

Dijital Çağda Üretim Yönetimi: Dönüşüm, Entegrasyon ve Sürdürülebilirlik

Editör: Zafer DURAN

Dijital Çağda Üretim Yönetimi: Dönüşüm, Entegrasyon ve Sürdürülebilirlik

Editör:

Zafer DURAN



Published by

Özgür Yayın-Dağıtım Co. Ltd.

Certificate Number: 45503

📍 15 Temmuz Mah. 148136. Sk. No: 9 Şehitkamil/Gaziantep

☎ +90.850 260 09 97

📞 +90.532 289 82 15

🌐 www.ozgurayinlari.com

✉ info@ozgurayinlari.com

Dijital Çağda Üretim Yönetimi: Dönüşüm, Entegrasyon ve Sürdürülebilirlik

Editor: Zafer DURAN

Language: Turkish

Publication Date: 2026

Cover design by Mehmet Çakır

Cover design and image licensed under CC BY-NC 4.0

Print and digital versions typeset by Çizgi Medya Co. Ltd.

ISBN (PDF): 978-625-8562-93-4

DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub1223>



This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0). To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>
This license allows for copying any part of the work for personal use, not commercial use, providing author attribution is clearly stated.

Suggested citation:

Duran, Z. (ed) (2026). *Dijital Çağda Üretim Yönetimi: Dönüşüm, Entegrasyon ve Sürdürülebilirlik*.

Özgür Publications. DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub1223>. License: CC-BY-NC 4.0

The full text of this book has been peer-reviewed to ensure high academic standards. For full review policies, see <https://www.ozgurayinlari.com/>



Ön Söz

Dijitalleşme, işletmeciliğin tüm alanlarında olduğu gibi üretim ve operasyonel yönetim alanında da köklü değişimlere yol açmaktadır. Nitekim günümüzde üretim yönetimi sadece kaynakların planlandığı ve süreçlerin denetlendiği bir faaliyet alanı olmaktan çıkarak veriye dayalı karar alma mekanizmalarının öne planda olduğu, sistemler arası entegrasyonun belirleyici hâle geldiği, gerçek zamanlı izleme ve müdahale kapasitesinin önem kazandığı stratejik bir yönetim alanına dönüşmüştür. Bu dönüşümle birlikte üretim süreçlerinin değerlendirilmesinde verimlilik ve maliyet kadar kesintilere karşı dayanıklılık, bilgi akışının güvenilirliği, tedarik ağlarıyla kurulan eşgüdüm ve çevresel etkilerin yönetimi gibi hususlar giderek daha fazla önem taşımaya başlamıştır. Bu durum üretim sistemlerinin daha bütüncül ve çok boyutlu bir bakış açısıyla ele alınmasını kaçınılmaz hâle getirmiştir. Elinizdeki bu eser, üretim yönetiminin içinde bulunduğu dönüşümü farklı boyutlarıyla ele alarak dijital çağın ortaya çıkardığı yeni tartışma alanlarına katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Kitabın konuya ilgi duyan okurlar için yararlı bir kaynak olmasını temenni eder, sorumluluklarını üstlenerek hazırladıkları bölümlerle kitabın oluşturulmasına katkı sağlayan tüm bölüm yazarlarına ve kitabın yayın sürecinde destek sağlayan yayınevi mensuplarına teşekkürlerimi sunarım.

İçindekiler

Ön Söz	iii
Bölüm 1	
Dijital Çağda Operasyon Yönetimi <i>Ramazan Eyüp Gergin</i>	1
Bölüm 2	
Dijital Çağda Üretim Yönetiminde Dönüşüm: Dijital Ürün Pasaportu (DPP) ve Sürdürülebilirlik <i>Yasemin Karabulut</i>	31
Bölüm 3	
Dijital Tedarik Zinciri ve Üretim Sistemlerinin Entegrasyonu <i>Fuat Karamahmutoglu</i>	55
Bölüm 4	
Tedarik Zincirinde Dijital Dönüşüm, Verimlilik, İzlenebilirlik, Güvenilirlik ve Sürdürülebilirlik <i>Hakan Ezici</i> <i>Muhammed Parlak</i>	89
Bölüm 5	
Sürdürülebilir Üretim Perspektifinden E-Lojistik: Dijital Entegrasyonun Çevresel ve Operasyonel Yansımaları <i>Mert Anıl Sarıcan</i>	107

