANLI OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ

Yapay zekâ, tarihten günümüze ortaya çıkan en önemli olaylardan biri olarak ifade edilmektedir (Pirim, 2006). Bilgi temsili, doğal dil anlama, hesaplama teorisi, akıl yürütme, genetik algoritma, makine öğrenimi, yapay sinir ağı (YSA), sistemler, veri madenciliği, programlama gibi bölümlere ayrılmaktadır (Bharadiya, 2023). İnsan beyninin çalışma mantığının modellenmesine dayanan yapay zekâ yatırım danışmanlığı, hastalıklara tanı koyma, reçete yazma, planlama, mühendislik, eczacılık, hukuk, yapı planlaması gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Karaduman, 2019). Bir devrim niteliği taşıyan yapay zekâ destekli tedarik zinciri optimizasyonundaki yenilikler, stratejiler ve karar alma süreçleri (Ivanov, 2010) tedarik zincirinde risk yönetiminde, karar almada, teslim süresinin, talep değişimlerinin, üretim belirsizliklerinin tahmininde önemli paya sahiptir (Nzeako vd., 2024, Kurz, 2025). Yapay zekâ destekli ulaşım planlaması küresel anlamda dağıtımı derinden etkilemiştir (Rashid ve Kausik, 2024). Verimliliğin artmasında, işçi bağımlılığının azaltılmasında, risk yönetimi, karar alma gibi birçok konuda (Peta, 2023; Rane vd., 2024; Sulaiman, 2024; Kurz, 2025) yapay zekâ tekniklerinden faydalanılmaktadır. Herhangi bir insan müdahalesi olmadan sürüş gerçekleşmesini sağlayan otonom araçlarda, trafik tahmini ve yönetiminde, akıllı altyapı ve bağlantılarında, çok modlu yolculuk planlamasında, sürdürülebilir ulaşım sistemlerinde, ulaşımında güvenlik sistemlerinde yapay zekâ tekniklerinden faydalanılmaktadır. Durum tahmini, olay tespiti, trafik altyapı kontrolü gibi çeşitli ulaşım sorunlarının ele alındığı yapay sinir ağları, destek vektör makineleri, Bayes ağları ile analizler gerçekleşmektedir (Bharadiya, 2023).

Otonom tedarik zincirleri, tahmine dayalı analizler gibi yapay zekâ kapsamındaki teknikler ile lojistik performansta ve tedarik zincirinde iyileşmeler elde edilmektedir. Tedarik zinciri yönetiminde yapay zekanın rolü aşağıdaki gibi sıralabilmektedir (Madancian vd., 2023).

- Geçmiş verileri ve pazar trendlerini analiz ederek hassas talep tahminlerinin yapılması
- Değişen koşullara uyum sağlayan, maksimum verimlilik için tedarik zinciri planlanması
- Depo işlemlerini otomatikleştiren ve sipariş karşılama süreçlerini iyileştiren robotik sistemlerin kullanılması
- Trafik, hava durumu ve maliyetleri dikkate alarak ulaşım rotalarının optimize edilmesi
- Bilinçli kararların alınması amacıyla tedarikçi verilerinin ve performansının değerlendirilmesi
- Görüntüleme sistemleri aracılığıyla hassas kalite kontrolünün yapılması

Tedarik zinciri alanını da destekleyen (Paramesha vd., 2024) yapay zekâ destekli sistemler, lojistik ve ulaşım rotalarını optimize edebilir, atıkları azaltabilir ve enerji verimliliğini artırarak daha sürdürülebilir tedarik zinciri operasyonlarına katkıda bulunabilir (Eyo-Udo, N.2024). Yapay zekanın güçlü tahmini sayesinde şirketlerin talep dalgalanmaları öngörülebilmekte ve stok seviyesi optimize edilebilmektedir (Shekhar vd., 2023). Yapay zekâ destekli teknolojilerin kullanılmasıyla kaynak kullanımının optimize edilmesi, enerji verimliliği amacıyla rota belirlenmesi ile enerji kullanımı ve karbon emisyonunun azaltılması sağlanabilir (Gupta vd., 2023). Tedarik zinciri performansı gün geçtikçe öneminin artması yapay zekâ tekniklerinin kullanımının artmasına yol açmaktadır (Nwagwu vd., 2023).

3. ROTA OPTİMİZASYONU

Maliyeti doğrudan etkileyen uygun güzergahların belirlenmesi lojistik faaliyetlerin kilit unsurudur (Giaglis vd., 2004). Araç rotalama probleminde temel amaç olarak maliyeti en aza indirmek ele alınmaktadır (Fischetti vd., 1994). Bunun yanı sıra araçların kat ettikleri mesafeyi (Desrosiers, Dumas ve

Soumis, 1986), toplam rota süresini (Savelsbergh, 1992) ve kullanılan yakıt tüketimini en aza indirmek (Kuo, 2010) de belirlenen hedefler arasındadır.

Dağıtım planlamasında birçok teknik kullanılabilmektedir. Bunlara tabu arama algoritması (Chen vd., 2019), Dijkstra algoritması (Bostan, 2023) hedef programlama (Yapar ve Altıparmak, 2017) teknikleri örnek verilebilmektedir. Literatürde optimizasyon tekniklerinden genetik algoritma lojistik ağının iyileşmesi amacıyla (Xin vd., 2022) kullanılmış olup minimum maliyet hedefli nakliye rotaları için ise parçacık sürüsü optimizasyonundan (Rahman ve Asih, 2020) faydalanılmıştır. Deniz yolu ulaşımında rota optimizasyonunda coğrafi bilgi sistemi (Catalani, 2009) tekniklerinin kullanıldığı çalışmalar mevcuttur. Aynı zamanda balık sürüsü ve karınca algoritması, tabu arama algoritması, simüle edilmiş tavlama algoritması rota optimizasyonunda kullanılan optimizasyon algoritmaları arasındadır (Gan, 2022).

4. ÇOK KRİTERLİ KARAR MODELLERİ

Çoklu Kriterli Karar Verme (ÇKKV) teknikleri karar biliminde önemli bir yere sahiptir (Toloi-Eshlaghy ve Homayonfar, 2011). Çoklu kriterli karar verme yöntemlerinin kullanımı, bir karar vericinin, düşünülen bir dizi alternatif arasından en iyi alternatifi seçmesine veya bunları bir amaç için önemlerine göre sıralamasına olanak tanımaktadır (Vinogradova vd., 2018). Modellerin çoğu, alternatifleri sıralamak için geliştirilmiş olup TOPSIS, PROMETHEE, VIKOR, GRA, ELECTRE gibi teknikler bulunmaktadır (Kou vd., 2012).

Tedarik zincirinde farklı ve çelişkili kriterlerin ele alınmasında çok kriterli yaklaşımlardan faydalanılmaktadır (Zandieh ve Aslani, 2019). ÇKKV tekniklerinin kullanıldığı lojistik alanı ile ilgili literatürde çok sayıda çalışma mevcuttur. Polonya’da lojistik merkez araştırmasına yönelik yapılan bir çalışmada Electre III/IV teknikleri kullanılmıştır (Żak ve Węgliński, 2014). Türkiye’de lojistik merkez yer seçimine yönelik yapılan bir çalışmada AHP tekniği kullanılmıştır (Eryürük vd., 2012). Helal gıda tedarik zincirinde çeşitli risk unsurlarının önceliklendirilmesinde Bulanık AHP tekniği (Khan vd., 2022), sürdürülebilir tedarik zinciri yönetiminde tedarikçi seçimi için de ÇKKV tekniklerinden faydalanılmıştır. Štreimikienė ve arkadaşları tarafından otomobil

endüstrisine yönelik hazırlanan çalışmada tedarikçi seçimi TOPSIS tekniği kullanılarak belirlenmiştir (Štreimikienė ve ark., 2024).

Yer seçimine ilişkin yapılan çalışmalarda hibrit teknikler de kullanılarak dağıtım sorunları çözülebilmektedir (Zandieh ve Aslani, 2019). Intermodal yük lojistik merkezleri için hazırlanan bir çalışmada yapay sinir ağı ve AHP'nin entegrasyonuna dayalı kavramsal bir model geliştirilmiştir (Kayıkçı, 2010). Liman seçimi amacıyla hazırlanan bir çalışmada ÇKKV ve yapay arı kolonisi algoritması tabanlı yaklaşımlar (Sumner ve Rudan, 2018) kullanılmıştır. Üretim sektöründe dış kaynak sağlayıcılarının değerlendirilmesi ve sınıflandırılması amacıyla hazırlanan bir çalışmada DEMATEL, CRITIC ve TOPSIS tekniklerinden faydalanılmıştır (Liaw ve ark., 2020).

5. KARBON EMİSYONUNU MİNİMİZE EDEN ALGORİTMALAR

Dünyada %3 karasal orana sahip olan kentsel alanlardan yayılan sera gazlarının oranı %60 ila %80 arasında değişmektedir (Bharadiya, 2023). Lojistik, sera gazı emisyonları gibi çevresel kirliliğin kaynaklarını doğrudan etkilemektedir (Wu, 2018). Tüm dünyada küresel ısınmaya ilişkin sorunlar neticesinde düşük karbonlu üretim önemli bir konu haline gelmiş (Zheng ve Wang, 2015) olup yapılan çalışmalardan anlaşılmaktadır ki ulaşımda kullanılan motorlu taşıtlardan karbon emisyonları meydana gelmektedir (Özdemir ve Kiraz, 2024). Karbon emisyonları ise küresel iklim değişikliği konusunda hızlandırıcı etkiye sahiptir (Özdemir ve Kiraz, 2024). Literatürde ulaşımda karbon emisyonlarının olumsuz etkisini en aza indirmeyi amaçlayan çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu amaçla birçok algoritmadan faydalanılmaktadır. Bunlara örnek olarak parçacık sürüsü optimizasyon algoritması, karınca kolonisi optimizasyonu, genetik algoritmalar (Sarioguz, 2025, Palamutçuoğlu vd., 2025) ve sinir ağıları verilebilir (Sarioguz, 2025). Bu algoritmalar, zorlu optimizasyon problemlerini çözerken canlı varlıkların kolektif davranışlarını ve karar alma süreçlerini taklit etmektedir. Mesafe ve CO emisyonunun azalmasını amaçlayan bir çalışmada yapay arı kolonisi, karınca kolonisi ve geleneksel genetik algoritma ile önerilen iki farklı hibrit algoritmadan daha fazla karbondioksit emisyonu oluşmuştur. Bu sebeple hibrit algoritmaların kullanılması tavsiye edilebilmektedir (Palamutçuoğlu vd., 2025).

Yapay arı kolonisi algoritması, sayısal problemleri optimize etmek için Karaboga tarafından 2005 yılında (Karaboga, 2005) tanımlan, sürü tabanlı bir meta-sezgisel algoritmadır. Bal arılarının akıllıca yiyecek arama davranışından esinlenilmiştir (Karaboga, 2010). Karınca kolonisi, Dorigo tarafından karıncaların yiyecek arama davranışını açıklamak için önerilen modeldir (Dorigo, 1992). Birçok ulaşım ve lojistik ortamında kullanılan yaygın bir araç olan genetik algoritmalar belirli ortak özelliklere sahip geniş bir sezgisel algoritma sınıfını ifade etmektedir (Arkhipov vd., 2020). Arama alanı hakkında hiçbir ipucu olmadığı durumlarda yüksek tahmin gücüne sahip olan gri kurt algoritmasının çalışma prensibi kurt sürülerinin avlanma prensibine dayanmaktadır (Mirjalili, 2014). Gri kurt algoritması 2014 yılında geliştirilmiş olup bir yapay zekâ algoritmasıdır (Uzlu, 2021). Büyük beyaz köpekbalıklarının davranışlarını simüle eden ve modelleyen, doğa tabanlı yöntemlerden esinlenmiş olan beyaz köpekbalığı optimizasyon algoritması da bir optimizasyon algoritmasıdır. Robotik, makine öğrenimi, görüntü işleme, planlama gibi alanlardaki zorlu sorunların çözümünde esnekliği, sağlamlığı ve performansı sayesinde kullanılmaktadır (Awadallah vd., 2025). Solucan optimizasyon algoritması adı verilen meta sezgisel optimizasyon yöntemi, solucanların yiyecek bulmak için nasıl süründüğünü simüle eden bir yöntemdir (Wang vd., 2018). Balina optimizasyon algoritması literatürde simüle algoritmasına dayalı bir meta sezgisel algoritmadır (Doğan, 2019). Balinaların sosyal davranışlarını taklit eden bir meta-sezgisel sistem olan balina optimizasyon algoritması, Mirjalili ve Lewis (2016) tarafından geliştirilmiştir (Mirjalili ve Lewis, 2016). İlk defa Glover tarafından önerilen tabu arama algoritması, yerel aramanın bir uzantısıdır ve kombinatoriyal optimizasyon alanında geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir (Pirim vd., 2008). Tabu arama algoritması proje planlamasında ve zamanlamasında yaygın olarak kullanılan, komşuluk tabanlı bir meta sezgisel algoritmadır (Zhang, 2024). Bunlardan başka konuyla ilgili birçok algoritma literatürde yer almaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Dünyada ve Türkiye’de lojistik sektörünün hacmi günden güne büyümektedir. Lojistik sektörünün dijital dönüşüm çağına girmiş olması yapay zekâ uygulamaları ağının genişlemesi bu alanda yapılan çalışmaları artırmıştır. Ürün takibi, talep tahmini, envanter yönetimi gibi birçok aşamada yapay zekâ

tekniklerinin kullanılması ile oldukça verimli sonuçlar elde edilmektedir. En iyi rotanın bulunması, zamanında teslimat, yakıt tüketiminde ve karbon emisyonlarında azalmaya yönelik çıktılar sektörde teknolojinin sağladığı kazanımlardır. Yapay zekâ destekli otonom araçların ve dron teknolojisinin de ilerleyen süreçlerde lojistik alanında büyük değişimlerin meydana gelmesine katkı sunacağı tahmin edilmektedir. Çalışmada yer alan ÇKKV modelleri de birçok alanda olduğu gibi sevkiyat ve dağıtım planlamasında sıkça kullanılmaktadır. En iyi alternatifin, en önemli kriterin belirlenmesinde faydalanılan ÇKKV modelleri sayesinde uzman kişilerin görüşleri ve ilgili veri doğrultusunda en uygun sonuca ulaşılabilir. Gerek geleneksel teknikler gerekse literatüre yeni kazandırılmış metotlar sayesinde dağıtım planlamasında ÇKKV teknikleri etkinliğini sürdürmektedir. Teknolojik gelişmelerin takip edilmesi ile sürdürülebilir ulaşım sağlanmasına katkı sağlanabilmektedir. Daha az yakıt ile daha az karbon emisyonunun meydana gelmesi ekolojiyi koruma adına atılabilecek adımlardandır. Bu doğrultuda teknolojinin yakından takip edilmesi, etkili ve verimli sevkiyat ve dağıtım planlaması için dakiklik, zaman ve yakıt tasarrufu, sürdürülebilirlik gibi çok yönlü faydayı beraberinde getirebilmektedir.

KAYNAKÇA

- Arkhipov, D. I., Wu, D., Wu, T., & Regan, A. C. (2020). A parallel genetic algorithm framework for transportation planning and logistics management. *IEEE Access*, 8, 106506-106515.
- Awadallah, M. A., Braik, M., AlAkhras, L., Kassaymeh, S., & Al-Betar, M. A. (2025). White Shark Optimizer and its Applications: A Systematic Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 1-69.
- Bharadiya, J. P. (2023). Artificial intelligence in transportation systems a critical review. *American Journal of Computing and Engineering*, 6(1), 35-45.
- Bostan, S. Kargo taşımacılığı sektöründe son adım dağıtım planlama ve rota optimizasyonu.
- Camcı, A., & Özpeynirci, N. Ö. (2018). Yük Birleştirme ve Sevkiyat Planlaması Problemleri.
- Catalani, M. (2009). Ship scheduling and routing optimization. An application to Western Mediterranean area.
- Chen, J., Gui, P., Ding, T., Na, S., & Zhou, Y. (2019). Optimization of transportation routing problem for fresh food by improved ant colony algorithm based on tabu search. *Sustainability*, 11(23), 6584.
- Desrosiers, J., Dumas, Y., & Soumis, F. (1986). A dynamic programming solution of the large-scale single-vehicle dial-a-ride problem with time windows. *American Journal of Mathematical and Management Sciences*, 6(3-4), 301-325.
- Doğan, C. (2019). Balina optimizasyon algoritması ve gri kurt optimizasyonu algoritmaları kullanılarak yeni hibrit optimizasyon algoritmalarının geliştirilmesi.
- Dorigo, M. (1992). *Optimization, Learning and Natural Algorithms*. PhD thesis. Milano, Italy: Politecnico di Milano.

- Eryürük, S. H., Kalaoğlu, F., & Baskak, M. (2012). A site selection model for establishing a clothing logistics center. *Textile and Apparel*, 22(1), 40-47.
- Eymen, U. E. (2007). Tedarik zinciri yönetimi. Kalite Ofisi Yayınları, 15.
<https://gcris.ieu.edu.tr/bitstream/20.500.14365/4236/1/3279.pdf>
- Eyo-Udo, N. (2024). Leveraging artificial intelligence for enhanced supply chain optimization. *Open Access Research Journal of Multidisciplinary Studies*, 7(2), 001-015.
- Fischetti, M., Toth, P., ve Vigo, D., 1994. A branch-and-bound algorithm for the capacitated vehicle routing problem on directed graphs. *Operations Research*, 42(5), 846–859.
- Gan, Q. (2022). A logistics distribution route optimization model based on hybrid intelligent algorithm and its application. *Annals of Operations Research*, 1-13.
- Giaglis, G. M., Minis, I., Tatarakis, A., & Zeimpekis, V. (2004). Minimizing logistics risk through real-time vehicle routing and mobile technologies: Research to date and future trends. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 34(9), 749-764.
- Gupta, C. P., Kumar, V. R., & Khurana, A. (2023). Artificial Intelligence integration with the supply chain, making it green and sustainable. In *2023 7th International Conference on Electronics, Materials Engineering & Nano-Technology (IEMENTech)* (pp. 1-5). IEEE.
- Ivanov, D. (2010). An adaptive framework for aligning (re) planning decisions on supply chain strategy, design, tactics, and operations. *International journal of production research*. Taylor & Francis, 48(13), pp. 3999–4017.
- Karaboga, D, (2005). An idea based on honey bee swarm for numerical optimization. Technical Report TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2005.
- Karaboga, D, (2010). Artificial bee colony algorithm, *Scholarpedia*, 5(3):6915.

- Karaduman,T.(2019). Yapay zekâ uygulama alanları. Gazi Üniversitesi, Bilisim Enstitüsü, Adli Bilisim. ABD.
- Kayikci, Y. (2010). A conceptual model for intermodal freight logistics centre location decisions. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2(3), 6297-6311.
- Khan, S., Khan, M. I., Haleem, A., & Jami, A. R. (2022). Prioritising the risks in Halal food supply chain: an MCDM approach. *Journal of Islamic Marketing*, 13(1), 45-65.
- Kern, J. (2021). The digital transformation of logistics: A review about technologies and their implementation status. 361-403.
- Kou, G., Lu, Y., Peng, Y., & Shi, Y. (2012). Evaluation of classification algorithms using MCDM and rank correlation. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 11(01), 197-225.
- Kuo, Y. (2010). Using simulated annealing to minimize fuel consumption for the time-dependent vehicle routing problem. *Computers & Industrial Engineering*, 59(1), 157–165.
- Kurz, W. (2025). Generic Multi-Agent AI Framework for Weighted Dynamic Corridor Price Optimisation, *Journal of Next-Generation Research* 5.0.
- Liaw, C. F., Hsu, W. C. J., & Lo, H. W. (2020). A hybrid MCDM model to evaluate and classify outsourcing providers in manufacturing. *Symmetry*, 12(12), 1962.
- Madancian, M., Taherdoost, H., Javadi, M., Khan, I. U., Kalantari, A., & Kumar, D. (2023). The impact of artificial intelligence on supply chain management in modern business. In *The international conference on artificial intelligence and smart environment* (pp. 566-573). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software*, 69, 46-61.

- Mirjalili, S., & Lewis, A. (2016). The whale optimization algorithm. *Advances in Engineering Software*, 95, 51–67.
- Moghaddam, G. K., & Karimzadeh, M. (2025). AI-Driven Digital Transformation and Sustainable Logistics: Innovations in Global Supply Chain Management.
- Neway, A. S. (2024). Digital Supply Chain: Navigating the future operation. Abegaz Sahilu Neway.
- Nwagwu, U., Niaz, M., Chukwu, M. U., & Saddique, F. (2023). The influence of artificial intelligence to enhancing supply chain performance under the mediating significance of supply chain collaboration in manufacturing and logistics organizations in Pakistan. *Traditional Journal of Multidisciplinary Sciences*, 1(02), 29-40.
- Nzeako, G. et al. (2024). The role of AI-Driven predictive analytics in optimizing IT industry supply chains. *International Journal of Management & Entrepreneurship Research*, 6(5), pp. 1489–1497.
- Özdemir, T., & Kiraz, D. E. (2024). Ulaşım kaynaklı emisyonların çevresel etkilerinin ve insan sağlığına yansımalarının incelenmesi: Ege Bölgesi örneği. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 29(2), 530-561.
- Palamutçuoğlu, B. T., Çavuşoğlu, S., Çamlı, A. Y., Virvanuta, F. O., Bacalum, S., Züngün, D., & Moisescu, F. (2025). Solution of the capacity-constrained vehicle routing problem considering carbon footprint within the scope of sustainable logistics with genetic algorithm. *Sustainability*, 17(2), 727.
- Paramesha, M., Rane, N. L. & Rane, J. (2024) Big data analytics, artificial intelligence, machine learning, internet of things, and blockchain for enhanced business intelligence, *Partners Universal Multidisciplinary Research Journal*, 1(2), pp. 110–133.

- Peta, S. (2023) Journey of artificial intelligence Frontier: A comprehensive overview, *Global Journal of Computer Science and Technology*, 23(D2), pp. 9–36.
- Pirim, A. G. H. (2006). Yapay zeka. *Yaşar Üniversitesi E-Dergisi*, 1(1), 81-93.
- Pirim, H., Eksioglu, B., & Bayraktar, E. (2008). Tabu Search: a comparative study (Vol. 278). London, UK: INTECH Open Access Publisher.
- Rahman, A., & Asih, H. M. (2020). Optimizing shipping routes to minimize cost using particle swarm optimization. *International Journal of Industrial Optimization*, 1(1), 53.
- Rashid, A. Bin & Kausik, A. K. (2024). AI revolutionizing industries worldwide: A comprehensive overview of its diverse applications, *Hybrid Advances*. Elsevier, p. 100277.
- Rane, N. L., Kaya, Ö. & Rane, J. (2024). Artificial Intelligence, Machine Learning, and Deep Learning for Sustainable Industry 5.0. Deep Science Publishing.
- Ray, S. & Nayak, L. (2023). Marketing sustainable fashion: trends and future directions. *Sustainability*. MDPI, 15(7), p. 6202.
- Riedl, J., Farag, H., & Kprenkiewich, D. (2016). Transportation and Logistics in a Changing World. Mode of access: http://imgstg.bcg.com/BCG-Transportation-and-Logistics-in-a-Changing-World-Oct-2016_tcm9-146338. Pdf.
- Sarioguz, O. (2025). Artificial Intelligence for sustainable logistics: Reducing carbon emissions and fuel consumption through route optimization.
- Savelsbergh, M.W., 1992. The vehicle routing problem with time windows: Minimizing route duration. *ORSA Journal on Computing*, 4(2), 146–154.
- Shekhar, A., Prabhat, P., Yandrapalli, V., Umar, S., Abdul, F., & Wakjira, W. D. (2023). Generative AI in supply chain management. *International*

- Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication, 11(9), 4179-4185.
- Štreimikienė, D., Bathaei, A., & Streimikis, J. (2024). MCDM Approaches for Supplier Selection in Sustainable Supply Chain Management. *Sustainability* (2071-1050), 16(23).
- Sulaiman, I. M. (Ed.). (2024). *Recent Advancements in the Diagnosis of Human Disease*. CRC Press.
- Sumner, M., & Rudan, I. (2018). A hybrid MCDM approach to transshipment port selection. *Pomorstvo*, 32(2), 258-267.
- Tien, N. H., Anh, D. B. H., & Thuc, T. D. (2019). Global supply chain and logistics management.
- Toloe-Eshlaghy, A., & Homayonfar, M. (2011). MCDM methodologies and applications: a literature review from 1999 to 2009. *Research Journal of International Studies*, 21(21), 86-137.
- Uzlu, E. (2021). Estimates of greenhouse gas emission in Turkey with grey wolf optimizer algorithm-optimized artificial neural networks. *Neural Computing and Applications*, 33(20), 13567-13585.
- Vinogradova, I., Podvezko, V., & Zavadskas, E. K. (2018). The recalculation of the weights of criteria in MCDM methods using the bayes approach. *Symmetry*, 10(6), 205.
- Wang, G.-G., Deb, S., & Coelho, L. D. S. (2018). Earthworm optimisation algorithm: A bio-inspired metaheuristic algorithm for global optimisation problems. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 12(1), 1–22. <https://doi.org/10.1504/IJBIC.2018.093328>
- Wu, D., Huo, J., Zhang, G., & Zhang, W. (2018). Minimization of logistics cost and carbon emissions based on quantum particle swarm optimization. *Sustainability*, 10(10), 3791.

- Xin, L., Xu, P., & Manyi, G. (2022). Logistics distribution route optimization based on genetic algorithm. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022(1), 8468438.
- Yapar, U., & Altıparmak, F. (2017). Bozulabilir ürünlerin dağıtım planlaması için bir sezgisel yaklaşım. *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University/Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(1).
- Żak, J., & Węgliński, S. (2014). The selection of the logistics center location based on MCDM/A methodology. *Transportation Research Procedia*, 3, 555-564.
- Zandieh, M., & Aslani, B. (2019). A hybrid MCDM approach for order distribution in a multiple-supplier supply chain: A case study. *Journal of Industrial Information Integration*, 16, 100104.
- Zhang, Y., Teng, Y., & Li, X. (2024). Tabu search-based multi-objective optimization of work package schemes to minimize project costs and carbon emissions. In *International Conference on Construction Engineering and Project Management* (pp. 823-830).
- Zheng, H. Y., & Wang, L. (2015). Reduction of carbon emissions and project makespan by a Pareto-based estimation of distribution algorithm. *International Journal of Production Economics*, 164, 421-432.

BÖLÜM 7

TEDARİK ZİNCİRİ PERFORMANS YÖNETİMİ: DİJİTAL KPI'LAR, ANALİTİK RAPORLAMA VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ÖLÇÜTLERİ

Doç. Dr. Emre BİLGİN SARI¹

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, İzmir, Türkiye. emre.bilgin@deu.edu.tr, Orcid: 0000-0001-5110-1918

1. GİRİŞ

Tedarik zinciri performans ölçümü, küreselleşme, dijitalleşme ve sürdürülebilirlik paradigmalarının etkileriyle son yirmi yılda köklü bir dönüşüm geçirmiştir. Temel tedarik zinciri performans araştırmaları, maliyet verimliliği, operasyonel güvenilirlik, lojistik ve operasyon yönetimine dayanan temel hizmet seviyesi göstergelerine odaklanırken, bu geleneksel ölçütler, doğrusal tedarik zincirleri için yeterli olmuştur. Küresel tedarik zincirlerinin yaygınlaşmasıyla, çok aşamalı dağıtım ağları, e-ticaret ve gerçek zamanlı müşteri beklentilerinin yükselişi, performans değerlendirme alanının yeniden tanımlanması ihtiyacını doğurmuştur.

Doğal afetler, pandemiler, jeopolitik riskler ve talep değişkenliği gibi faktörlerin etkilerini gören tedarik zincirlerinde, geleneksel performans ölçümleri yetersiz hale gelmiştir (Christopher ve Peck, 2004). Günümüzün tedarik zincirleri, dijital teknolojilerin, veri odaklı sistemlerin ve otomatik iş akışlarının kapsamlı operasyonel veriler sağladığı karmaşık siber-fiziksel ekosistemler içinde faaliyet göstermektedir (Waller ve Fawcett, 2013). IoT sensörleri, RFID sistemleri, GPS izleme, bulut tabanlı ERP-WMS-TMS platformları ve makine öğrenimi uygulamaları benzeri görülmemiş bir görünürlük ve analitik potansiyel yaratmaktadır (Ben-Daya, vd., 2019; Queiroz ve Wamba, 2019). Sonuç olarak, tedarik zincirlerinde yönetim odağı operasyonel sonuçları izlemekten, verileri yorumlamaya, riskleri tahmin etmeye, akışları optimize etmeye ve uçtan uca dayanıklılığı sağlamaya yönelmiştir.

Dijitalleşmeye paralel olarak, sürdürülebilirlik başlığı da stratejik ve düzenleyici bir gereklilik olarak ortaya çıkmış ve işletmeleri performans sistemlerini geleneksel maliyet ve hizmet ölçütlerinin ötesine taşımaya teşvik etmiştir. Paydaşlar, emisyonlar, enerji kullanımı, atık üretimi, çalışma koşulları ve tedarikçi uyumluluğu dahil olmak üzere tedarik zinciri performansının çevresel ve sosyal boyutlarında giderek daha fazla şeffaflık beklemektedir (Seuring ve Müller, 2008; Brandenburg vd., 2014). ESG raporlama standartlarının ve döngüsel ekonomi ilkelerinin entegrasyonu, sorumlu ve dirençli tedarik zinciri yönetimine doğru daha geniş bir geçişi yansıtmaktadır.

Kitabın bu bölümü, gerçek zamanlı verilerden ve gelişmiş teknolojilerden yararlanan dijital KPI'lar, verileri içgörüye dönüştüren analitik raporlama ve izleme sistemleri, çevresel ve sosyal etkileri yakalayan sürdürülebilirlik ve yeşil lojistik ölçümlerine odaklanarak çağdaş tedarik zinciri performans ölçümünün kapsamlı bir incelemesini sunmaktadır:

2. TEDARİK ZİNCİRLERİ İÇİN DİJİTAL KPI'LAR

Dijital dönüşüm, tedarik zinciri performans ölçümünün doğasını kökten değiştirmiştir. Geleneksel KPI sistemleri sıralı, istikrarlı ve işlevsel olarak izole edilmiş tedarik zinciri yapıları için tasarlanmışken, çağdaş tedarik zincirleri, veri akışlarının fiziksel akışlar kadar kritik olduğu, birbirine bağlı, dijital olarak zenginleştirilmiş ağlar olarak faaliyet göstermektedir. E-ticaretin hızlanması, küreselleşme, çok katmanlı kaynak kullanımı ve gerçek zamanlı müşteri beklentileri, işletmeleri neyin ölçülmesi gerektiği, bilgilerin nasıl toplanması gerektiği ve içgörülerin ne kadar hızlı bir şekilde yönetsel eyleme dönüştürülmesi gerektiği konularını yeniden değerlendirmeye zorlamıştır (Waller ve Fawcett, 2013). Otomatik veri toplama, öngörücü analiz ve entegre kurumsal sistemlerle desteklenen dijital KPI'lar, işletmelerin operasyonların dinamik değişkenliğini, karşılıklı bağımlılıklarını ve zaman hassasiyetini yakalamalarına olanak tanımaktadır (Ben-Daya vd., 2019).

Tedarik veya depolama gibi işlevlerde verimliliği vurgulayan geleneksel metriklerin aksine, dijital KPI'lar tedarik zinciri davranışına dair sistematik bir anlayışı yansıtmaktadır. İzlenebilirlik, teslim süresi değişkenliği, riske maruz kalma, tahmin güvenilirliği ve ağ duyarlılığı gibi unsurları içerirken; bu boyutlar küresel tedarik zinciri rekabet gücü için giderek daha önemli kabul edilmektedir (Ivanov ve Dolgui, 2020).

2.1. Tedarik Zinciri KPI'larının Evrimi

Tedarik zinciri araştırmalarının ilk aşamalarında, performans ölçüm sistemleri büyük ölçüde çevrim süresi, nakliye maliyeti, envanter devir hızı ve teslimat güvenilirliği gibi geleneksel lojistik ölçütlerine dayandırılmıştır. Bu göstergeler, uçtan uca koordinasyondan ziyade, öncelikli olarak izole işlevlerdeki operasyonel verimliliğe odaklanan bir yönetim anlayışını yansıtmaktadır (Beamon, 1999). Tedarik zincirleri nispeten doğrusal ve bilgi

sistemlerinin entegrasyon kabiliyetleri ile sınırlı olduğundan, işletmeler fonksiyonlar arası veya çok kademeli performans izlemek için gereken teknolojik araçlardan yoksun olarak yapılanmıştır. Sonuç olarak, ilk KPI'lar statik, geçmişe dönük ve periyodik raporlama döngüleriyle güncellenen yapıları ile yöneticilerin ortaya çıkan aksaklıkları veya değişkenlikleri tespit etme becerisini kısıtlamıştır (Christopher, 2016).

Tedarik zincirleri giderek daha dijital ve karmaşık hale geldikçe, geleneksel ölçütlerin yetersizliği daha belirgin hale gelmiştir. Dış kaynak kullanımının büyümesi, küreselleşmiş tedarik düzenlemeleri, dinamik talep kalıpları ve otomatikleştirilmiş operasyonlar, gerçek zamanlı gelişmeleri ve karşılıklı bağımlılıkları yansıtabilen KPI'lar gerektirmiştir. Dijitalleşmenin görünürlük, yanıt verme hızı, izlenebilirlik ve öngörü yeteneğinin maliyet ve hizmet güvenilirliği kadar önemli olduğu yeni bir performans ortamı yaratmasıyla birlikte (Waller ve Fawcett, 2013), işletmeler, teslim sürelerinin daha öngörülemez bir şekilde dalgalandığını, kesintilerin ağ düğümleri arasında hızla yayıldığını ve müşteri beklentilerinin periyodik değil, sürekli izleme gerektirdiğini fark etmeye başlamıştır.

Dijital KPI'lara doğru evrim, veri entegrasyonu ve görünürlüğüyle ilgili yeni zorluklar da yaratmıştır. Tedarik zincirleri, ERP platformları, WMS ve TMS uygulamaları, MES yapılanmaları, IoT sensörleri, RFID etiketleri ve tedarikçi bilgi portalları dahil olmak üzere çeşitli sistemlerden veri üretmektedir. Bu sistemler genellikle farklı veri tanımları, formatları ve güncelleme sıklıklarıyla çalışmakta ve bu da KPI ölçümünü zorlaştıran tutarsızlıklar yaratmaktadır (Kache ve Seuring, 2017). Birlikte çalışabilirlik ve veri yönetişiminin eksikliği, KPI hesaplamalarında hatalara, iş ortakları arasında parçalı görünürlüğe ve uyumsuz performans değerlendirmelerine yol açabilmektedir. Sonuç olarak, modern KPI sistemleri, güvenilir ve uçtan uca görünürlük sağlamak için güçlü veri standardizasyonu, veri yönetimi ve uyumlu entegrasyon mimarileri gerektirmektedir.

Tedarik zinciri KPI'larının evrimi, işlevsel olarak izole edilmiş, verimlilik odaklı sistemlerden dijital olarak etkinleştirilmiş, ağ odaklı ve öngörücü performans çerçevelerine doğru daha geniş bir geçişi yansıtmaktadır. Bu değişim, gelişmiş, veri odaklı performans değerlendirme yöntemleri

gerektilen küresel tedarik zincirlerinin artan karmaşıklığı ve belirsizliğiyle uyumludur.

2.2. Dijital KPI'lar

Dijital KPI'lar, gerçek zamanlı verilerden, otomatik algılama teknolojilerinden ve algoritmik analizlerden yararlanarak geleneksel performans ölçümünü genişletmektedir. En yaygın olarak kullanılan göstergelerden biri, siparişlerin beklenen zamanda, doğru miktarda ve koşulda teslim edilip edilmediğini ölçen *Tam Zamanında Teslimat (On-Time In-Full / OTIF)*'dir. GPS ve barkod tarama gibi dijital izleme teknolojileri sayesinde OTIF, depo toplama gecikmeleri, tedarikçi eksiklikleri veya ulaşım aksaklıkları gibi belirli arıza noktalarına ayrıştırılabilir ve bu da işletmelerin daha doğru kök neden analizleri yapmalarına olanak tanımaktadır (van der Vorst, 2006). Saghaian ve Van Oyen (2019), yüksek OTIF performansını geliştirmiş çeviklik ve müşteri sadakati ile ilişkilendirmektedir.

Çok kanallı ticaret, anında ürün bulunabilirliğine olan ihtiyacı artırdıkça *doluluk oranı* önem kazanmıştır. Nesnelerin İnterneti (IoT) sensörleri ve RFID teknolojisi kullanan dijital envanter sistemleri, neredeyse kusursuz envanter görünürlüğü sağlayarak otomatik yenilemeyi mümkün kılmakta ve güvenlik stoğuna olan bağımlılığı azaltmaktadır (Babai vd., 2020). Geleneksel olarak istatistiksel tekniklerle ölçülen tahmin doğruluğu, gerçek zamanlı piyasa sinyallerini, hava durumu modellerini, sosyal medya trendlerini ve satış noktası verilerini içeren makine öğrenimi algoritmaları sayesinde önemli ölçüde artırılmıştır (Hyndman ve Athanasopoulos, 2018). Daha doğru tahmin, kırıbaç etkisini azaltmıştır ve bu durum tedarik, üretim ve nakliye genelinde daha istikrarlı bir planlama sağlamaktadır (Wieland ve Wallenburg, 2013).

Uçtan uca teslim süresi, manuel olarak takip edilen bir ölçümden, siparişin verilmesinden nihai teslimata kadar geçen sürenin tamamını yakalayan dijital olarak izlenen bir göstergeye dönüşmüştür. GPS telematiği, depo otomasyonu ve iş akışı zaman damgaları sayesinde işletmeler, teslim süresi değişkenliğini analiz edebilir ve yanıt vermeyi etkileyen darboğazları belirleyebilir hale gelmiştir (Christopher, 2016). Benzer şekilde, dijital izlenebilirlik, mevzuata uyum veya hızlı geri çağırma yetenekleri gerektiren sektörlerde vazgeçilmez hale gelmiştir. Blockchain, IoT sensörleri ve bulut

veritabanları, işletmelerin her bir birimi veya bileşeni yaşam döngüsü boyunca izlemesine, sahte ürünler veya etik olmayan kaynak kullanımıyla ilgili riskleri azaltmasına olanak tanımaktadır (Montecchi vd., 2019).