Dijital Çağda Operasyon Yönetimi 8

Ramazan Eyüp Gergin¹

Özet

Bu çalışmada, operasyon yönetiminde üretim süreçlerinin organizasyonunun, kurumsal kaynak planlamasının, satın alma yönetiminin ve üretim kapasitesinin dijital çağda temel işlevleri ve rolleri ele alınmaktadır. Mevcut çalışmada sürekli iyileştirmeler kapsamında işletmelerin/kuruluşların üretim süreçlerinde yer alabilecek dijital teknolojiler incelenmektedir. Çalışmanın üçüncü kısmında işletmelerde/kuruluşlarda kurumsal kaynak planlamasının rolü ve önemi açıklanarak, kaynak tahsisi optimizasyonunda yararlanılan enstrümanlar tanımlanmaktadır. Çalışmanın dördüncü kısmında satın alma yönetimiyle ilgili konular, satın alma yönetiminin son yıllardaki artan önemi ve görevleri açıklanmaktadır. Ayrıca çalışmada işletmelerin/kuruluşların satın alma süreçlerinde yararlanılabilecek dijital teknolojiler ifade edilmektedir. Beşinci kısımda ise üretim kapasitesi kavramı tanımlanarak üretim kapasitesi verimliliğini optimize etmeyi amaçlayan üretim süreçlerinin analizlerinin aktarılması amaçlanmıştır. Son kısımda ise hem statik hem de dinamik anlamda operasyon yönetiminin önemi vurgulanmış, dijital çağda operasyon yönetiminin gerekliliği ifade edilerek çalışma tamamlanmıştır.

1. GİRİŞ

Günümüzde işletmeler/kuruluşlar son derece zorlu ve rekabetçi koşullar altında faaliyetlerini gerçekleştirmektedirler. 21. yüzyılda; artan dünya nüfusu ve endüstriyel gelişmelerin etkisiyle doğal kaynakların hızlı bir biçimde azalması, küresel ticaretin yaygınlaşması, bölgesel istikrarsızlık ve güvenlik sorunlarının ortaya çıkması, küreselleşme ve teknolojinin büyük bir hızla ilerlemesi gibi yaşanan gelişmeler (Tutak ve Koçer, 2023), işletmelerin/kuruluşların dijitalleşme adımlarını hızlandırmıştır. İşletmeler/kuruluşlar, dinamik bir şekilde gerçekleşen değişimlere uyum sağlamak, artan müşteri ihtiyaçlarına cevap vermek ve daha önceden bilinmeyip ortaya çıkan yeni

1 Dr. Öğr. Üyesi, Gümüşhane Üniversitesi, İrfan Can Köse Meslek Yüksekokulu, Ulaştırma Hizmetleri Bölümü, gergin@gumushane.edu.tr; 0000-0002-0968-9188

engellerle mücadele etmek zorundadırlar. İşletmeler/kuruluşlar dijitalleşme çabalarını hızlandırdıkça, sektörler genelinde yaygın bir dijital ilerleme çağı ortaya çıkmıştır (Gradillas ve Thomas, 2025).

21. yüzyılın en belirgin özelliklerinden biri olan yapay zekâ ve ileri teknoloji, gündelik yaşamdan askerî faaliyetlere, küresel ticaretten bilimsel aktivitelere kadar geniş çapta etkili olmuş, çağın belirleyici güç faktörlerinden biri haline gelmiştir (Tutak ve Özgen, 2025). Dijital gelişmeler askeri faaliyetlerden küresel ticarete kadar tüm süreçlere entegre edilmiş durumdadır. Dijital alanda meydana gelen bu gelişimler nedeniyle, işletmeler/kuruluşlar günümüz şartlarında rekabet avantajı elde edebilmek veya sahip olduğu avantajı koruyabilmek için her fırsatı değerlendirmelidir. İşletmelerin/kuruluşların dijital teknoloji yetenekleri hem operasyonel süreçlerini desteklemek hem de iş stratejilerini iyileştirmek için dijital teknolojilerden yararlanarak işletmelerin/kuruluşların geçmiş performanslarını daha iyi hale getirmelerini sağlamış ve günümüzde de varlıklarını sürdürebilmeleri için vazgeçilmez bir faktöre dönüşmüştür (Vilkas vd., 2024). Bu noktada, işletmelerin/kuruluşların rekabet avantajı yarışında üretim sürecinin verimliliğini en üst düzeye çıkarmak ve üretim kapasitesini arttırmaya yönelik durumlar stratejik bir önem kazanmıştır.