Tedarikçi güvenilirliği, dijital ortamlarda bir diğer kritik KPI'dır. Entegre tedarikçi portalları ve analitik çalışma ortamları, işletmelerin tedarikçi performansını dinamik olarak puanlamalarına olanak tanımakta ve zamanında teslimat, sevkiyat doğruluğu, kusur oranları ve kesintilere yanıt verme gibi göstergeleri birleştirmektedir (Kache ve Seuring, 2017). Güvenilmez tedarikçiler, emniyet stoğu gereksinimlerini artıran ve dayanıklılığı azaltan teslim süresi değişkenliğine yol açmaktadır (Bode ve Wagner, 2015), bu durum da bu göstergeyi ağ tasarımının temeline yerleştirmektedir.

Son olarak, hizmet maliyeti son derece ayrıntılı ve dijital olarak etkinleştirilmiş bir ölçüt haline gelmiştir. Maliyetleri geniş ortalamalar kullanarak tahsis etmek yerine, işletmeler artık her müşteri segmentine veya kanalına hizmet vermenin gerçek maliyetini ölçmek için süreç madenciliği, faaliyet tabanlı maliyetlendirme ve gerçek zamanlı nakliye ve depolama verilerini kullanmaktadır (Wang vd., 2020). Bu gösterge, kârlılık ve müşteri değerini dengeleyen farklılaştırılmış hizmet stratejilerine olanak tanımaktadır.

2.3. Dijital KPI Ölçümünü Destekleyen Teknolojiler

Dijital KPI'ların operasyonel hale getirilmesi, veri toplamayı otomatikleştiren, bilgi akışlarını senkronize eden ve gerçek zamanlı analizi destekleyen gelişmiş teknolojilere bağlıdır. IoT sensörleri, çevresel koşullar, makine performansı, araç hareketi ve envanter durumu hakkında yüksek frekanslı veriler sağlayarak, işletmelerin periyodik denetimlere güvenmek yerine sürekli performans ölçümleri oluşturmaya olanak tanımaktadır (Atzori vd., 2017). RFID etiketleri, ürünlerin, paletlerin ve konteynerlerin otomatik takibini destekleyerek izlenebilirlik ve envanter doğruluğunun daha doğru değerlendirilmesini sağlamaktadır (Ngai vd., 2008). GPS sistemleri, teslim süresi analizi, tahmini varış süresi tahmini ve nakliye güvenilirliği değerlendirmesine bilgi sağlayan gerçek zamanlı konum, hız ve rota verileri sağlamaktadır (Carvalho vd., 2020).

ERP, WMS, TMS ve MES platformları dahil olmak üzere entegre kurumsal sistemler, dijital KPI ölçümünün omurgasını oluşturmaktadır. ERP sistemleri, planlama ve tedarik süreçlerinden temel işlem verileri sağlamakta; WMS sistemleri, ayrıntılı depolama, toplama ve envanter hareketleri üretmekte; TMS sistemleri, taşıyıcı performansını, rota kararlarını ve yük yürütmeyi yakalamakta; MES sistemleri ise çevrim süreleri ve duruş olayları da dahil olmak üzere üretim hattı faaliyetlerini kaydetmektedir (Hofmann vd., 2021). Bu sistemler ayrı ayrı çalıştığında, KPI doğruluğu ve görünürlüğü olumsuz etkilenebilir olsa da birlikte çalışabilir mimariler aracılığıyla entegre edildiklerinde uçtan uca tedarik zinciri boyunca tutarlı ve gerçek zamanlı ölçüm sağlamaktadırlar.

Gerçek zamanlı veri toplama, bulut tabanlı IoT merkezleri gibi akış analitiği platformları sayesinde daha da geliştirilmiştir. Bu teknolojiler, operasyonel verilerin sürekli olarak toplanmasını ve işlenmesini sağlayarak anında anormallik tespiti, öngörücü uyarılar ve otomatik karar desteğini yapılandırmaktadır (Lee vd., 2014). Bu platformlara entegre makine öğrenimi algoritmaları, talep dalgalanmaları, teslim süresi değişkenliği, ekipman arızaları ve tedarikçi riskleriyle ilgili kalıpları analiz ederek işletmelerin reaktif raporlamadan proaktif yönetime geçiş yapmalarını sağlamaktadır (Ivanov ve Dolgui, 2020).

Dijital KPI ölçümünü destekleyen teknolojiler, kapsamlı görünürlük, daha yüksek veri doğruluğu, daha hızlı güncelleme döngüleri ve gelişmiş analitik yetenekler sağlayarak KPI ölçüm ortamını dönüştürmektedir. Tedarik zinciri yöneticilerinin sapmaları daha erken tespit etmelerine, sistemsel kısıtlamaları belirlemelerine, hizmet, maliyet ve risk arasındaki dengeleri sağlamalarına ve daha dayanıklı ve uyarlanabilir tedarik zinciri ağları tasarlamalarına olanak tanımaktadır.

3. ANALİTİK RAPORLAMA VE GERÇEK ZAMANLI İZLEME

Tedarik zincirlerinin hızla dijitalleşmesi, dijital KPI'lar ve teknolojiler ile işletmelerin performans bilgilerini toplama, yorumlama ve bunlara göre hareket etme biçimlerini kökten değiştirmiştir. Gelişmiş görselleştirme panolarının, tedarik zinciri kontrol kulelerinin ve çok katmanlı analitik

platformların ortaya çıkışı, statik raporlamadan dinamik, veri odaklı istihbarata doğru bir geçişi yansıtmaktadır (Waller ve Fawcett, 2013).

Analitik raporlama araçları, karar vericilere sapmaları oluştukları anda gözlemlene, performans sorunlarının temel nedenlerini anlama ve alternatif yanıtları değerlendirme olanağı sağlamaktadır. Gerçek zamanlı izleme, tedarik zinciri yöneticilerinin ister nakliye gecikmeleri ister beklenmedik talep artışları, makine arızaları veya tedarikçi arızaları olsun, aksaklıkları erkenden fark etmelerini ve sonuçlar ağı yayılmadan önce azaltma mekanizmalarını etkinleştirmelerini sağlayarak bu yeteneği genişletmektedir (Ivanov, 2021). Analitik raporlama ve gerçek zamanlı izlemeyle birlikte, dijital tedarik zincirinin bilişsel katmanını oluşturarak, ham operasyonel verileri hem taktiksel ayarlamalara hem de stratejik planlamaya rehberlik eden anlamlı içgörülere dönüştürmektedir.

3.1. Gösterge Panoları ve Kontrol Kuleleri

Gösterge panoları, karmaşık verileri yönetsel dikkati ve zamanında eylemi destekleyen sezgisel ve yorumlanabilir bir formatta birleştirdikleri için tedarik zinciri performansını görselleştirmek için temel araçlar olarak ortaya çıkmıştır. Araştırmalar, etkili gösterge panolarının açıklık, bağlamsal uygunluk ve bilişsel verimlilik ilkelerine göre yönetildiğini vurgulamaktadır (Few, 2006). Kullanıcıları aşırı verilerle boğmak yerine, yüksek kaliteli gösterge panoları beklenen performanstan sapmaları vurgulamakta, eğilimleri görselleştirmekte, KPI'lar arasındaki karşılıklı bağımlılıkları sunarak ayrıntılı tanı koymayı kolaylaştıran inceleme işlevi sağlamaktadır (O'Donnell ve David, 2000). Tedarik zinciri bağlamında, gösterge panoları genellikle sipariş karşılama ilerlemesi, nakliye durumu, envanter seviyeleri, kapasite kullanımı ve tahmin varyansı gibi göstergeleri görüntüleyerek yöneticilerin operasyonlara gerçek zamanlı bir genel bakış elde etmelerini sağlamaktadır.

Gösterge panellerinin özellikle önemli bir alt kümesi, lojistik görünürlük gösterge panelleri sınıfıdır. Bu sistemler, IoT cihazlarından, GPS tabanlı izleme sistemlerinden, depo yönetim uygulamalarından ve ulaştırma hizmeti sağlayıcılarından gelen verileri entegre ederek hareket halindeki malların, depodaki envanterin ve operasyonel darboğazların kapsamlı bir görünümünü sunmaktadır. Gerçek zamanlı lojistik görünürlüğünün yanıt vermeyi artırdığı,

teslim süresi değişkenliğini azalttığı ve tedarik zinciri ortakları arasında koordinasyonu desteklediğini bilinmektedir (Caridi vd., 2014). Tahmini varış süreleri, bekleme süreleri, çapraz yükleme gecikmeleri ve stok tükenme riskleri gibi bilgileri görüntüleyerek, lojistik gösterge panelleri işletmelerin reaktif kontrolden önleyici kontrole geçişine yardımcı olmaktadır.

Gösterge panellerinin ötesinde, tedarik zinciri kontrol kuleleri analitik raporlamaya daha gelişmiş ve entegre bir yaklaşımı temsil etmektedir. Kontrol kuleleri, öngörücü analitik, makine öğrenimi modelleri, senaryo simülasyon araçları, uyarı sistemleri ve çok katmanlı görünürlük ve proaktif müdahaleyi destekleyen iş birliğine dayalı karar katmanlarını birleştirerek gösterge panellerinin rolünü genişletmektedir (Hofmann, vd., 2021). Yalnızca operasyonel koşulları görüntüleyen geleneksel izleme araçlarının aksine, kontrol kuleleri tedarikçi güvenilirliğindeki sapmalar, üretim gecikmeleri veya ulaşım aksaklıkları gibi erken risk belirtilerini belirlemek ve azaltma eylemleri önermek için veri akışlarını sürekli olarak analiz etmektedir. Tedarik, üretim, lojistik ve müşteri hizmetleri genelinde bilgi ve karar alma süreçlerini koordine eden merkezi yapılar olarak hizmet veren kontrol kulesi sistemleri, işletmelerin gelişmiş dayanıklılık, daha hızlı yanıt süreleri ve aksaklıklarla başa çıkmada daha fazla çeviklik deneyimlediği ortaya çıkmıştır (Ivanov, 2021).

3.2. Analitik Teknikler

Tedarik zinciri performans yönetimi, büyük ölçüde operasyonel verileri eyleme dönüştürülebilir gelişmiş analitik tekniklere dayanmaktadır. Betimsel analitik, geçmiş verileri özetleyerek kalıpları, mevsimsellikleri ve performans temel çizgilerini ortaya çıkaran temel analiz katmanı olmaya devam etmektedir (Delen ve Demirkan, 2013). Betimsel içgörüler nedenselliği açıklamasa da, gözlemlenen sapmaların anomalileri mi yoksa beklenen dalgalanmaları mı temsil ettiğini değerlendirmek için temel bir bağlam sağlamaktadır.

Tanısal analiz, performans sapmalarının altında yatan nedenleri ortaya çıkarmayı amaçlayarak tanımlayıcı bilgilere dayanmaktadır. İstatistiksel süreç kontrolü, korelasyon analizi ve kök neden analizi gibi yöntemler, teslim sürelerinin neden arttığını, belirli birimlerde neden tahmin hataları ortaya çıktığını veya depo verimliliğinin neden düştüğünü belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Montgomery, 2019). Tanısal araçlar, rastgele

değişkenlik ve sistemik arızalar arasında ayırım yaparak yönetim anlayışını geliştirmektedir. Dijital ortamlarda, tanısal analizler, nedensel çıkarımların doğruluğunu ve ayrıntı düzeyini artıran yüksek frekanslı ve yüksek çözünürlüklü verilerden yararlanmaktadır.

Öngörücü analiz, geçmiş verilere, makine öğrenimi modellerine ve gerçek zamanlı girdilere dayanarak gelecekteki olayların olasılığını tahmin ederek temelde geleceğe dönük bir boyut sunmaktadır. Tedarik zincirlerinde öngörücü modeller, talep dalgalanmalarını, stokların tükenmesini, nakliye gecikmelerini ve bakım planlaması için makine arızalarını öngörmektedir (Hyndman ve Athanasopoulos, 2018; Babiceanu ve Seker, 2016). Öngörücü analizler, işletmelerin kesintiler artmadan önce müdahale etmelerine olanak tanıyan bir düzeyde öngörülü kontrol sağlayarak, tepki verme hızını artırmakta ve operasyonel maliyetleri düşürmektedir.

Öngörücü analitik, birden fazla alternatif arasından en uygun eylemleri belirleyerek öngörücü yetenekleri genişletmektedir. Optimizasyon algoritmaları, simülasyon modelleri, takviyeli öğrenme ve dijital ikizler gibi araçlar kullanarak, öngörücü analitik farklı stratejilerin sonuçlarını değerlendirmektedir ve performans dengelerini gözetken kararlar önermektedir (Ivanov ve Dolgui, 2021). Örneğin, dijital ikizler çeşitli kesinti senaryoları altında tedarik zinciri davranışını simüle ederek yöneticilerin hızlandırılmış sevkியatların, emniyet stoğu ayarlamalarının veya tedarikçi değişikliklerinin etkisini değerlendirmelerine olanak tanımaktadır. Bu teknikler, maliyet, hizmet seviyesi ve risk azaltmanın aynı anda değerlendirilmesi gereken karmaşık ortamlarda karar kalitesine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır.

Analitik teknikler, işletmelerin talep dalgalanmaları, tedarikçi hataları, ulaşım tıkanıklıkları veya jeopolitik değişiklikleri içeren durumlarını keşfetmelerine olanak tanıyan senaryo modellemede de merkezi bir rol oynamaktadır. Kesintilerin ağ genelinde nasıl yayıldığını simüle ederek, senaryo modellemesi hazırlığını artırmakta ve acil durum planlarının geliştirilmesine bilgi sağlamaktadır. Güçlü öngörücü analitik yeteneklere sahip işletmeler, özellikle yüksek belirsizlik durumlarında daha fazla dayanıklılık ve uyum yeteneği göstermektedir (Longo, vd., 2019).

3.3. Veri Kalitesi ve Yönetimi

Analitik raporlamanın ve gerçek zamanlı izlemenin etkinliği, büyük ölçüde veri kalitesine bağlıdır. Doğru, tutarlı ve zamanında veriler, güvenilir KPI ölçümü ve güvenilir karar desteği için ön koşullardır. Ancak, tedarik zincirleri, genellikle uyumsuz veri formatları, eksik değerler, eşzamansız güncellemeler ve sistemler arasındaki tutarsızlıklar gibi zorluklarla karşı karşıyadır. Bu tutarsızlıklar KPI doğruluğunu zayıflatabilmekte, analitik modelleri bozabilmekte ve yanlış yönlendirilmiş yönetim kararlarına yol açabilmektedir (Hazen vd., 2014).

Veri doğruluğu, sensör ve sistem tarafından oluşturulan sürekli veri akışlarına dayanan OTIF, envanter görünürlüğü ve teslim süresi ölçümü gibi dijital KPI'lar için özellikle önemlidir. IoT cihazlarından gelen hatalı okumalar, barkod tarama hataları veya insan kaynaklı veri girişi hataları, analitik sistemler aracılığıyla yayılabilmekte ve yanlış sinyaller oluşturabilmektedir. Veri tutarlılığı da aynı derecede kritiktir, çünkü zamanında teslimat veya mevcut envanter gibi tutarsız tanımlar, departmanlar veya sistemler arasında çelişkili KPI sonuçlarına yol açabilmektedir (Kwon, vd., 2014). Bu nedenle işletmelerin, performans ölçütlerinin bütünlüğünü sağlamak için standartlaştırılmış tanımlara, otomatik doğrulama rutinlerine ve senkronize veri kanallarına yatırım yapmaları gerekmektedir.

Veri Yönetimi temel veri unsurlarının yönetiminde merkezi bir rol oynamaktadır. Ürün kodları, müşteri tanımlayıcıları, tedarikçi kayıtları ve envanter konumları için tutarlı ve kurum genelinde tanımlar oluşturularak KPI hesaplamalarının uyumlu veri kümelerinden yararlanmasını sağlanmaktadır (Otto, 2012). Araştırmalar, etkili veri yönetimin planlama hatalarını azalttığını, tedarikçi iş birliğini geliştirdiğini, tahmin ve maliyet analizlerinin doğruluğunu artırdığını göstermektedir (Ramanathan, vd., 2017). Veri yönetimi olmadan, en gelişmiş analitik sistemler bile değerlerini tehlikeye atan yapısal tutarsızlıklara karşı savunmasızdır.

Veri kalitesinin ötesinde, tedarik zincirleri sistemleri ayrıca, entegrasyonu, siber güvenlik tehditleriyle ilgili güvenilirlik riskleriyle de karşı karşıyadır. Sistem arızaları veya veri entegrasyonundaki gecikmeler, gösterge panolarının ve kontrol kulelerinin güncel olmayan bilgiler görüntülenmesine ve

bu da kararların gecikmesine veya yanlış alınmasına yol açabilmektedir. Tahmin algoritmaları, eksik veya dengesiz veri kümeleri üzerinde eğitildiklerinde önyargılı sonuçlar üretebilmekte ve tedarikçi risklerini veya talep modellerini yanlış yansıtabilmektedir. Bu arada, siber güvenlik ihlalleri veri bütünlüğü ve operasyonların sürekliliği için ciddi riskler oluşturmaktadır. Tedarik zincirleri, veri yönetimi rolleri, periyodik denetimler, izlenebilirlik protokolleri, anormallik tespit sistemleri, veri doğruluğunu ve güvenilirliğini koruyan güvenlik standartlarını içeren sağlam veri yönetim çerçeveleri uygulamaktadır (Wamba vd., 2015; Talluri ve Scherer, 2021).

4. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ÖLÇÜTLERİ VE YEŞİL LOJİSTİK GÖSTERGELERİ

Sürdürülebilirlik, tedarik zinciri performans ölçümünün temel bir unsurudur. Çevresel bozulma, iklim riskleri, düzenleyici baskılar ve artan toplumsal beklentiler, işletmeleri tedarik zincirlerini yalnızca ekonomik verimlilik açısından değil, aynı zamanda ekolojik ve sosyal sorumluluk açısından da değerlendirmeye zorlamaktadır (Seuring ve Müller, 2008). Maliyet, hız ve güvenilirliğe odaklanan geleneksel operasyonel KPI'lar, küresel tedarikçi ağlarındaki kaynak tüketimi, emisyonlar, atık üretimi veya çalışma koşulları hakkında sınırlı bilgi sağlamaktadır. Sürdürülebilirlik kurumsal stratejiye daha fazla yerleştikçe, performans sistemleri giderek daha fazla yeşil lojistik göstergelerini, karbon muhasebesi çerçevelerini ve tedarik zinciri faaliyetlerinin daha geniş kapsamlı sonuçlarını ortaya koyan ESG odaklı ölçümleri içermektedir (Brandenburg vd., 2014).

Dijital teknolojiler bu dönüşümde kritik bir kolaylaştırıcı rol oynamaktadır. IoT sensörleri, GPS telematiği, blok zinciri ve gelişmiş analitikler, enerji tüketimi, emisyon yörüngeleri, tersine lojistik akışları ve tedarikçi uygulamaları hakkında benzeri görülmemiş bir görünürlük sağlamaktadır. Bu araçlar, kuruluşların sürdürülebilirlik ölçütlerini her zamankinden daha yüksek hassasiyet, sıklık ve ayrıntı düzeyiyle ölçmelerine olanak tanımaktadır (Kumar vd., 2021). Genellikle tahminlere veya periyodik denetimlere dayanan önceki yaklaşımların aksine, dijital sürdürülebilirlik ölçüm sistemleri gerçek zamanlı verileri entegre ederek çok katmanlı tedarik zincirlerinde izlenebilirliği ve hesap verebilirliği artırmaktadır.

4.1. Karbon ve Enerji Ölçümleri

Sürdürülebilir tedarik zinciri yönetiminde en yaygın kullanılan göstergelerden biri karbon emisyonlarıdır, özellikle sevkiyat başına CO₂ emisyonlarıdır. Bu ölçüm, genellikle yakıt tüketimi, kat edilen mesafe, araç yük faktörü ve modal özellikler gibi parametreler kullanılarak hesaplanan nakliye ve lojistik faaliyetleri sırasında üretilen sera gazlarını değerlendirmektedir (McKinnon, 2018). Dijital ortamlarda, emisyon tahminleri, sürekli ve oldukça ayrıntılı veriler sağlayan telematik sistemler, araç üstü sensörler, GPS izleme cihazları ve motor teşhis yazılımları aracılığıyla önemli ölçüde geliştirilmiştir (Carvalho vd., 2020). Bu sistemler, kuruluşların verimsiz sürüş davranışlarını, optimum olmayan rota kararlarını, aşırı rölantiye neden olan darboğazları ve az kullanılan kapasiteyi belirlemesini sağlamaktadır.

Ton-kilometre başına enerji tüketimi, ulaşım verimliliğini sürdürülebilirlikle ilişkilendiren bir diğer temel göstergedir. Bu metrik, belirli bir ağırlıktaki malın belirli bir mesafe boyunca taşınması için gereken enerji miktarını yansıtmakta ve enerji yoğunluğundaki modsal farklılıkları vurguladığı için yalnızca emisyonlardan daha ayrıntılı bir bakış açısı sunmaktadır (McKinnon ve Piecyk, 2010). Dijital izleme sistemleri, yakıt sensörlerinden, motor platformlarından ve filo yönetim sistemlerinden veri toplayarak, işletmelerin enerji performansını rotalar, taşıyıcılar ve araç türleri arasında karşılaştırmasına olanak tanımaktadır. Bu düzeydeki görünürlük, kuruluşların karayolundan demiryoluna geçiş veya intermodal konfigürasyonları optimize etme gibi modsal ikame stratejilerini değerlendirmelerine ve böylece genel çevresel ayak izlerini azaltmalarına olanak tanımaktadır.

Enerji ölçümleri ile ilgili bir gösterge olan yakıt verimliliği hem çevresel hem de ekonomik performans hakkında işletmelere fikir vermektedir. Yakıt verimliliği ölçümleri genellikle teslimat başına, kilometre başına veya taşınan mal birimi başına yakıt tüketimini ölçmektedir. Verimsiz yakıt kullanımı, yetersiz araç bakımı, uygunsuz hız kalıpları, aşırı rölantide çalışma veya düşük yük faktörleri gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır (Demir, vd., 2014). IoT destekli telematik sayesinde firmalar, araç performansını sürekli olarak izleyebilir, gerçek zamanlı trafik koşullarına göre rota kararlarını optimize

edebilir ve bakım ihtiyaçlarını gösteren anormallikleri tespit edebilir. Bu nedenle yakıt verimliliği iyileştirmeleri, emisyon azaltma hedeflerini desteklerken aynı zamanda daha düşük operasyonel maliyetlere doğrudan katkıda bulunmaktadır.

Karbon ve enerji ölçümleri, lojistik operasyonlarının çevresel performansını değerlendirmek için temel bir temel oluşturmaktadır. İşletmelerin emisyon yoğunluğunu ölçmelerine, daha çevre dostu rotalar tasarlamalarına, filo kullanımını optimize etmelerine ve düşük karbonlu ulaşım stratejileri izlemelerine olanak tanımaktadır. Artan düzenleyici denetimler ve yatırımcı beklentileriyle birlikte, titiz karbon ve enerji izleme, çağdaş tedarik zinciri yönetiminde vazgeçilmez hale gelmiştir.

4.2. Döngüsellik, Tersine Lojistik ve Atık Ölçümleri

Tedarik zincirleri doğrusal "al-yap-at" modellerinden döngüsel ekonomi paradigmalarına doğru geçiş yaparken, döngüsellik ve atıkla ilgili ölçütler stratejik önem kazanmıştır. Döngüsellik ölçümü, malzemelerin yeniden kullanılma, onarılma, geri dönüştürülme veya geri kazanılma verimliliğini değerlendirerek, ham kaynaklara olan ihtiyacı azaltmakta ve çevresel dışsallıkları en aza indirmektedir (Geissdoerfer vd., 2017).

Tersine lojistik performansı, kuruluşların iade edilen ürün, atık malzeme ve kullanım ömrü dolmuş bileşen akışlarını kaynak açısından verimli bir şekilde yönetmeye çalıştığı bu süreçte kilit bir rol oynamaktadır. İade oranları, tersine lojistikte temel bir göstergedir. Yüksek iade oranları, hatalı sevkiyatlar, kötü ürün tasarımı, yanlış tahminler veya karşılanmayan müşteri beklentileri gibi operasyonel veya kalite sorunlarına işaret etse de, aynı zamanda döngüsel ekonomi stratejilerini mümkün kılan geri kazanım, yenileme veya geri dönüşüm faaliyetlerinin de temelini oluşturmaktadır (Rogers ve Tibben-Lembke, 1999). Dijital izleme teknolojileri, gerçek zamanlı iade mal yetkilendirme sistemleri, IoT özellikli ürün etiketleme ve bulut tabanlı iade yönetim platformları aracılığıyla iadelerin ölçülebilirliğini ve sınıflandırılmasını artırmaktadır. Bu özellikler, kuruluşların iadelerin yapısal nedenlerini belirlemelerine ve iade edilen malları yeniden satış, onarım veya geri dönüşüm gibi uygun alt süreçlere tahsis etmelerine yardımcı olmaktadır.

Geri dönüşüm ve geri kazanım oranları, malzeme veya bileşenlerin atık akışlarından ne ölçüde uzaklaştırılıp yeniden kullanılabilir kaynaklara dönüştürülebileceği konusunda fikir vermektedir. Bu ölçütler, kapalı devre tedarik zincirlerinin çevresel performansını değerlendirmek ve genişletilmiş üretici sorumluluğu düzenlemelerine uyum sağlamak için kritik öneme sahiptir. RFID, bilgisayarlı görme sistemleri ve blok zinciri gibi teknolojiler, geri dönüşüm süreçlerine giren malzemelerin kaynağını ve durumunu doğrulayarak şeffaflığı artırmaktadır (Manninen vd., 2018). Sonuç olarak, işletmeler malzeme geri kazanımının verimliliğini daha doğru bir şekilde izlemekte, geri dönüşüm akışlarındaki kontaminasyonu azaltmakta ve raporlama güvenilirliğini güçlendirmektedir.

Ambalaj sürdürülebilirliği, atık yönetiminin bir diğer kritik boyutunu temsil etmektedir. Ambalajla ilgili göstergeler, malzemelerin geri dönüştürülebilirliğini, sevkiyat birimi başına kullanılan ambalaj miktarını ve ambalaj tasarımının çevresel etkisini incelemektedir (Pålsson, vd., 2017). Otomatik boyutlandırma sistemleri ve malzeme takip sensörleri gibi dijital ölçüm araçları, işletmelerin hafif ambalaj, azaltılmış malzeme kullanımı, küp optimizasyonu ve biyolojik olarak parçalanabilir veya yenilenebilir malzemelerin benimsenmesi için fırsatları belirlemelerine yardımcı olmaktadır. Ambalaj atıkları, özellikle e-ticarette, toplam çevresel etkinin önemli bir bölümünü oluşturduğundan, doğru ve sürekli ölçüm hayati önem taşımaktadır (Bilgin, 2012).

Atık ölçümlerinde, atık-çöp sahası oranları, geri dönüştürülmek, kompostlanmak veya yeniden kullanılmak yerine nihayetinde çöp sahalarına ulaşan operasyonel atık miktarını ölçmektedir. Bu ölçüt, bir kuruluşun sürdürülebilir atık yönetimi uygulamalarını uygulamadaki başarısının üst düzey bir göstergesi olarak hizmet etmektedir (Giannakis ve Papadopoulos, 2016). Dijital sistemler, farklı noktalardaki atık hacimlerini belirlemek, atık sınıflandırmasını otomatikleştirmek ve bertaraf kanallarını izlemek için IoT sensörlerini kullanarak atık izlemeyi iyileştirmektedir. Bu teknolojiler, işletmelerin sıfır atık çöp sahası hedeflerine doğru ilerlemesini ve atık yönetimi uygulamalarını daha geniş sürdürülebilirlik stratejilerine entegre etmesini mümkün kılmaktadır.

4.3. ESG Odaklı Tedarik Zinciri Ölçümleri

Çevresel, Sosyal ve Yönetişim (ESG) standartları, etik davranış, sosyal refah ve şeffaf yönetim uygulamalarına vurgu yaparak tedarik zinciri performans ölçümünün kapsamını genişletmiştir. Özellikle birden fazla kademeyi ve gelişmekte olan ekonomileri kapsayan tedarik zincirleri, çevresel uyumluluk, çalışma koşulları ve etik kaynak kullanımı konusunda daha yoğun bir incelemeye tabi tutulmaktadır (Eccles ve Klimenko, 2019). Bu nedenle, ESG odaklı tedarik zinciri ölçümleri, tedarikçilerin ne kadar sorumlu bir şekilde faaliyet gösterdiğini, malzemelerin ne kadar şeffaf bir şekilde tedarik edildiğini ve çevresel bozulma veya insan hakları ihlalleriyle ilgili risklerin ne kadar etkili bir şekilde azaltıldığını değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

Tedarikçi denetimleri ve uyumluluk ölçütleri, tedarik zinciri genelinde çevresel ve etik performansın değerlendirilmesinde merkezi bir rol oynamaktadır. İşletmeler, tedarikçilerin çevre standartlarına, iş güvenliği gerekliliklerine, işçi haklarına ve sektöre özgü protokoller gibi sertifikalara uyumunu değerlendirmek için giderek daha fazla denetim gerçekleştirmektedir (Huq, vd., 2014). Dijital tedarikçi yönetim platformları, denetim planlamasını otomatikleştirerek, kanıt toplayarak ve düzeltici eylem planlarını entegre ederek bu süreci kolaylaştırmaktadır. Bu araçlar ayrıca, genellikle gizli veya aralıklı ihlalleri tespit edemeyen periyodik denetimlere güvenmek yerine sürekli izlemeyi de desteklemektedir.

Çalışma koşulları ölçümleri, sosyal sürdürülebilirliğin kritik bir boyutunu ele almaktadır. İşçi yaralanma oranları, fazla mesai ihlalleri, asgari ücrete uyum ve zorla veya çocuk işçi çalıştırma gibi göstergeler, işletmelerin yukarı akış operasyonlarıyla ilişkili sosyal riskleri değerlendirmelerine yardımcı olmaktadır (New, 2015). Çalışma koşullarının izlenmesi, şeffaflığın ve taşeronluğun gerçek çalışma koşullarını gizleyebileceği çok kademeli tedarik zincirlerinde özellikle zordur. Dijital çalışan ses platformları, mobil raporlama araçları ve blok zinciri destekli doğrulama mekanizmaları, tedarikçi tesislerindeki çalışma koşullarının doğrudan ve doğrulanabilir hesaplarını sağlayarak şeffaflığı artırmaktadır (LeBaron, vd., 2022).

İzlenebilirlik ve şeffaflık, yönetimle ilgili temel ölçütler olarak ortaya çıkmıştır. Bu göstergeler, kuruluşların malzemelerin kaynağını belirleme,

bunları birden fazla üretim aşamasında takip etme ve tedarikçi beyanlarını doğrulama derecesini ölçmektedir. Blockchain teknolojisi, değiştirilemez işlem kayıtları oluşturarak ve verilerin geriye dönük olarak değiştirilememesini sağlayarak bu yetenekleri güçlendirmektedir (Saberî vd., 2019). Dolayısıyla izlenebilirlik ölçütleri yalnızca sürdürülebilirlik raporlamasına değil, aynı zamanda tedarik risk yönetimine ve tedarik zinciri dayanıklılığına da katkıda bulunmaktadır.

ESG odaklı metrikler, toplu olarak, sürdürülebilir tedarik zinciri performansının çevresel sonuçlardan çok daha fazlasını kapsadığı anlayışını pekiştirmekte; küresel tedarik zincirlerinin faaliyet gösterdiği etik, sosyal ve yönetim temellerini yansıtmaktadır. ESG izlemenin dijitalleştirilmesi, daha fazla şeffaflık, hesap verebilirlik ve güvenilirlik sağlayarak kuruluşların paydaş beklentilerini karşılama ve küresel tedarik yapılarına yerleşmiş sistemik riskleri azaltmasını sağlamaktadır.

5. ENTEGRE KPI YAPISI

Tedarik zinciri performans yönetimi, operasyonel, taktiksel ve stratejik hedefleri tutarlı bir ölçüm mimarisi içinde hizalayan entegre bir KPI çerçevesi gerektirmektedir. Tedarik zincirleri giderek daha karmaşık ve dijital olarak birbirine bağlı hale geldikçe, izole ölçümler veya işleve özgü göstergeler, performans sonuçlarını şekillendiren sistem genelindeki etkileşimleri yakalamak için yetersiz kalmaktadır. Bunun yerine, işletmeler günlük operasyonel faaliyetleri daha geniş iş hedefleriyle ilişkilendiren, çok boyutlu performans perspektiflerini içeren ve maliyet, hizmet seviyesi, dayanıklılık ve sürdürülebilirlik arasındaki dinamik etkileşimi yansıtan yapılandırılmış bir çerçeve benimsemelidir (Gunasekaran, vd., 2004). Entegre KPI çerçeveleri, göstergeleri hiyerarşik katmanlara ayırarak, finansal ve finansal olmayan öncelikleri dengeleyerek ve ölçüm uygulamalarını yaygın olarak kabul görmüş tedarik zinciri referans modellerine dayandırarak bu uyumu sağlamaktadır.

Stratejik, taktiksel ve operasyonel düzeylerdeki KPI'ların hiyerarşik yapılandırılması, entegre performans ölçümünün temelini oluşturmaktadır. Stratejik KPI'lar uzun vadeli hedefleri yansıtmakta ve tedarik zincirinin rekabet avantajına, pazar büyümesine ve kurumsal sürdürülebilirlik taahhütlerine ne kadar etkili katkıda bulunduğunu iletmektedir (Mason-Jones ve Towill, 1998).

Genel tedarik zinciri maliyeti, kusursuz sipariş karşılama, toplam karbon ayak izi ve tedarik zinciri dayanıklılığı gibi bu göstergeler, uçtan uca performans hakkında üst düzey bir bakış açısı sağlamaktadır. Taktiksel KPI'lar, bu stratejik öncelikleri planlama, kaynak sağlama, üretim ve envanter yönetimiyle ilgili işlevsel hedeflere dönüştürür. Tahmin doğruluğu, tedarikçi güvenilirliği, zamanlamaya uyum ve envanter devir hızı gibi ölçütler, tedarik zinciri performansının değerlendirilmesine, işlevler arası koordinasyonun ve kaynak tahsisinin yönlendirilmesine yardımcı olmaktadır (Thomé vd., 2014). Operasyonel KPI'lar ise depolar, fabrikalar ve ulaşım ağlarındaki günlük faaliyetlerin yürütülmesini ölçmektedir. Toplama doğruluğu, rıhtımdan stoğa döngü süresi, üretim döngüsü süresi ve günlük sipariş karşılama oranları gibi göstergeler, kısa vadeli değişiklikleri yakalamakta ve anında düzeltici eylemleri desteklemektedir. Bu üç katman arasındaki uyum, operasyonel düzeydeki iyileştirmelerin taktik performansı anlamlı bir şekilde güçlendirmesini ve nihayetinde stratejik sonuçlara katkıda bulunmasını sağlamaktadır.

Hiyerarşik uyuma ek olarak, Dengeli Puan Kartı çerçevesi, tedarik zinciri performansını değerlendirmek için bütünsel bir mercek sağlamaktadır. Başlangıçta Kaplan ve Norton (1996) tarafından geliştirilen Dengeli Puan Kartı, müşteri, iç süreç, öğrenme ve büyüme perspektiflerini entegre ederek performans değerlendirmesini salt finansal sonuçların ötesine genişletir. Tedarik zinciri yönetimine uygulanan Dengeli Puan Kartı çerçevesi, finansal performansın yüksek müşteri hizmetleri seviyeleri, güvenilir ve verimli iç süreçler (örneğin, teslim süresi değişkenliği, kusur oranları) ve sürekli iyileştirme ve inovasyon yetenekleri tarafından desteklenmesi gerektiğini vurgulamaktadır (Brewer ve Speh, 2000). Öğrenme ve büyüme perspektifi, özellikle performansın büyük ölçüde teknolojik hazır bulunuşluğa, veri yönetişimi olgunluğuna, iş gücü becerilerine ve analitik yeteneklere bağlı olduğu dijital tedarik zincirlerinde önem kazanmıştır (Schoenherr ve Speier-Pero, 2015). Bu perspektifleri dengeleyerek Dengeli Puan Kartı, işletmelerin hizmet kalitesi, dayanıklılık veya dijital yetenek oluşturma pahasına maliyet verimliliğini aşırı vurgulamasını önlemektedir.

Dengeli Puan Kartının ötesinde, Tedarik Zinciri Operasyonları Referans (SCOR) modeli, KPI geliştirmeye yapı ve standardizasyon getiren küresel olarak tanınan bir performans ve süreç çerçevesi olarak hizmet etmektedir.

SCOR, tedarik zinciri faaliyetlerini beş temel sürece (Planlama, Kaynak, Üretim, Teslimat ve İade) ayırmakta ve her birini güvenilirlik, yanıt verme, çeviklik, maliyet ve varlık yönetimi boyutlarında bir dizi standartlaştırılmış KPI ile ilişkilendirmektedir (Huan, vd., 2004). Güvenilirlik, kusursuz sipariş karşılama ve tedarikçi teslimat performansı; yanıt verme, sipariş çevrim süresi; çeviklik, esneklik ve uyarlanabilirlik ölçümleri; maliyet, toplam tedarik zinciri yönetimi maliyeti ve varlık performansı, tedarik ve kapasite kullanım günlerinin envanteri gibi göstergelerle değerlendirilmektedir. SCOR çerçevesi, sektörler arası kıyaslama olanağı sağlar, kurumlar arası uyumu kolaylaştırmakta ve tedarik zinciri performansını değerlendirmek için ortak bir sözlük sunmaktadır (APQC, 2020). Tedarik zincirleri giderek daha fazla dijital ve sürdürülebilirlik hususlarını bünyesine kattıkça, SCOR'un uzantıları izlenebilirlik, karbon emisyonları ve dairesellik ile ilgili KPI'ları entegre etmiştir.