Tedariginde zorlukların yaşandığı kaynaklara ulaşımın ve bu kaynakların tahsisine yönelik uygun bir yaklaşımın geliştirilmesi günümüzde daha önemli hale gelmektedir. Ayrıca organizasyonların satın alma süreçlerine olan bakış açılarını değiştirmeleri gerekmektedir. Bu nedenle son zamanlarda operasyon yönetiminde dijitalleşme adımlarında işletmelerin/kuruluşların davranışlarında artan bir ilgi gözlemlenmektedir. Daha fazla işletme/kuruluş, daha fazla fayda sağlamak için bilgi, deneyim ve kaynak alışverişinde dijitalleşmeye yönelmektedir.

Altı bölümden oluşan çalışmanın bu kısmını takip eden bölümlerde sırasıyla dijital çağda üretim süreçlerinin organizasyonu ve temel prensipleri, dijital çağda kurumsal kaynak planlamasının önemi ve kapsamı, dijital çağda satın alma yönetimi, dijital çağda kapasite planlamasına yönelik olarak bilgiler sunulmuş, son aşamada ise sonuç kısmına yer verilerek çalışma tamamlanmıştır.

2. DİJİTAL ÇAĞDA ÜRETİM SÜREÇLERİNİN ORGANİZASYONU VE TEMEL PRENSİPLERİ

Günümüz iş dünyasında faaliyetlerini gerçekleştiren tüm işletmeler/kuruluşlar, giderek daha talepkâr hale gelen piyasa koşullarında etkili bir şekilde rekabet edebilmek için operasyonel açıdan verimliliklerini arttırmak istemektedirler. Dijital teknolojilerle gerçekleştirilen üretim süreçlerinde bir devrim olan Sanayi 4.0, Sanayi 5.0'in yolunu açmaktadır (Sajko vd., 2025).

Operasyonel açıdan verimliliklerini arttırmak isteyen işletmeler/kuruluşlar bu isteklerini yerine getirebilmek için temel olarak üretim süreçlerinin organizasyonunu ve tasarımını doğru yapmalıdırlar.

Dijital teknolojiler, toplumsal yaşamın, işletmelerin/kuruluşların ya da sektörel alanların her yönünü dönüştürmektedir. Bu dönüşüm, dijitalleşmeyle ilişkili değişimlerin ölçeğine, hızına, ve kapsamına bağlı olarak rekabet gücünü arttırmaktadır. Özellikle son sanayi devrimi üretim süreçlerinin organizasyonlarının dijital temele dayandırılması ihtiyacının artmasına neden olmuştur.

Operasyon yönetimi, üretimin ve ilgili süreçlerin verimli ve etkili bir şekilde yürütülmesi için stratejik bir öneme sahiptir (Sajko vd., 2025). Verimli bir üretim akışı, üretim süreçlerinin ustaca yönetimi bir diğer ifadeyle planlama, organizasyon ve kontrol ile sağlanabileceği iyi bilinmektedir. Ancak, aynı sektörde faaliyetlerini gerçekleştiren işletmelerin/kuruluşların büyüklük açısından benzerlik göstermeleri durumunda bile organizasyonel yapı, iş biçimi ve üretim teknikleri noktasında birbirlerine kıyasla ciddi farklılıklar gösterebileceği muhakkaktır. Bu sebeplerden ötürü, verimli bir üretim sistemi oluşturma etkinliği, basit ve tek bir yöntemle indirgenmesi zordur.

Dahası, son yıllarda ileri teknolojik çözümlerin artan gelişimi, üretim süreçlerinin karmaşıklığı ve yüksek teknoloji ürünlerinin yükselen önemi nedeniyle sanayi işletmelerinin yapısı ve özgünlüğü dinamik bir şekilde değişime uğramaktadır. Gerçekleşen sanayi devrimlerinde kilit rol üstlenen değişimler Şekil 1'de gösterilmektedir.