Entegre KPI çerçevelerinin kritik bir bileşeni, tedarik zinciri sistemlerinin davranışını karakterize eden neden-sonuç bağlantılarının anlaşılmasıdır. Performans göstergeleri nadiren bağımsız olarak çalışmakta; bunun yerine, uzlaşmalar ve geri bildirim döngüleriyle işaretlenmiş karmaşık ilişkiler içinde yer almaktadır. Artan envanter seviyeleri hizmet seviyelerini iyileştirebilir, ancak aynı zamanda elde tutma maliyetlerini ve çevresel etkiyi de artırabilir. Benzer şekilde, agresif maliyet azaltma girişimleri tedarikçi yedekliliğini azaltabilir ve böylece kesintilere karşı dayanıklılığı zayıflatır (Mak ve Shen, 2021). Tersine, daha yüksek tedarikçi güvenilirliği, teslim süresi değişkenliğini azaltır, bu da güvenlik stoğu gereksinimlerini düşürür ve işletme sermayesi verimliliğini artırır. Literatürde kapsamlı bir şekilde belgelenen kırbaç etkisi, bir aşamadaki bilgi çarpıtmasının sonraki aşamalarındaki değişkenliği nasıl artırabileceğini ve yalnızca sonuçları değil, aynı zamanda performansın altında yatan itici güçleri de ölçen KPI'lara olan ihtiyacı nasıl güçlendirebileceğini göstermektedir (Lee, vd., 1997). Bu karşılıklı bağımlılıkları belirleyerek, entegre KPI çerçeveleri daha bilinçli karar almayı desteklemekte ve işletmelerin ayrı ayrı ölçümleri optimize etmekten kaynaklanan istenmeyen sonuçlardan kaçınmasına yardımcı olmaktadır.

Dijital tedarik zinciri teknolojileri, gerçek zamanlı ölçüm, otomatik geri bildirim döngüleri ve gelişmiş senaryo modellemesi sağlayarak entegre KPI

çerçevelerinin etkinliğini önemli ölçüde artırmaktadır. ERP, WMS, TMS ve MES sistemleri arasında veri entegrasyonu sayesinde işletmeler, toplama hataları, nakliye gecikmeleri veya makine arızaları gibi operasyonel dalgalanmaların taktik ve stratejik metrikleri nasıl etkilediğini haftalar yerine saatler içinde gözlemleyebilir hale gelmektedir. Öngörücü analizler ve dijital ikizler, kaynak stratejilerindeki, envanter politikalarındaki veya ağ tasarımıdaki değişikliklerin maliyet, hizmet ve sürdürülebilirlik boyutlarındaki performansı nasıl etkileyeceğini simüle ederek bu yeteneği genişletmektedir (Ivanov ve Dolgui, 2021). Böylece, dijital araçlar neden-sonuç öğrenmesini KPI sistemine yerleştirerek kuruluşların ödünleşimleri öngörmelerine, alternatif politikaları değerlendirmelerine ve dengeli bir performans elde etmelerine olanak tanımaktadır.

Genel olarak, entegre bir KPI çerçevesi, tedarik zincirlerini yönetmek için gereken yapısal tutarlılığı sağlamaktadır. Hiyerarşik KPI katmanlarını hizalayarak, çok boyutlu performans perspektiflerini birleştirerek, standartlaştırılmış referans modellerinden yararlanarak ve metrikler arasındaki nedensel ilişkileri fark ederek, kuruluşlar hem kapsamlı hem de uyarlanabilir performans yönetim sistemleri oluşturabilirler. Bu çerçeveler, günlük faaliyetlerin uzun vadeli stratejik hedeflere katkıda bulunmasını, veriye dayalı içgörülerin bilinçli kararları desteklemesini ve ekonomik performansın dayanıklılık ve sürdürülebilirlik taahhütleriyle uyumlu bir şekilde yürütülmesini sağlamaktadır.

6. SONUÇ

Tedarik zinciri performans yönetiminin son yıllardaki dönüşümü, dijitalleşme, küreselleşme ve sürdürülebilirlik zorunluluklarının çağdaş operasyonlar üzerindeki derin etkisini yansıtmaktadır. Tedarik zincirleri doğrusal, işlevsel olarak bölümlere ayrılmış yapılardan dinamik ve birbirine bağlı dijital ekosistemlere doğru evrildikçe, geleneksel performans ölçüm yaklaşımları giderek yetersiz kalmaktadır. Dijital KPI'lara geçiş, işletmelerin neyi ölçtüğünün, nasıl ölçtüğünün ve içgörülerin eyleme ne kadar hızlı dönüştüğünün kapsamını genişletmiştir. Gerçek zamanlı veri toplama, algoritmik analitik, entegre bilgi sistemleri ve IoT destekli algılama teknolojileriyle desteklenen dijital göstergeler, operasyonel süreçlere eş

benzeri görülmemiş bir görünürlük düzeyi sağlayarak, kesintilerin daha erken tespit edilmesini, daha doğru tahminler yapılmasını ve daha etkili kaynak tahsisini mümkün kılmaktadır. Bu değişimle birlikte tedarik zinciri performans ölçümü, geriye dönük raporlamadan öngörülü ve sürekli yönetime geçmiştir.

Analitik raporlama ve gerçek zamanlı izleme, ham verileri anlamlı istihbarata dönüştürerek modern tedarik zincirinin bilişsel altyapısını oluşturmaktadır. Panolar ve kontrol kuleleri, yöneticilerin karmaşık veri ortamlarını yorumlama, performans sapmalarını belirleme ve alternatif yanıtları değerlendirme kapasitelerini artırmaktadır. Öngörücü ve tanımlayıcı analitik, performans yönetimini betimsel gözlemin ötesine taşıyarak kuruluşların riskleri öngörmelerini, kesinti senaryolarını modellemelerini ve belirsizlik altında kararları optimize etmelerini sağlamaktadır. Bu araçlar, duyarlılığı, dayanıklılığı ve bilinçli karar almayı teşvik ettikleri için oynaklığın hakim olduğu tedarik zincirlerinde vazgeçilmezdir. Etkili veri yönetişimi, tüm performans metriklerinin temelini oluşturan verilerin doğruluğunu, bütünlüğünü ve tutarlılığını sağlayarak bu yetenekleri daha da güçlendirmektedir.

Sürdürülebilirlik ölçütleri, işletmeler artan düzenleyici baskılar, çevresel zorluklar ve paydaşların sorumlu iş yapma beklentileriyle karşı karşıya kaldıkça, tedarik zinciri performans sistemlerinin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Karbon ve enerji göstergeleri, lojistik faaliyetlerinin çevresel ayak izine dair hayati bilgiler sağlarken, döngüsellik, tersine lojistik ve atık ölçütleri kaynak açısından verimli, rejeneratif endüstriyel sistemlere geçişi yansıtmaktadır. ESG odaklı ölçütler, performans değerlendirmesini tedarikçi uyumluluğu, çalışma koşulları, etik kaynak kullanımı ve çok katmanlı ağlarda şeffaflığı da kapsayacak şekilde genişletmektedir. Telematik, blok zinciri ve IoT destekli izleme gibi dijital teknolojiler, sürdürülebilirlik performans raporlamasının ölçülebilirliğini, doğrulanabilirliğini ve güvenilirliğini büyük ölçüde artırmaktadır. Çevresel ve sosyal boyutların performans sistemlerine entegrasyonu sayesinde, kuruluşlar operasyonel mükemmelliği uzun vadeli sürdürülebilirlik taahhütleriyle uyumlu hale getirmek için daha donanımlı hale gelmektedir.

Entegre KPI çerçeveleri, genişletilmiş performans ortamına tutarlılık getiren yapısal temeli sağlamaktadır. Stratejik, taktiksel ve operasyonel KPI'ları uyumlu hale getirerek; Dengeli Puan Kartı gibi çerçeveler aracılığıyla finansal ve finansal olmayan bakış açılarını dengeleyerek; ve ölçüm uygulamalarını SCOR gibi standartlaştırılmış referans modellerine dayandırarak, işletmeler kapsamlı, koordineli ve stratejik olarak uyumlu performans sistemleri oluşturmaktadır. KPI'lar arasındaki neden-sonuç bağlantılarını anlamak, optimizasyon çalışmalarının sistem genelindeki ödünleşimleri ve sinerjileri yansıtmayı sağlayarak, bir alandaki iyileştirmelerin yanlılıkla başka bir alandaki performansı düşürmesini önler. Dijital teknolojiler, gerçek zamanlı ölçüm ve simülasyona dayalı öğrenmeyi mümkün kılarak bu çerçeveleri güçlendirmekte ve böylece proaktif yönetimi ve uzun vadeli çevikliği desteklemektedir.

Genel olarak, dijital KPI'ların, analitik raporlamanın ve sürdürülebilirlik metriklerinin entegrasyonu, çok boyutlu, veri odaklı ve etik temelli tedarik zinciri performans yönetimine doğru bir paradigma değişimini yansıtmaktadır. Bu entegre yaklaşımı benimseyen kuruluşlar, dayanıklılığı artırmak, çevresel etkiyi azaltmak, tedarikçi hesap verebilirliğini güçlendirmek ve müşterilere ve paydaşlara üstün değer sunmak için daha iyi bir konumdadır. Tedarik zincirleri dijitalleşmeye ve düzenleyici ve toplumsal beklentiler gelişmeye devam ettikçe, gelecekteki KPI sistemleri giderek artan bir şekilde dairesellik, insan-makine iş birliği, dijital olgunluk ve sistemik riske maruz kalma ile ilgili metrikleri içerecektir. Dijital zekâ ve sürdürülebilirlik hususlarının sürekli bir araya gelmesi, yeni nesil performans yönetimini tanımlayacak ve tedarik zincirlerinin belirsiz bir küresel ortamda yalnızca daha verimli ve şeffaf değil, aynı zamanda daha sorumlu ve uyumlu bir şekilde faaliyet göstermesini sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- APQC. (2020). Supply Chain Management Process Classification Framework. APQC. <https://www.apqc.org>
- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2017). Understanding the Internet of Things: Definition, potentials, and societal role of a fast evolving paradigm. *Ad Hoc Networks*, 56, 122–140.
- Babai, M. Z., Syntetos, A., Teunter, R., & Gardiner, S. (2020). Forecasting and inventory management of spare parts: An overview. *Journal of the Operational Research Society*, 71(6), 827–846.
- Babiceanu, R. F., & Seker, R. (2016). Big Data and virtualization for manufacturing cyber-physical systems: A survey of the current status and future outlook. *Computers in Industry*, 81, 128–137.
- Beamon, B. M. (1999). Measuring supply chain performance. *International Journal of Operations & Production Management*, 19(3), 275–292.
- Ben-Daya, M., Hassini, E., & Bahroun, Z. (2019). Internet of Things and supply chain management: A literature review. *International Journal of Production Research*, 57(15–16), 4719–4742.
- Bilgin, E. (2012). Tersine lojistik ağı tasarımı: Geri dönüşüm alanında bir uygulama (Yüksek lisans tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Bode, C., & Wagner, S. M. (2015). Structural drivers of upstream supply chain complexity and the frequency of supply chain disruptions. *Journal of Operations Management*, 36, 215–228.
- Brandenburg, M., Govindan, K., Sarkis, J., & Seuring, S. (2014). Quantitative models for sustainable supply chain management: Developments and directions. *European Journal of Operational Research*, 233(2), 299–312.
- Brewer, P. C., & Speh, T. W. (2000). Using the balanced scorecard to measure supply chain performance. *Journal of Business Logistics*, 21(1), 75–93.

- Caridi, M., Crippa, L., Perego, A., Sianesi, A., & Tumino, A. (2014). Do virtuality and complexity affect supply chain visibility? *International Journal of Production Economics*, 148, 46–58.
- Carvalho, T. P., Soares, F. A., Vita, R., Francisco, R. P., & Basto, J. P. (2020). A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 150, 106889.
- Christopher, M. (2016). *Logistics & supply chain management* (5th ed.). Pearson.
- Christopher, M., & Peck, H. (2004). Building the resilient supply chain. *The International Journal of Logistics Management*, 15(2), 1–14.
- Delen, D., & Demirkan, H. (2013). Data, information and analytics as services. *Decision Support Systems*, 55(1), 359–363.
- Demir, E., Bektaş, T., & Laporte, G. (2014). A review of recent research on green road freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 237(3), 775–793.
- Eccles, R. G., & Klimenko, S. (2019). The investor revolution. *Harvard Business Review*, 97(3), 106–116.
- Few, S. (2006). *Information dashboard design: The effective visual communication of data*. O'Reilly Media.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy: A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768.
- Giannakis, M., & Papadopoulos, T. (2016). Supply chain sustainability: A risk management approach. *International Journal of Production Economics*, 171, 455–470.
- Gunasekaran, A., Patel, C., & McGaughey, R. (2004). A framework for supply chain performance measurement. *International Journal of Production Economics*, 87(3), 333–347.

- Gunasekaran, A., Patel, C., & Tirtiroglu, E. (2001). Performance measures and metrics in a supply chain environment. *International Journal of Operations & Production Management*, 21(1/2), 71–87.
- Hazen, B. T., Boone, C. A., Ezell, J. D., & Jones-Farmer, L. A. (2014). Data quality for data science, predictive analytics, and big data in supply chain management. *International Journal of Production Economics*, 154, 72–80.
- Hofmann, E., Samp, C., & Schoensleben, P. (2021). Supply chain control towers: Conceptualization, implementation, and impact. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 27(3), 100694.
- Huan, S. H., Sheoran, S. K., & Wang, G. (2004). A review and analysis of supply chain operations reference (SCOR) model. *Supply Chain Management: An International Journal*, 9(1), 23–29.
- Huq, F. A., Stevenson, M., & Zorzini, M. (2014). Social sustainability in supply chains: Drivers and barriers. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 20(4), 213–226.
- Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2018). *Forecasting: Principles and practice* (2nd ed.). OTexts.
- Ivanov, D. (2021). Supply chain viability and the COVID-19 pandemic: A conceptual and formal generalization of four major adaptation strategies. *International Journal of Production Research*, 59(12), 3535–3552.
- Ivanov, D., & Dolgui, A. (2020). A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience. *International Journal of Production Research*, 58(15), 4321–4344.
- Ivanov, D., & Dolgui, A. (2021). OR-methods for coping with the ripple effect in supply chains during COVID-19 pandemic: Managerial insights and research implications. *Omega*, 105, 102489.

- Kache, F., & Seuring, S. (2017). Challenges and opportunities of digital information at the supply chain. *International Journal of Operations & Production Management*, 37(1), 18–41.
- Kaplan, R. S., & Norton, D. P. (1996). *The Balanced Scorecard: Translating strategy into action*. Harvard Business School Press.
- Kumar, A., Singh, R. K., & Modak, N. (2021). An integrated framework for sustainability performance measurement systems: A review and future directions. *Journal of Cleaner Production*, 310, 127503.
- Kwon, I. W., Lee, S. R., & Shin, H. (2014). Data quality management, data usage experience, and acquisition intention of big data analytics. *International Journal of Information Management*, 34(3), 387–394.
- Lee, H. L., Padmanabhan, V., & Whang, S. (1997). Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect. *Management Science*, 43(4), 546–558.
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2014). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23.
- LeBaron, G., Kyriacou, S., & Adler, J. P. (2022). The transparency–accountability–legitimacy chain in global supply chains. *Governance*, 35(2), 393–413.
- Longo, F., Nicoletti, L., & Padovano, A. (2019). Smart operators in industry 4.0: A human-centered approach to enhance operators' capabilities and improve performance. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 105–111.
- Mak, H. Y., & Shen, Z. J. (2021). Infrastructure design for supply chain resilience. *Production and Operations Management*, 30(6), 1705–1725.
- Manninen, K., Koskela, S., Antikainen, M., Bocken, N., Dahlbo, H., & Aminoff, A. (2018). Do circular economy business models capture value? A case study. *Journal of Cleaner Production*, 171, 413–422.

- Mason-Jones, R., & Towill, D. R. (1998). Shrinking the supply chain uncertainty circle. *Journal of Supply Chain Management*, 34(3), 26–32.
- McKinnon, A. (2018). Decarbonizing logistics: Distributing goods in a low carbon world. Kogan Page.
- McKinnon, A., & Piecyk, M. (2010). Measuring and managing co₂ emissions of European chemical transport. *Journal of Business Logistics*, 31(1), 51–73.
- Melnyk, S. A., Narasimhan, R., & DeCampos, H. A. (2014). Supply chain excellence in the new normal. *Business Horizons*, 57(3), 225–234.
- Montecchi, M., Plangger, K., & Etter, M. (2019). It's real, trust me! Establishing supply chain provenance using blockchain. *Business Horizons*, 62(3), 283–293.
- Montgomery, D. C. (2019). *Introduction to statistical quality control* (8th ed.). Wiley.
- New, S. (2015). Modern slavery and the supply chain: The limits of corporate responsibility? *Supply Chain Management: An International Journal*, 20(6), 697–707.
- Ngai, E. W. T., Moon, K. K., Riggins, F. J., & Yi, C. Y. (2008). RFID research: An academic literature review (1995–2005). *International Journal of Production Economics*, 112(2), 510–520.
- Nguyen, T., Zhou, L., Spiegler, V., Ieromonachou, P., & Lin, Y. (2021). Big data analytics in supply chain management: A state-of-the-art literature review. *Journal of Business Research*, 131, 295–308.
- O'Donnell, A., & David, F. (2000). How information systems influence user decisions: A research framework and literature review. *International Journal of Information Management*, 20(3), 217–236.
- Otto, B. (2012). Organizing master data management: Findings from an expert survey. *Information Systems Management*, 29(1), 70–83.

- Pålsson, H., Pettersson, F., & Winslott Hiselius, L. (2017). Packaging logistics in the circular economy: A conceptual framework. *Sustainability*, 9(3), 406.
- Queiroz, M. M., & Wamba, S. F. (2019). Blockchain adoption challenges in supply chain: An empirical investigation. *International Journal of Information Management*, 46, 70–82.
- Ramanathan, U., Philbin, S. P., & Ramanathan, R. (2017). Achieving supply chain resilience through circular economy practices: Empirical evidence. *Production Planning & Control*, 28(6–8), 498–508.
- Rogers, D. S., & Tibben-Lembke, R. (1999). Going backwards: Reverse logistics trends and practices. Reverse Logistics Executive Council.
- Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., & Shen, L. (2019). Blockchain technology and supply chain sustainability: Thematic analysis of the literature. *International Journal of Production Research*, 57(7), 2117–2135.
- Saghafian, S., & Van Oyen, M. P. (2019). Operations management in healthcare: Strategy and practice. Springer.
- Schoenherr, T., & Speier-Pero, C. (2015). Data science, predictive analytics, and big data in supply chain management: Current state and future potential. *Journal of Business Logistics*, 36(1), 120–132.
- Seuring, S., & Müller, M. (2008). From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 16(15), 1699–1710.
- Talluri, S., & Scherer, S. (2021). Data and cybersecurity risks in supply chains. *Journal of Business Logistics*, 42(4), 432–436.
- Thomé, A. M. T., Scavarda, L. F., Fernandez, N. S., & Scavarda, A. J. (2014). Sales and operations planning: A research synthesis. *International Journal of Production Economics*, 138, 1–13.