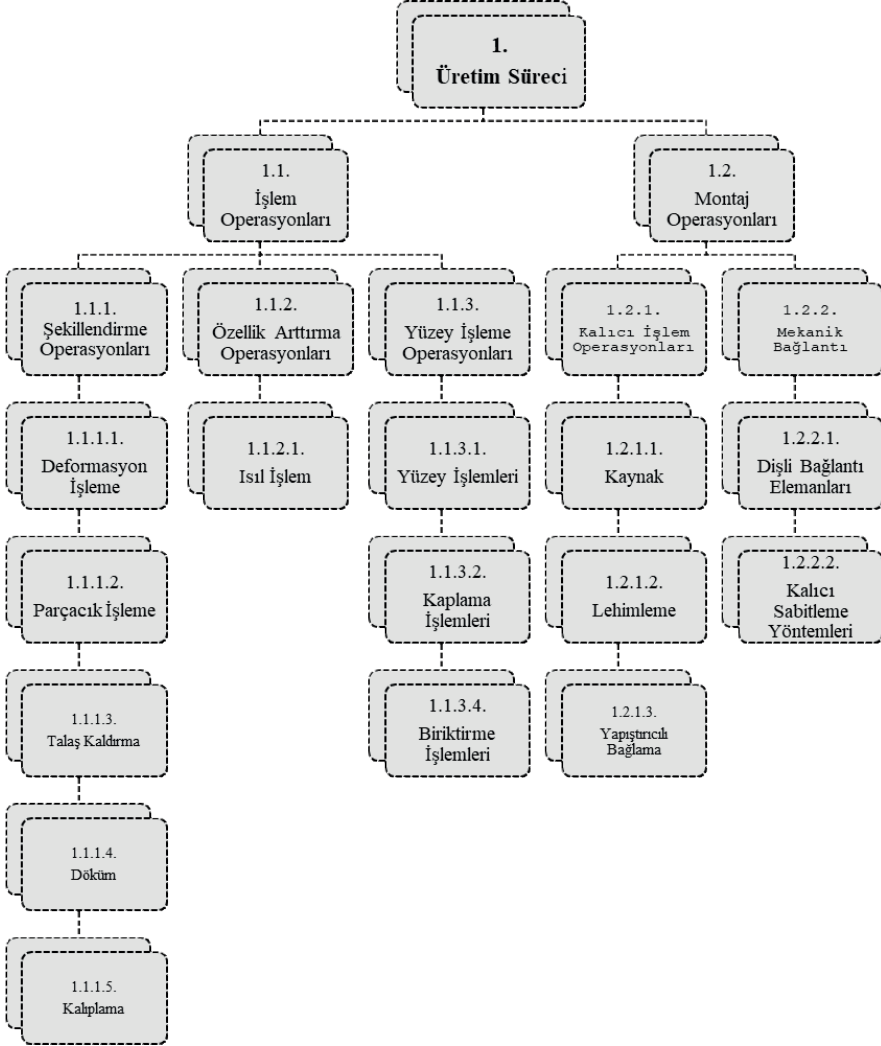
Şekil 1: Sanayi Devrimlerindeki Stratejik Değişiklikler

Sanayi 1.0	Sanayi 2.0	Sanayi 3.0	Sanayi 4.0
☐ Mekanizasyon	☐ Kitlesel Üretim	☐ Bilgisayarlar	☐ Siber Fiziksel Sistemler
☐ Su Gücü	☐ Montaj Hatları	☐ Otomasyon	☐ Nesnelerin İnterneti
☐ Buhar Gücü	☐ Elektrik	☐ Elektronik	☐ 3D Yazıcılar

İlgili literatürde üretim süreci kavramına yönelik olarak birçok farklı tanım bulunmaktadır. En genel ifadeyle üretim süreci bir ürünün üretimine yol açan bir dizi faaliyet olarak tanımlanabilmektedir. Üretim süreci, bir malzemenin amaçlanan kullanım için gerekli yapı ve özelliklere sahip son haline dönüştürülmesini sağlayan bilim ve teknolojidir (Mital vd., 2014). Üretim

süreci işlem operasyonları ve montaj operasyonları olmak üzere çeşitli faaliyetleri içermektedir. Üretim sürecine ait faaliyetler Şekil 2'de gösterilmektedir.

Şekil 2: Üretim Süreci



Kaynak: Mital vd., 2014

Üretim süreçlerinin organizasyonu, fiziki malların üretimi için işgücünü, alet ve araçları tek bir süreçte bir araya getirmenin yanı sıra ana, yardımcı ve hizmet süreçlerinin zaman ve mekân içerisinde rasyonel bir şekilde bir araya getirilmesidir (Indira, 2023). Üretim yapısının oluşturulmasının temel unsurlarından biri, üretim sürecinin tüm bileşenlerinin birbirine bağlı şekilde

çalışmasını sağlamaktır. Belirli üretim ve teknik koşullar için bazı süreçlerin uygulanmasına yönelik rasyonel bir şekilde organizasyonel yöntemlerin ve biçimlerin kapsamlı gerekçelendirmeleri gerekmektedir. Üretim sürecinin organizasyon ilkeleri üretim süreçlerinin oluşturulması, işletilmesi ve üretim sürecinin geliştirilmesinin gerçekleştirildiği başlangıç noktalarıdır.