- Van der Vorst, J. (2006). Performance measurement in agri-food supply chains. Quantifying the Agri-Food Supply Chain, 15–26.
- Waller, M. A., & Fawcett, S. E. (2013). Data science, predictive analytics, and big data: A revolution in supply chain design and management. *Journal of Business Logistics*, 34(2), 77–84.
- Wamba, S. F., Akter, S., Edwards, A., Chopin, G., & Gnanzou, D. (2015). How 'big data' can make big impact: Findings from a systematic review and a longitudinal case study. *International Journal of Production Economics*, 165, 234–246.
- Wang, Y., Wallace, S. W., Shen, B., & Choi, T. M. (2020). Service supply chain management: Challenges and opportunities. *Decision Sciences*, 51(1), 1–42.
- Wieland, A., & Wallenburg, C. M. (2013). The influence of relational competencies on supply chain resilience. *International Journal of Production Research*, 51(18), 5474–5487.
- Zhang, X., Zhao, X., & Kumar, A. (2016). Big data analytics in supply chain management: A state-of-the-art literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 101, 1–13.

BÖLÜM 8

GELECEĞİN SÜRDÜRÜLEBİLİR VE AKILLI TEDARİK ZİNCİRİ: OTONOMİ, DİJİTAL İKİZLER, E-MOBİLİTE VE YENİLİKÇİ İŞ MODELLERİ

Dr. Burcu SAKIZ¹

¹ İstanbul Bilgi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye, burcu.sakiz@bilgi.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-8026-4775>

1. GİRİŞ

Yirmi birinci yüzyılın üçüncü on yılı, tedarik zinciri yönetiminin en zorlu sınavlarından birine sahne olmuştur. Küresel salgın, jeopolitik gerilimler ve iklim değişikliğinin oluşturduğu üçlü kriz, geleneksel, doğrusal ve katı tedarik zinciri modellerinin dayanıksızlığını açıkça ortaya koymuştur. Dünya Ekonomik Forumu’nun (2023) “Küresel Riskler Raporu”, tedarik zinciri aksamalarını iş dünyası için öncelikli kısa vadeli riskler arasında ekonomik risk kategorisinde 17. Sırada göstermiştir. Bu unsurlar, tedarik zincirlerini daha dirençli, şeffaf, verimli ve çevreye duyarlı bir yapıya dönüştürmek için güçlü bir itici güç yaratmıştır.

Bu dönüşümün merkezinde, sürdürülebilirlik ve dijitalleşme ekseninde şekillenen “Akıllı Tedarik Zincirleri” bulunmaktadır. Bu yeni paradigma, yapay zeka (AI), nesnelerin interneti (IoT), büyük veri analitiği ve blokzincir gibi Endüstri 4.0 olarak isimlendirilen dördüncü sanayi devrimi teknolojilerini fiziksel operasyonlarla entegre ederek, aynı anda operasyonel mükemmellik ve ekolojik sürdürülebilirliği aynı anda optimize etmeyi hedeflemektedir. Endüstri 4.0 çağı ile birlikte birçok alan dijitalleşme sürecine hız vermiştir (Tekin. Öztürk, Bahar, 2020).

Bu kitap bölümü, geleceğin tedarik zincirini inşa edecek dört temel bileşeni, uygulama örneklerini, gelecek potansiyellerini ve ortaya çıkan yenilikçi iş modellerini sistematik bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır. Ele alınan başlıklar şunlardır:

1. Elektrikli Araç (E-Mobilité) Teknolojileri: Lojistik operasyonlarının karbon ayak izini azaltma ve enerji verimliliğini potansiyeli.

2. Otonom Taşımacılık Sistemleri: İnsan faktöründen kaynaklanan hata, maliyet ve kapasite kısıtlarını aşarak, sürekli ve optimize edilmiş bir lojistik ağı mümkün kılma vizyonu.

3. Dijital İkiz Senaryoları: Fiziksel tedarik zincirinin dinamik ve veriye dayalı sanal bir modelini oluşturarak, simülasyon, tahmin ve proaktif karar alma yeteneği kazandıran teknolojik altyapı.

4. Döngüsel Tedarik Zinciri: Geleneksel "al, üret, at" lineer ekonomisinden, kaynak verimliliğini maksimize eden, atığı minimize eden ve ürün ömrünü uzatan "yeniden kullan, onar, geri dönüştür" prensibine dayalı sistemik yaklaşım.

Bu dört bileşen, birbirinden bağımsız teknolojik trendler olmaktan ziyade, birbirini güçlendiren ve tamamlayan sinerjik bir ekosistemin yapı taşlarıdır. Bölüm boyunca, bu teknolojilerin mevcut durumu, uygulama senaryoları, karşılaşılan engeller ve ortaya çıkardığı yenilikçi iş modelleri, güncel akademik araştırmalar ve sektörel vaka çalışmaları ışığında detaylandırılacaktır.

2. ELEKTRİKLİ ARAÇ TEKNOLOJİLERİ VE LOJİSTİKTE E-MOBİLİTE

Lojistik sektörünün sürdürülebilirlik önündeki en temel engellerden biri, ağırlıklı olarak içten yanmalı motorlara ve fosil yakıtlara olan bağımlılığıdır. Bu bağımlılık, operasyonel maliyetlerde volatilité yaratmanın yanı sıra, küresel iklim hedefleriyle doğrudan çelişen yüksek karbon emisyonlarına yol açmaktadır. Elektrikli araç (EV) teknolojileri, bu çifte soruna yönelik en somut ve hızla olgunlaşan çözüm yolunu temsil etmektedir. E-mobilite dönüşümü, sadece bir tahrik sistemi değişikliği değil, filo yönetimi, enerji tedariki, bakım stratejileri ve hatta müşteriyle etkileşim biçimlerini yeniden şekillendiren köklü bir operasyonel dönüşümdür. Bu bölüm, e-mobilite teknolojilerinin ticari lojistikteki mevcut benimseme düzeyini, ekonomik ve çevresel etkilerini, altyapı gereksinimlerini ve tetiklediği yeni iş modellerini analiz etmektedir.

2.1. Lojistiğin Karbon Problemi

Ulaştırma sektörü, küresel enerji kaynaklı karbondioksit (CO₂) salımlarının en büyük ikinci kaynağı konumundadır. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) güncel verileri, 2022 yılında taşıma kaynaklı emisyonların toplam küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık %23.5'ine denk geldiğini ortaya koymaktadır (IEA, 2023). Bu oranın önemli bir bölümü, mal ve hizmetlerin taşınmasından sorumlu olan ticari karayolu taşımacılığından kaynaklanmaktadır. Özellikle ağır vasıtalar ve dağıtım filoları, şehir içi ve

şehirlerarası lojistik ağlarında yoğun karbon salımına neden olmaktadır. Paris Anlaşması ile belirlenen küresel sıcaklık artışını 1.5°C ile sınırlama hedefi ve şirketlerin Bilim Temelli Hedefler Girişimi (SBTi) kapsamında aldıkları taahhütler, lojistik operasyonlarının acilen karbonsuzlaştırılmasını stratejik bir zorunluluk haline getirmiştir (IPCC, 2022; SBTi, 2023).

Elektrikli araç (EV) teknolojileri, IEA'nın belirlediği “Net Sıfır” senaryosunda merkezi bir role sahip olup, bu zorluğun üstesinden gelmek için en umut vadeden çözümlerden biridir (International Energy Agency, 2021). Batarya elektrikli araçlar (BEV’ler), egzoz emisyonunu sıfıra indirerek doğrudan karbon ayak izini azaltırlar. Ayrıca, Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı verilerine göre enerji verimliliği içten yanmalı motorlara (ICE) kıyasla belirgin şekilde daha yüksektir (U.S. Department of Energy, n.d.). Şebeke yenilenebilir enerji kaynaklarıyla beslendiğinde ise, "kuyudan-tekerleğe" analizlerine göre lojistik faaliyetlerini tamamen karbon nötr hale getirme potansiyeli taşımaktadır (Requia vd., 2018).

2.2. Elektrikli Ticari Araç (E-TA) Teknolojileri ve Mevcut Durum

E-mobilité dönüşümü yani “Elektrikli Lojistik” sadece binek araçlarla sınırlı değildir, kargo bisikletlerinden dağıtım kamyonetlerine ve uzun mesafe kamyonlarına kadar geniş bir ticari araç yelpazesini kapsamaktadır. Bu yelpaze, kentsel mikro-lojistik çözümleri (kargo bisikletleri, scooterlar) ile başlayıp, son kilometre dağıtım araçları (hafif ticari araçlar) ve nihayetinde uzun mesafe yük taşımacılığına yönelik ağır hizmet elektrikli kamyonlarına (e-truck) kadar uzanır. Günümüzde, rotası öngörülebilir ve günlük mesafesi sınırlı olan “son kilometre” operasyonlarında elektrikli araçların toplam sahip olma maliyeti (TCO- total cost of ownership) avantajı belirginleşmekte ve benimseme hızlanmaktadır.

Hafif Ticari Araçlar: Son kilometre lojistiğinde lider firmalar somut hedefler belirlemiştir. Amazon, Rivian ile işbirliği içinde 2030 yılına kadar 100.000 adet elektrikli dağıtım aracını filolarına katma taahhüdünde bulunmuştur (Amazon, 2022). Benzer şekilde, küresel entegre lojistik şirketleri de somut hedefler ve yatırımlarla filo dönüşümüne odaklanmaktadır. Deutsche

Post DHL Grubu, 2030 yılına kadar "son kilometre" dağıtımında %60 elektrifikasyon hedefini açıklamış ve bu hedefe ulaşmak için 7 milyar Euro'ya varan yatırım planladığını duyurmuştur (DHL Group, 2022). FedEx, 2040 yılına kadar tüm operasyonlarında karbon nötr olma taahhüdü kapsamında, filosunu tamamen elektrikli araçlardan oluşan bir filo'ya dönüştürmek için 2 milyar dolardan fazla yatırım yapacağını belirtmiştir; bu yatırımın 100 milyon doları bir sürdürülebilirlik merkezine ayrılmıştır (FedEx, 2021, FedEx, 2022). UPS ise, 2025 yılına kadar satın alacağı yeni araçların %40'ının alternatif yakıtlı veya elektrikli olacağını taahhüt etmiş ve bu dönüşüm için milyarlarca dolar ayırdığını açıklamıştır (UPS, 2023).

Ağır Ticari Araçlar: Uzun mesafe yük taşımacılığı için elektrikli kamyonlar (e-truck) geliştirilmektedir. Uzun mesafe taşımacılığının elektrifikasyonu, yüksek enerji gereksinimi ve şarj altyapısı ihtiyacı nedeniyle daha karmaşık bir teknolojik meydan okuma oluşturmaktadır ve sektörde önemli gelişmeler görülmektedir. Tesla Semi, tek şarjla yaklaşık 800 km menzil vaat etmekte ve PepsiCo gibi erken benimseyen firmalarla test sürüşlerine başlamıştır (Valdes-Depana, 2022). Avrupa pazarında ise geleneksel ağır ticari araç üreticileri aktif bir şekilde pazara girmektedir. Volvo Trucks, FL ve FE Electric modelleri ile kentsel dağıtımda, daha uzun menzilli FH Electric modeli ile de bölgesel taşımacılıkta faaliyet göstermektedir (Volvo Trucks, 2023). Daimler Truck ise Mercedes-Benz eActros serisini seri üretime almış ve müşterilerine teslim etmeye başlamıştır (Daimler Truck, 2023). MAN, eTGM modeli ile özellikle şehir içi ve çevresindeki dağıtım görevlerine odaklanmaktadır. Bu üreticiler, elektrikli kamyon pazarının olgunlaşmasında ve rekabet ortamının şekillenmesinde kilit rol oynamaktadır.

Buradaki teknolojik zorluklar ve çözümler menzil ve batarya teknolojisi ve şarj altyapısı olarak iki alt başlıkta incelenebilir:

· **Menzil ve Batarya Teknolojisi:** E-TA'ların yaygınlaşmasının önündeki en büyük engeller batarya kapasitesi, menzil endişesi ve şarj altyapısının yetersizliğidir. Ancak, lityum-iyon batarya teknolojisindeki sürekli gelişmeler enerji yoğunluğunu artırmakta ve uzun vadeli maliyetleri düşürmektedir. BloombergNEF'in verilerine göre, lityum-iyon batarya paketi fiyatları 2010'dan bu yana %89'dan fazla düşmüştür (BloombergNEF, 2023).

· Şarj Altyapısı: Hızlı ve güvenilir şarj altyapısının, özellikle ana lojistik koridorları ve merkezleri boyunca yaygınlaştırılması kritik öneme sahiptir. Avrupa Birliği'nin "Alternatif Yakıtlar Altyapıları Yönetmeliği (AFIR)" gibi düzenlemeler, bu altyapının geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

2.3. E-Mobilité'nin Tedarik Zinciri Yönetimine Etkileri

Elektrikli araçların benimsenmesi, sadece basit bir araç yenilemesi veya yakıt değişimi olarak görülmemelidir. Bu geçiş, lojistik ve tedarik zinciri yönetiminin temel parametrelerini yani maliyet yapısını, risk profilini, müşteri hizmetlerini ve hatta gelir modellerini yeniden tanımlayan köklü bir operasyonel ve stratejik dönüşümdür. Bu dönüşüm, öncelikle değişen maliyet dinamiği ile kendini gösterir: yüksek başlangıç yatırımı, daha düşük ve öngörülebilir operasyonel giderlerle (enerji ve bakım) dengelenir. Bu yeni maliyet yapısı, filo yönetimi, rota optimizasyonu ve enerji tedariki konularında daha sofistike bir yaklaşım gerektirir. Dahası, bu teknolojik altyapı, geleneksel "araç sahipliği" modelinin ötesine geçen, hizmet odaklı ve veriye dayalı tamamen yeni iş fırsatlarının ortaya çıkmasına zemin hazırlar. Bu etkileri ve fırsatları da operasyonel verimlilik ve yenilikçi iş modelleri olmak üzere iki ana başlıkta incelemek mümkündür.

2.3.1. Operasyonel Verimlilik ve Yeni Maliyet Dinamikleri

Elektrikli araçların bakım maliyetleri (daha az hareketli parça) ve yakıt/enerji maliyetleri (dünyadaki birçok bölgede benzin/dizelden daha ucuz elektrik) daha düşüktür. Endüstri analizleri, bir elektrikli kamyonetin toplam sahip olma maliyetinin (TCO), 2025 yılı civarında birçok pazarda dizel muadiliyle rekabet edebileceğini, hatta geçebileceğini öngörmektedir. Elektrikli ticari araçların (E-TA) toplam sahip olma maliyeti (Total Cost of Ownership - TCO), geleneksel dizel rakiplerine kıyasla farklı bir dağılıma sahip olduğundan bu dağılım, uzun vadede rekabet avantajı yaratmaktadır.

Enerji Maliyetleri açısından bakıldığında dünyada elektrik, birim enerji başına genellikle dizel yakıttan daha ucuzdur. U.S. Department of Energy (n.d.) verilerine göre, elektrikli bir aracın "benzin eşdeğeri" maliyeti, bir dizel aracın yakıt maliyetinin yaklaşık yarısı kadardır. Ayrıca, elektrik fiyatları petrol

fiyatlarına kıyasla daha istikrarlıdır, bu da operasyonel bütçelerde öngörülebilirliği artırır.

Bakım ve Onarım Maliyetleri açısından bakıldığında, elektrikli araçların içten yanmalı motorlara kıyasla çok daha az hareketli parçası vardır; yağ değişimi, egzoz sistemi bakımı, debriyaj ve transmisyon onarımları gibi rutin masraflar ortadan kalkar. Toplam Sahip Olma Maliyeti (TCO) Denge Noktası açısından bakıldığında, yüksek satın alma fiyatına rağmen, düşük enerji ve bakım giderleri, E-TA'ların TCO'sunu belirli bir kilometre veya kullanım süresi sonunda rakip dizel araçlarla dengelemektedir. BloombergNEF'in 2023 yılında yaptığı analizi, birçok Avrupa ve ABD pazarında, hafif elektrikli ticari araçların TCO açısından 2025-2027 civarında dizel rakipleriyle rekabet edebileceğini, yüksek kilometreli operasyonlarda ise bu dengenin daha erken kurulabileceğini öngörmektedir (BloombergNEF, 2023).

2.3.2. Yenilikçi İş Modelleri ve Değer Oluşumu

E-mobilité altyapısı, salt maliyet tasarrufunun ötesinde, tedarik zincirine yeni değer katmanları ekleyen iş modellerinin gelişimini tetiklemektedir.

Hizmet Olarak Mobilité (MaaS) açısından bakıldığında günümüzde şirketler, araç satın almak yerine, kilometre başına veya abonelik temelinde sabit bir ücret karşılığında elektrikli araç, şarj altyapısı ve bakım hizmetlerini paket olarak alabilirler. Bu, yüksek başlangıç yatırımını operasyonel giderlere dönüştürerek finansal esneklik sağlar. Bu modelde, şirketler araç satın almak yerine, aracı, şarj altyapısını, bakımı ve sigortayı kapsayan kapsamlı bir hizmeti, aylık abonelik veya kilometre başına ücret ödeyerek temin eder. Bu, lojistik şirketlerinin büyük sermaye yatırımı gerektirmeden elektrikli filoya geçişini hızlandırırken, servis sağlayıcılarına öngörülebilir bir gelir akışı sağlar. Örneğin, Zeem Solutions gibi şirketler, ticari filolara elektrikli araç ve altyapı hizmetlerini kapsamlı bir MaaS paketi olarak sunmaktadır (Zeem, 2023).

Araçtan Şebekeye (V2G) Teknolojisi sayesinde Elektrikli ticari araçların büyük batarya kapasiteleri, onları hareketli enerji depolama üniteleri haline getirir. V2G teknolojisi, bu araçların şebekeye bağlı oldukları süre boyunca (örneğin, gece depolarda veya gün içi mola noktalarında), şebeke frekansını dengelemek veya talep yönetimine katkıda bulunmak için depoladıkları enerjiyi şebekeye geri vermelerine olanak tanır. Bu, araç sahibi lojistik şirketi için ek

bir gelir kaynağı yaratabilir ve şebeke esnekliğine katkıda bulunur (Kempton & Tomic, 2005). Park halindeki elektrikli ticari araçların bataryaları, enerji şebekesi için dağınık bir depolama kaynağı olarak kullanılabilir. Bu araçlar, şebeke talebinin düşük olduğu zamanlarda şarj olup, talebin yüksek olduğu saatlerde depoladıkları enerjiyi şebekeye geri satarak yeni bir gelir kapısı yaratabilir.

Mikro-Dağıtım Merkezleri açısından bakıldığında, elektrikli kargo bisikletleri ve otonom teslimat robotları gibi sıfır emisyonlu mikro-aracılarla yapılan “son kilometre” dağıtımları için şehir merkezlerinde kurulan küçük depolar ile sağlanan model, şehir içi trafik yoğunluğunu, gürültüyü ve hava kirliliğini azaltıcı bir etkiye sahiptir.

Özetle elektrikli araç teknolojileri, sürdürülebilir tedarik zinciri dönüşümünün temel taşıdır. Başlangıç yatırım maliyetleri ve altyapı zorlukları bulunsada, operasyonel tasarruflar, düzenleyici baskılar ve tüketici tercihleri, e-mobiliteye geçişi hızlandırmaktadır. Bu geçiş, yalnızca çevresel bir zorunluluk değil, aynı zamanda uzun vadeli maliyet kontrolü ve rekabet avantajı sağlayan stratejik bir harekettir. Önümüzdeki dönemde, batarya teknolojisindeki ilerlemeler ve şarj altyapısının yaygınlaşmasıyla birlikte, elektrikli ticari araçların lojistik filolarındaki payının istikrarlı bir şekilde artması beklenmektedir.

3. LOJİSTİKTE OTONOMİ: KENDİ KENDİNE ÇALIŞAN TEDARİK ZİNCİRLERİNE DOĞRU

Lojistik sektörü, insan kaynaklı operasyonel kısıtlar yani sürücü kıtlığı, dinlenme süreleri, insan hatasına bağlı kazalar ve değişken verimlilik ile uzun süredir mücadele etmektedir. Otonom taşıma teknolojileri, bu kısıtları kökten değiştirerek, fiziksel mal akışını dijital karar alma sistemleriyle bütünleştiren yeni bir paradigma sunmaktadır. Bu paradigma, yalnızca araçların kendi kendine hareket etmesi anlamına gelmez; tüm tedarik zinciri ağının gerçek zamanlı veriye dayalı olarak optimize edilmesi, izlenmesi ve yönetilmesi anlamına gelir. Otonom sistemler, karayolu, deniz ve hava taşımacılığında farklı olgunluk seviyelerinde uygulanmakta olup, operasyonel maliyetlerde radikal düşüş, güvenlikte belirgin artış ve 7/24 kesintisiz lojistik kapasitesi

vaadiyle sektörün geleceğini şekillendirmektedir. Bu bölüm, otonom taşımacılığın temel kavramlarını, teknolojik katmanlarını, sağladığı faydalar ve karşılaştığı zorlukları, mevcut uygulama örnekleri üzerinden analiz edecektir.

3.1. Otonom Taşımacılığın Tanımı ve Kademeli Gelişim Çerçevesi

Otonom taşımacılık, bir aracın insan müdahalesi olmadan çevresini algılayıp, navigasyon yaparak ve hareket ederek yükünü kaynaktan hedefe taşıyabilme yeteneğidir. Uluslararası Otomotiv Mühendisleri Birliği (SAE International) tarafından tanımlanan 0 (Tamamen Manuel) ile 5 (Tamamen Otonom) arasındaki seviyeler, bu geçişin kademeli doğasını göstermektedir (SAE International, 2021). Otonom taşımacılık, bir aracın insan sürücünün sürekli müdahalesi olmadan çevresini algılayıp, navigasyon yaparak ve hareket ederek yükünü verilen nihai hedef lokasyona götürebilmesidir. Kademeli olarak SAE tarafından yapılan sınıflandırma, teknolojinin bir gecede değil, aşamalı olarak önce sürücü destek sistemleri (Seviye 1-2), ardından belirli koşullarda otomasyon (Seviye 3-4) ve nihayet tam otonomi (Seviye 5) şeklinde hayatımıza gireceğini göstermektedir. Lojistik sektöründeki mevcut uygulamalar ve pilot projeler, büyük ölçüde Seviye 4 (Belirli Koşullarda Yüksek Otomasyon) hedefi doğrultusunda ilerlemektedir; bu seviyede araç, tanımlanmış operasyonel alanlar veya koridorlar içinde (örneğin, otoyollar, liman sahaları, depo içi) tamamen kendi kendine hareket edebilir. Lojistik sektörü için otonominin vaadi, insan hatasından kaynaklanan kazaları minimize etmek, yakıt verimliliğini optimize etmek, 7/24 kesintisiz operasyon imkanı yaratmak ve küresel sürücü kıtlığı gibi yapısal bir soruna çözüm bulmaktır. Analizler, tam otonom kargo taşımacılığının yaygınlaşması durumunda, nakliye maliyetlerinde önemli oranlarda azalma sağlanabileceğini öne sürmektedir (McKinsey & Company, 2023).

3.2. Otonom Taşımacılığın Katmanları: Karada, Havada ve Denizde

Otonom teknolojiler, taşıma modlarının kendine özgü zorluklarına ve fırsatlarına göre farklılaşarak gelişmektedir. Bu nedenle, lojistikte otonomluğun gelişimini anlamak için karayolu, hava ve deniz taşımacılığındaki

paralel ilerlemeleri ayrı ayrı ele almak gerekir. Her bir katman, tedarik zincirinin farklı bir halkasına (uzun mesafe nakliye, son kilometre dağıtımı, kıtalararası ticaret) odaklanarak, bütüncül bir "kendi kendine çalışan tedarik ağı" vizyonunun parçalarını oluşturmaktadır. Otonom taşımacılık, tek bir teknolojiden ziyade, farklı ortamlarda uygulanan bir teknoloji yelpazesidir.

· Otonom Karayolu Taşımacılığı: Bu alandaki gelişmeler, özellikle “sürücü destek sistemleri” (Seviye 2-3 otonomi) üzerinden hızla yayılmaktadır. Tam otonom (Seviye 4) kamyonlar ise hala test ve geliştirme aşamasındadır. ABD’deki TuSimple gibi şirketler, “insansız güvenlik sürücüsü” eşliğinde otonom kamyon seferleri gerçekleştirmiştir. Avrupa’da ise Scania ve Volkswagen gibi üreticiler, lojistik merkezleri arasında “tır konvoyu” (platooning) teknolojisini test etmektedir. Bu teknoloji, önde giden bir lider aracı takip eden diğer araçların, hava direncini azaltarak yakıt tüketimini %4-10 arasında düşürmesine olanak tanır (Uhleman, 2016).

· Otonom Hava Araçları (İHA’lar / Droneler): İHA’lar, “son kilometre” dağıtımında devrim yaratma potansiyeli taşımaktadır. İlaç, tıbbi numune ve perakende ürün teslimatı için ideal bir çözüm sunarlar. Alphabet’in iştiraki olan Wing, Avustralya’da binlerce ticari teslimat gerçekleştirmiştir (Nelson, 2023). Benzer şekilde, Zipline şirketi, Afrika’da kan ve aşı teslimatı için bir ağ kurmuş ve yüzbinlerce tıbbi ürün teslimatı yapmıştır (Zipline, 2024).

· Otonom Deniz Taşımacılığı: Küresel ticaretin büyük bölümü deniz yoluyla taşındığı için, bu alandaki otonomi büyük verimlilik potansiyeli barındırmaktadır. Norveç merkezli Kongsberg ve Yara International, “Yara Birkeland” adlı dünyanın ilk tamamen elektrikli ve otonom konteyner gemisini hizmete sokmuştur. Gemi, Norveç’teki limanlar arasında gübre taşımakta ve binlerce kamyon seferinin yerini alarak emisyonu ve trafiği azaltmaktadır (Kongsberg, 2023).

3.3. Otonom Taşımacılıkta Gelecek Perspektifi

Otonom taşımacılık, lojistik sektörü için bir devrim vadetmektedir. Ancak bu geçiş, ani bir sıçramadan ziyade, kademeli olarak, önce kapalı alanlarda (limanlar, fabrika sahaları) ve sonrasında belirli koridorlarda gerçekleşecektir. Otonom karayolu taşımacılığı, önümüzdeki on yılda özellikle

otoyol gibi kontrollü ortamlarda yaygınlaşırken, insansız hava araçları ve otonom gemiler halihazırda ticari uygulamalarda somut başarılar göstermektedir. Bu teknolojilerin olgunlaşması, düzenleyici çerçevelerin oturması ve toplumsal kabule bağlı olarak, otonom taşımacılık, sürdürülebilir, verimli ve son derece dayanıklı bir tedarik zincirinin temel taşı haline gelecektir.

4. DİJİTAL İKİZLER: TEDARİK ZİNCİRİNİN GELECEĞİNİ SANAL ORTAMDA ŞEKİLLENDİRMEK

Modern tedarik zinciri yönetimi, artan karmaşıklık ve belirsizlik karşısında reaktif değil, proaktif olmayı zorunlu kılmaktadır. Bu zorunluluk, fiziksel operasyonlar ile dijital dünya arasındaki sınırı bulanıklaştıran köklü bir yaklaşımı gerekli hale getirmiştir. Dijital ikiz teknolojisi, tam da bu noktada, fiziksel bir sistemin, sürecin veya tüm tedarik ağının, gerçek zamanlı veri ile beslenen dinamik bir sanal modelini yaratarak devreye girer. Bu sanal kopya, sadece bir simülasyon aracı değil; aynı zamanda durum izleme, performans analizi, senaryo testi ve otonom optimizasyon için güçlü bir platformdur. Bu bölüm, dijital ikiz kavramının tedarik zincirine nasıl uygulandığını, sunduğu başlıca fırsatları (tasarım, optimizasyon, tahmine dayalı bakım, risk yönetimi) ve diğer teknolojilerle olan sinerjisini inceleyecektir.

Günümüzün dinamik ve belirsiz iş ortamında, tedarik zinciri yöneticileri artık yalnızca tarihsel verilere dayalı reaktif kararlar almakla yetinemez. Proaktif olmak, senaryo planlaması yapmak ve operasyonel değişikliklerin sonuçlarını daha uygulanmadan önce görmek zorunluluk haline gelmiştir. İşte tam bu noktada, dijital ikiz teknolojisi, devrim niteliğinde bir yetenek sunar. Dijital ikiz, fiziksel bir varlığın, sürecin veya sistemin, gerçek zamanlı veri akışları ile beslenen ve simülasyon, makine öğrenimi ile akıl yürütme yeteneğine sahip dinamik bir sanal modelidir (Grieves, 2014; Tao vd., 2018). Lojistik bağlamında bu “varlık”, tek bir makineden (örn. bir forklift) tüm küresel tedarik ağına kadar ölçeklenebilir.

Bu teknolojinin özü, fiziksel dünyadan IoT sensörleri, ERP sistemleri, GPS verileri ve diğer kaynaklardan gelen sürekli veri akışı ile sanal modeli

besleyerek, ikizinin gerçek zamanlı bir yansımasını ve hatta gelecekteki durumunun bir tahminini oluşturmaktır.

4.1. Dijital İkizleri Tedarik Zinciri Yönetiminde Uygulamak

Dijital ikiz teknolojisinin gücü, onun tedarik zincirinin tüm yaşam döngüsü boyunca—tasarım aşamasından gerçek zamanlı operasyonlara ve geleceğe yönelik planlamaya kadar—uygulanabilir olmasından gelir. Bu teknoloji, statik planlama araçlarının ötesine geçerek, dinamik ve veriye dayalı bir karar destek sistemi sunar. Dijital ikizin temel uygulama alanları, bir tedarik zinciri yöneticisinin karşılaştığı başlıca zorlukları (verimlilik, görünürlük, risk yönetimi) doğrudan hedefleyen dört ana senaryo etrafında şekillenebilir: Tasarım ve Planlama, Operasyonel Optimizasyon ve İzleme, Bakım Öngörüsü ve Risk Yönetimi Senaryoları.

4.1.1.Tasarım ve Planlama

Yeni bir dağıtım deposu veya üretim hattı tasarlanırken, dijital ikiz, farklı yerleşim planlarının, ekipman seçimlerinin ve iş akışlarının verimlilik üzerindeki etkilerini simüle etmek için kullanılabilir. Örneğin, DHL uzmanlarınca hazırlanan lojistikte dijital ikiz raporunda dijital ikiz üzerinde modellenen projelerin uygulamadan önce potansiyel darboğazları ortaya çıkararak tesis verimliliğini artırdığını belirtmiştir (Dohrmann vd., 2020).

4.1.2.Operasyonel Optimizasyon ve Gerçek Zamanlı İzleme

Mevcut bir tesisin veya taşıma ağının dijital ikizi, performansı gerçek zamanlı olarak izleyebilir ve anormallikleri tespit edebilir. Rotterdam Limanı, bu tür bir dijital ikiz projesi yürüterek, gemilerin planlı varış ve ayrılış sürelerini optimize etmeyi ve yakıt tüketimini azaltmayı hedeflemektedir (Port of Rotterdam Authority, n.d.).

4.1.3.Bakım Öngörüsü (Tahmine Dayalı Bakım)

Filo yönetiminde, her bir aracın dijital ikizi, motor performansı, lastik basıncı, batarya sağlığı gibi binlerce parametreyi izleyerek, olası bir arızayı günler veya haftalar öncesinden tahmin edebilir.

4.1.4.Risk Yönetimi ve Dayanıklılık Senaryoları

Dijital ikizin en güçlü yanlarından biri, gerçek dünyada uygulanmadan önce karmaşık senaryoları test etme imkanı sunmasıdır. “Tedarikçi devre dışı kalırsa ne olur?” veya “Ana limanda bir grev yaşanırsa?” gibi sorulara yanıt aranabilir.

4.1.5. Dijital İkiz, Otonomi ve E-Mobilité ile Sinerjisi

Dijital ikiz, izole bir teknoloji olarak değil, geleceğin akıllı tedarik zinciri ekosisteminin birbirine bağlı bileşenlerini birleştiren bir entegrasyon platformu olarak değerlendirilmelidir. Onun gerçek gücü, fiziksel dünyadan aldığı verilerle beslenen sanal modelinin, diğer dönüştürücü teknolojilerin (otonomi ve e-mobilité) test edilmesi, optimize edilmesi ve güvenli bir şekilde ölçeklendirilmesi için güvenli ve risk içermeyen bir "kum havuzu" (sandbox) görevi görmesinden kaynaklanır. Bu sinerji, yalnızca operasyonel verimliliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda karmaşık sistemlerin güvenli bir şekilde benimsenmesini hızlandırarak inovasyon döngüsünü kısaltır. Dijital ikiz, bu kitap bölümünde ele alınan diğer teknolojilerle güçlü bir sinerji içindedir:

- Otonom Taşımacılık: Tam otonom bir kamyonun dijital ikizi, milyonlarca kilometrelik sürüşü güvenli bir sanal ortamda simüle ederek, yapay zeka algoritmalarını eğitmek ve test etmek için kullanılabilir.

- E-Mobilité: Bir elektrikli filonun dijital ikizi, şarj altyapısının planlanmasında, batarya ömrünün optimizasyonunda ve V2G (Araçtan Şebekeye) hizmetlerinin simülasyonunda kritik rol oynayabilir.

Öte yandan dijital ikiz teknolojisinin benimsenmesinin önünde veri kalitesi ve entegrasyonu, başlangıç yatırım maliyeti ve uzman personel ihtiyacı gibi engeller bulunmaktadır. Gelecekte, dijital ikizler, yapay zeka ile daha da derinlemesine bütünleşerek, yalnızca durumu göstermekle kalmayıp, otonom olarak optimize edilmiş kararlar alan “özerk dijital ikizlere” doğru evrilecektir. Bir sonraki aşama, bireysel dijital ikizlerin birbirine bağlanarak, tüm tedarik zinciri ekosistemini kapsayan bir “tedarik zinciri meta-ikizi” kavramının hayata geçirilmesidir.

5. DÖNGÜSEL TEDARİK ZİNCİRİ: ATIĞIN SONU, KAYNAKLARIN YENİDEN DOĞUŞU

Geleneksel tedarik zincirleri, ham maddenin ürüne dönüştürülüp tüketiciye ulaştıktan sonra atık olarak bertaraf edildiği doğrusal (lineer) bir model üzerine kuruludur. Bu "al, yap, at" yaklaşımı, artan küresel nüfus ve tüketimle birlikte kaynak kıtlığı, çevresel bozulma ve atık yönetimi krizi gibi sistemik sorunları beraberinde getirmiştir. Sürdürülebilir bir gelecek için, bu lineer modelden, ürünlerin, bileşenlerin ve malzemelerin mümkün olduğunca uzun süre ve yüksek değerde tutulduğu, atığın tasarım aşamasından itibaren minimize edildiği döngüsel bir modele geçiş zorunludur. Döngüsel tedarik zinciri, sadece çevresel bir taahhüt değil, aynı zamanda ham madde maliyetleri ve tedarik risklerini azaltan, yeni iş modelleri yaratan ve uzun vadeli rekabetçilik sağlayan stratejik bir gerekliliktir. Bu bölüm, döngüsel tedarik zincirinin temel prensiplerini, bu modele geçişi mümkün kılan dijital teknolojileri ve ortaya çıkardığı yenilikçi iş modellerini inceleyecektir.

5.1. Lineer Modelden Döngüsel Modele Zorunlu Geçiş

Sanayi Devrimi'nden bu yana hakim olan "al, yap, at" şeklindeki lineer ekonomi modeli, gezegenimizin sınırlı kaynaklarını ve atık asimilasyon kapasitesini ciddi şekilde zorlamıştır. Dünya Bankası verilerine göre, 2020 yılında küresel katı atık üretimi 2.24 milyar tona ulaşmış olup, 2050 yılına kadar bu miktarın %70 artışla 3.88 milyar tona çıkması beklenmektedir (Kaza vd., 2018; World Bank, 2018). Tedarik zincirleri, bu atığın ve kaynak tüketiminin merkezinde yer alır.

Döngüsel ekonomi, atık kavramını tasarım aşamasından itibaren ortadan kaldırmayı, ürün ve malzemeleri kullanım döngüsü içinde tutmayı ve doğal sistemleri yeniden oluşturmayı amaçlayan sistemik bir yaklaşımdır (Ellen MacArthur Foundation, 2013). Bu yaklaşımın tedarik zincirine uyarlanmasıyla ortaya çıkan döngüsel tedarik zinciri (DTZ), ham madde tedarikinden nihai kullanıcıya ve sonrasında tekrar tedarik zincirine geri dönüşe kadar olan tüm süreci kapsayan, restore edici ve yenileyici bir sistemdir.

5.2. Döngüsel Tedarik Zincirinin Temel Prensipleri ve İş Modelleri

Döngüsel tedarik zincirini (DTZ) uygulamak, sadece geri dönüşümü artırmak değil, tüm iş modelini ve ürün yaşam döngüsünü yeniden düşünmek anlamına gelir. Bu, geleneksel “ileri lojistik” odaklı zincire, güçlü bir “tersine lojistik” ağının entegre edilmesini ve ürünlerin tasarımdan itibaren döngüsellğe uygun olarak kurgulanmasını gerektirir. DTZ, bu amaca yönelik olarak birbiriyle bağlantılı birkaç temel prensip ve bu prensipleri hayata geçiren yenilikçi iş modelleri etrafında şekillenir.

İlk ve en kritik prensip, ürünlerin döngüsellik için tasarlanmasıdır. Bu, dayanıklılık, onarılabirlik, modülerlik ve kolay sökülebilirlik (ayrıştırılabilirlik) gibi özellikleri merkeze alır. Örneğin, Fairphone şirketi, kullanıcıların arızalı bileşenleri (ekran, batarya) kolayca değiştirebildiği modüler akıllı telefonlar üreterek, cihaz ömrünü uzatmayı ve elektronik atığı azaltmayı hedeflemektedir (Fairphone, 2023).

İkinci prensip, ürün kullanım ömrünün maksimize edilmesidir. Bu, yeniden satış, tamir, yükseltme ve en değerli haliyle olan yeniden üretim faaliyetlerini kapsar. Bu prensip, lineer "ürün satışı" modelinden, "Hizmet Olarak Ürün" (Product-as-a-Service - PaaS) gibi performans tabanlı modellere geçişi teşvik eder. Bu modelde üretici, ürünün mülkiyetini ve bakım sorumluluğunu elinde tutarken, müşteriye sadece ürünün sağladığı hizmet (örneğin, kilometre, aydınlatma saati) karşılığında ödeme yapar. Michelin'in lastikleri kilometre başına bir ücret karşılığında "hizmet" olarak sunması, bu modelin klasik bir örneğidir; lastiklerin ömrünü uzatmak ve sonunda geri dönüştürmek için motive edici bir unsur barındırır (Michelin, n.d.).

Üçüncü prensip, malzeme döngülerinin kapatılmasıdır. Kullanım ömrü sona eren ürünlerden yüksek kaliteli ikincil hammaddelerin geri kazanılması, yeni hammadde çıkarımına olan bağımlılığı azaltır. Bu, bireysel ürün seviyesinde geri dönüşümün ötesine geçen endüstriyel simbiyoz kavramını da içerir. Bu modelde, bir endüstrinin atık veya yan ürünü, başka bir endüstri için değerli bir hammadde haline gelir. Danimarka'nın Kalundborg Simbiyozu, bir elektrik santrali, bir petrokimya tesisi, bir ilaç fabrikası ve diğer tesisler

arasında buhar, atık ısı, su ve yan ürün alışverişi yapılan, dünyadaki en eski ve en başarılı örneklerden biridir (State of green, 2023).

Bu prensiplerin uygulanması, geleneksel tedarik zinciri mantığını tersine çevirerek, "atık" kavramını ortadan kaldırmaya ve her aşamada kaynak verimliliğini en üst düzeye çıkarmaya odaklanır. Bu dönüşüm, tedarikçilerden tüketicilere kadar tüm paydaşlar arasında derin bir işbirliği ve şeffaflık gerektirir.

5.3. Dijital Teknolojilerin Döngüsellği Mümkün Kılma Rolü: İzlenebilirlik ve Şeffaflık

Döngüsel tedarik zincirinin başarısı, ürün ve malzemelerin yaşam döngüsü boyunca izlenebilir olmasına bağlıdır. Karmaşık küresel ağlarda bir ürünün içeriğini, kullanım geçmişini ve geri dönüşüm potansiyelini bilmek, ancak gelişmiş dijital teknolojilerle mümkündür.

5.3.1.Blokzincir ve Malzeme Pasaportları

Blokzincir teknolojisi, tedarik zinciri boyunca veri şeffaflığı ve güvenliği sağlar. Özellikle “Dijital Ürün Pasaportları” (DPP) kavramı, Avrupa Birliği’nin Döngüsel Ekonomi Eylem Planı (CEAP) çerçevesinde yasal bir zorunluluk haline gelmektedir (European Commission, 2022). Blokzincir, bir ürünün ham maddeden nihai atık aşamasına kadar olan yolculuğunu değiştirilemez bir kayıt defterinde tutar. Saberi vd. (2019) yaptıkları çalışmada, blokzincir teknolojisinin tedarik zinciri sürdürülebilirliğinde bilgi asimetrisini ortadan kaldırdığını ve ürünlerin köken doğrulamasını (provenance) sağlayarak etik kaynak kullanımını garanti altına aldığını belirtmektedir. Bir kullanım örneği olarak Circulor, elektrikli araç bataryalarında kullanılan kobalt ve mika gibi minerallerin etik kaynaklardan gelip gelmediğini ve karbon ayak izini blokzincir üzerinde takip ederek Volvo ve Polestar gibi üreticilere şeffaflık sağlamaktadır (Circulor, 2023).

5.3.2.Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Hizmet Odaklı Modeller

IoT sensörleri, ürünlerin kullanım aşamasındaki durumunu (performans, aşınma, konum) gerçek zamanlı olarak izler. Bu veri akışı, “Hizmet Olarak Ürün” (PaaS- platform as a service) modellerinin teknik altyapısını oluşturur.

Bressanelli vd. (2018) yaptıkları çalışmalarında, IoT ve Büyük Veri'nin, ürünlerin kullanım ömrünü uzatmak için kestirimci bakımı (predictive maintenance) nasıl mümkün kıldığını ve böylece döngüsel iş modellerini nasıl desteklediğini ortaya koymuştur. Bir kullanım örneği olarak Philips'in "Hizmet Olarak Işık" modelinde, ofis aydınlatma sistemleri uzaktan izlenir ve bakımı yapılır; armatürlerin kendisi de geri alınıp yenilenir, böylece malzeme döngüsü kapalı hale getirilir (Philips, 2023).

5.4. Uygulama Zorlukları ve Gelecek Vizyonu

DTZ'ye geçiş, tedarikçilerle derin işbirliği, tersine lojistik için yeni altyapı yatırımları ve belirli sektörlerde ekonomik fizibilitenin netleşme süreci gibi zorluklar içerir. Ancak, Avrupa Birliği'nin Yeşil Mutabakat ve Döngüsel Ekonomi Eylem Planı gibi politikalar (European Commission, 2020), genişleyen üretici sorumluluğu (EPR) düzenlemeleri ve tüketici bilincindeki artış, döngüsel çözümler için pazarı büyötmektedir.

Geleceğin döngüsel tedarik zinciri, fiziksel ürün pasaportları, malzeme bankaları ve paylaşım platformları gibi yeniliklerle şekillenecektir. Nihai vizyon, her atığın bir girdi olduğu, kaynak tüketimi ile ekonomik büyümenin birbirinden ayrıştığı ve tedarik zincirlerinin doğal ekosistemleri taklit ederek restore ettiği tamamen döngüsel bir ekonomiye ulaşmaktır.

6. ENTEGRE BİR VİZYON: SÜRDÜRÜLEBİLİR, AKILLI TEDARİK ZİNCİRİ EKOSİSTEMİ

Önceki bölümlerde ayrı ayrı incelenen dört temel itici gücün gerçek dönüştürücü etkisi, bunların birbirinden izole gelişmeler olarak değil, birbirini besleyen ve güçlendiren bir ekosistem olarak bir araya geldiklerinde ortaya çıkacaktır. Geleceğin tedarik zinciri, bu bileşenlerin kusursuz entegrasyonu ile oluşan, otonom, esnek, sıfır-atıklı ve kendini sürekli optimize eden akıllı bir sistem olacaktır.

2035 yılına ait olası bir senaryo şu şekilde kurgulanabilir: Modüler ve onarılabilir şekilde tasarlanmış bir ürün, döngüsel kaynaklardan elde edilen malzemelerle üretilir. Ürün, elektrikli ve otonom bir kamyonla, dijital ikizi tarafından gerçek zamanlı trafik, hava durumu ve enerji fiyatı verileri analiz

edilerek optimize edilmiş bir rotadan taşınır. Şehir içinde, ürün bir elektrikli drone veya otonom kargo robotu ile nihai müşteriye teslim edilirken, aynı araç planlı bir şekilde geri dönüşüm için eski bir ürünü toplar (tersine lojistik). Ürünün ömrü sona erdiğinde, blokzincir tabanlı dijital pasaportu ve IoT sensör verileri sayesinde bileşenlerinin durumu otomatik olarak değerlendirilir; değerli parçalar sökülerek yeniden üretimde kullanılır, kalan malzemeler ise yüksek saflıkta geri dönüştürülür. Bu bütünsel süreç, üreticinin Hizmet Olarak Ürün (PaaS) iş modelinin bir parçasıdır.

6.1. Yenilikçi İş Modellerinin Evrimi ve Değer Havuzları

Bu entegre ekosistem, geleneksel “mal satışı” odaklı iş modellerini kökten dönüştürecek ve yeni değer havuzları yaratacaktır:

1. Platform Tabanlı Döngüsel Pazar Yerleri: Blokzincir ile güçlendirilmiş platformlar, ikincil hammaddelerin, yenilenmiş bileşenlerin ve sertifikalı kullanılmış ürünlerin küresel ticaretini kolaylaştıracak. Bu platformlar, malzeme verimliliğini artırarak yeni bir dijital aracı olma değeri yaratır.

2. Lojistik ve Mobilite Hizmet Platformları (MaaS/LaaS): Şirketler, sabit maliyetli filo yatırımları yerine, ihtiyaç duydukları taşıma kapasitesini (elektrikli, otonom, insanlı) talep üzerine bir platformdan “hizmet olarak” kiralayacak. Bu, Lojistik-hizmet-Olarak (Laas) modelini doğuracak ve sermaye verimliliğini artıracaktır.

3. Veri ve Analitik Hizmetleri: Dijital ikizler, IoT ağları ve otonom sistemlerden elde edilen zengin operasyonel veri, kendi başına değerli bir varlık haline gelecektir. Üçüncü taraf şirketler, bu verileri analiz ederek tedarik zinciri risk tahmini, karbon hesabı otomasyonu, ağ optimizasyonu ve kestirimci bakım gibi gelişmiş hizmetler sunabilecektir.

6.2. Politika, Standartlar ve İnsan Merkezli Dönüşüm

Bu teknolojik ve iş modeli dönüşümünü hızlandırmak ve yönlendirmek için kritik destekleyici altyapılar gereklidir:

· **Politika ve Düzenleme:** Hükümetler, yeşil koridorlar için şarj/dinamik şarj altyapısını teşvik etmeli, otonom araçların testi ve kullanımı için net yasal çerçeveler oluşturmalı, döngüsel ekonomiyi genişletilmiş üretici sorumluluğu (EPR) ve “yeşil vergiler” gibi araçlarla desteklemeli ve veri paylaşımı ile siber güvenlik standartlarını belirlemelidir. Avrupa Birliği’nin Dijital Ürün Pasaportu (DPP) girişimi bu yönde atılmış somut bir adımdır (European Commission, 2022).

· **Açık Standartlar ve Birlikte Çalışabilirlik:** Ekosistemin farklı katmanlarındaki (araçlar, sensörler, platformlar, veri formatları) cihaz ve sistemlerin birbiriyle iletişim kurabilmesi için evrensel ve açık standartların geliştirilmesi şarttır.

· **İnsan Merkezli Dönüşüm ve Beceri Devrimi:** Otomasyon ve yapay zeka, birçok rutin fiziksel ve idari işi dönüştürecektir. Ancak, sistem tasarımı, bakımı, veri analizi, döngüsel ekonomi uzmanlığı ve stratejik karar alma gibi alanlarda yeni ve daha yüksek vasıflı işler ortaya çıkacaktır. İşgücünün bu geçişe hazırlanması için kitlesel yeniden becerilendirme (reskilling) ve ileri becerilendirme (upskilling) programları, dönüşümün sosyal sürdürülebilirliği için hayati önem taşımaktadır (World Economic Forum, 2023).

7. SONUÇ

Geleceğin sürdürülebilir ve akıllı tedarik zinciri, tek bir teknolojik sihirli değnekle inşa edilmeyecektir. Aksine, fiziksel, dijital ve biyolojik dünyaların kusursuz entegrasyonu olacak karmaşık bir sistemler bütünüdür. Bu dönüşümün merkezinde, kaynak verimliliği, şeffaflık, esneklik ve kullanıcı merkezilik değerleri yer alır.

Şirketler için bu dönüşüm, artık sadece bir “kurumsal sosyal sorumluluk” projesi değil, temel bir stratejik zorunluluk haline gelmiştir. İklim değişikliği, kaynak kıtlığı, tüketici talepleri ve düzenleyici baskılar, lineer modellerin riskini sürekli artırırken, döngüsel ve dijital olarak olgun tedarik zincirleri, yeni gelir akışları, maliyet avantajları ve pazar farklılaşması yaratacaktır.

Sonuç olarak, otonomi, dijital ikizler, e-mobilité ve döngüsel iş modelleri, bizi tedarik zincirlerinin basit bir “maliyet merkezi” olmaktan çıkıp, inovasyonun, müşteri sadakatinin ve gezegensel sağlığın merkezi haline geldiği

yeni bir çağa taşımaktadır. Bu yolculuk, cesur liderlik, disiplinler arası işbirliği ve uzun vadeli bir sistemik bakış açısı gerektirir. Gelecek, bu dört temel dayanağı bir araya getirerek kendi tedarik zinciri ekosistemlerini inşa etmeye bugünden başlayan vizyoner kuruluşların olacaktır.

KAYNAKÇA

- Amazon. (2022). Amazon's 2021 Sustainability Report. <https://sustainability.aboutamazon.com/2021-sustainability-report.pdf>
- BloombergNEF. (2023, November 26). Lithium-Ion Battery Pack Prices Hit Record Low of \$139/kWh. <https://about.bnef.com/insights/clean-energy/lithium-ion-battery-pack-prices-hit-record-low-of-139-kwh/>
- Bressanelli, G., Adrodegari, F., Perona, M., & Saccani, N. (2018). The role of digital technologies to overcome Circular Economy adoption barriers in supply chains: An exploratory study. 10th CIRP Conference on Industrial Product-Service Systems, 216-221. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.322>
- Circular. (2023). December 2023 Newsletter: A Paramount Year for Supply Chain Transparency. <https://circular.com/articles/2023-a-paramount-year-for-supply-chain-transparency>
- Daimler Truck AG. (2023, May 30). Start of series production soon: All-electric eActros 300 Tractor drives from Germany to Turkey. <https://www.daimlertruck.com/en/newsroom/pressrelease/start-of-series-production-soon-all-electric-eactros-300-tractor-drives-from-germany-to-turkey-52244831>
- DHL Group. (2022, March 9). 2021 ESG Presentation. https://www.responsibilityreports.com/HostedData/ResponsibilityReportArchive/d/OTC_DPSGY_2021.pdf
- Doharman., K., Gesing. B., Ward. J.. (2020). Digital twins in Logistics. DHL. <https://www.dhl.com/content/dam/dhl/global/core/documents/pdf/glo-core-digital-twins-in-logistics.pdf>
- Dünya Ekonomik Forumu. (2023, January 11). The global risks report 2023. <https://www.weforum.org/reports/global-risks-report-2023/>
- Ellen MacArthur Foundation. (2013, January 1). Towards the circular economy Vol.1: Economic and business rationale for an accelerated transition.

- <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an>
- European Commission. (2020, March 11). A new circular economy action plan: For a cleaner and more competitive Europe. <https://www.oneplanetnetwork.org/knowledge-centre/resources/new-circular-economy-action-plan-cleaner-and-more-competitive-europe>
- European Commission. (2022, March 30). Commission proposes new consumer rights and a ban on greenwashing. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_2098
- Fairphone. (2023). Long-lasting design. <https://www.fairphone.com/en/impact/long-lasting-design/>
- FedEx. (2021). FedEx Sets 2040 Carbon Neutral Target. <https://fedexcares.com/stories/advancing-climate-solutions/fedex-sets-2040-carbon-neutral-target>
- FedEx. (2022). One Year In, FedEx Continues to Build Toward a More Sustainable Future for All. <https://investors.fedex.com/news-and-events/investor-news/investor-news-details/2022/One-Year-In-FedEx-Continues-to-Build-Toward-a-More-Sustainable-Future-for-All/default.aspx>
- Grieves, M. (2014). Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. 2014. White Paper.
- International Energy Agency. (2021, May 18). Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- International Energy Agency. (2022, September). IEA Energy and Carbon Tracker 2022. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/iea-energy-and-carbon-tracker-2022>
- State of Green (2023, September 3). The worlds first industrial symbiosis: from waste stream to resource current.

<https://stateofgreen.com/en/solutions/the-worlds-first-industrial-symbiosis/>

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018, September 20). What a Waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050. World Bank.

<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>

Kempton, W., & Tomic, J. (2005). Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue. *Journal of Power Sources*, 144(1), 268–279. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.12.025>

Skredderberget, A. (2023). The world's first autonomous and zero emission ship. <https://www.yara.com/knowledge-grows/game-changer-for-the-environment/>

McKinsey & Company. (2023). The future of self-driving cars: Safer, smarter, and everywhere. <https://www.mckinsey.com/featured-insights/the-next-normal/self-driving-cars>

Michelin. (n.d.). Michelin Optimized Tire Performance. Retrieved December 9, 2025, from <https://connectedfleet.michelin.com/solution/optimise-your-tyres-performance/>

Requia, W. J., Mohamed, M., Higgins, C. D., Arain, A. (2018). How clean are electric vehicles? Evidence-based review of the effects of electric mobility on air pollutants, greenhouse gas emissions and human health. *Atmospheric Environment*, 185, 64-77.

Philips. (n.d.). Circular Lighting, ensuring sustainability. Retrieved December 15, 2025, from <https://www.lighting.philips.com/eg/support/circular-lighting>

Port of Rotterdam Authority. (n.d.). Smart Infrastructure. Retrieved December 1, from <https://www.portofrotterdam.com/en/port-future/smart-infrastructure>

- Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., & 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>
- SAE International. (2021, April 20). J3016_202104 - Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. https://saemobilus.sae.org/standards/j3016_202104-taxonomy-definitions-terms-related-driving-automation-systems-road-motor-vehicles
- Science Based Targets initiative (SBTi). (n.d.). Automotive and Land Transport. Retrieved December 11, from <https://sciencebasedtargets.org/sectors/transport>
- Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94, 3563–3576. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>
- Tekin, M., Öztürk, D., Bahar, İ. (2020). Akıllı Lojistik Faaliyetlerinde Blokzincir Teknolojisi. *Kent Akademisi*, 13(3), 570-583.
- Valdes-Depana, P. (2022, December 1). Tesla delivers its first electric Semi trucks promising 500 miles of range. <https://edition.cnn.com/2022/12/01/business/tesla-semi-pepsi>
- Uhlemann, E.(2016). Platooning: Connected Vehicles for Safety and Efficiency [Connected Vehicles], *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 11, no. 3, pp. 13-18, <https://doi.org/10.1109/MVT.2016.2583140>
- UPS. (2023, December 4). Doing good is good for business. <https://about.ups.com/us/en/our-impact/sustainability/sustainable-services/2022-ups-sustainability-report-.html>

- U.S. Department of Energy. (n.d.). All-Electric Vehicles. Retrieved December 13, from <https://afdc.energy.gov/vehicles/electric-basics-ev>
- Volvo Trucks. (n.d.). Electric trucks are a milestone on our sustainability journey. Retrieved December 7, from <https://www.dhl.com/global-en/delivered/innovation/volvo-electric-trucks.html>
- Nelson, J. (2023, September 19). Wing's delivery service in Logan, Australia. <https://australianaviation.com.au/2023/09/wing-expands-drone-delivery-in-logan/>
- World Economic Forum. (2021, January 21). Net-zero challenge: The supply chain opportunity. <https://www.weforum.org/reports/net-zero-challenge-the-supply-chain-opportunity>
- World Bank. (2018, September 20). Global waste to grow by 70 percent by 2050 unless urgent action is taken: World Bank report. <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2018/09/20/global-waste-to-grow-by-70-percent-by-2050-unless-urgent-action-is-taken-world-bank-report#:~:text=Driven%20by%20rapid%20urbanization%20and,in%202016%2C%20the%20report%20finds.>
- World Economic Forum. (2023, April 30). The future of jobs report 2023. <https://www.weforum.org/reports/the-future-of-jobs-report-2023/>
- Zipline. (2024, March 22). Zipline reaches 500,000 delivery milestone. <https://thebftonline.com/2024/03/22/zipline-hits-over-500000-medical-delivery-milestone>