Üretim süreçlerinin organizasyonunda önemli olan unsurlardan biri işgücünün organizasyonudur. İşgücünün organizasyonu ise emek ile üretim araçlarının entegre edilmesi olarak görülmektedir. Bu sürecin organizasyonu genel olarak üretim sürecinin biçimine bağlıdır. Üretim süreçlerinin organizasyonu, üretim süreçleri içerisinde yer alan unsurların zaman içerisinde bir araya getirilmesini de içermektedir. Bu durum üretim süreçlerinin organizasyonu için gereken çeşitli iş türlerinin gerçekleştirilmesinde ihtiyaç duyulan zamanın rasyonel bir biçimde birleştirilmesini, ilgili takvim ve planlama standartlarının belirlenmesini gerektirmektedir.

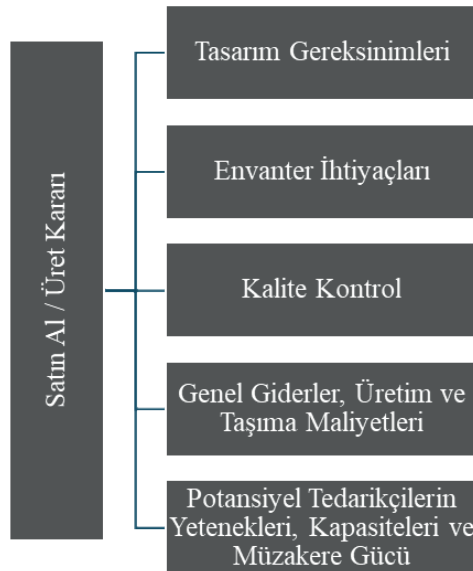
Üretim sürecinin organizasyonundaki bir diğer ilke farklılaştırma ilkesidir. Farklılaştırma ilkesi üretim sürecinin ayrı parçalara yani ayrı süreçlere ya da işlemlere bölünerek bu işlem ya da süreçlerin ilgili birimlere atanmasını kapsamaktadır. Üretim sürecinin organizasyonunda yer alan farklılaştırma ilkesinin zıttı olarak üretim süreçlerinin organizasyonunda birleştirme ilkesi de yer almaktadır. Birleştirme ilkesi belirli ürün türleri için üretim aşamasında faydalanan süreçlerin bir kısmının ya da tamamının aynı işyeri, üretim tesisi, şehir ya da bölge de gerçekleştirilmesi durumunu ifade etmektedir. Üretim süreçlerinin organizasyonunda bir ürünün yapısına göre, ekipman, üretim hacmi gibi unsurlara bakılarak üretim sürecinin tek bir birimde mi yoksa birkaç birimde mi üretiminin gerçekleştirileceğine bakılır. Yani farklılaştırma ya da birleştirme ilkesine odaklanılır.

Üretim süreçlerinin organizasyonunda yararlanılan bir diğer ilke yoğunlaşma ilkesidir. Yoğunlaşma ilkesi, teknolojik açıdan homojen ürünlerin üretiminde ya da homojen işlerin yürütülmesi için belirli üretim işlemlerinin işletme bünyesinde fakat farklı işyerlerinde, atölyelerinde veya üretim tesislerinde yoğunlaştırılması olarak ifade edilmektedir. Üretim süreçlerinin organizasyonunda yer alan diğer ilke uzmanlaşma ilkesidir. Uzmanlaşma ilkesi üretim süreçlerindeki unsurların çeşitliliğini sınırlamaya dayanmaktadır. Uzmanlaşma ilkesinin uygulanmasında her işyeri veya bölüme net olarak ifade edilmiş sınırlı bir iş, parça, ürün yelpazesi ya da iş ataması bulunmaktadır. Üretim süreçlerinin organizasyonunda uzmanlaşma ilkesinin tam tersi olarak evrenselleşme ilkesi de yer almaktadır. Evrenselleşme ilkesi ile her işyeri ya da üretim birimi için çok çeşitli parça veya ürünlerin üretimiyle veya heterojen üretim işlemlerinin gerçekleştirildiği üretim organizasyonu ifade edilmektedir.

Üretim süreçlerinin organizasyonunda bulunan bir diğer ilke orantılılık ilkesidir. Orantılılık ilkesi parçalara ayrılmış bir üretim sürecinin parçalarının zaman içerisinde birleştirilerek eş anlı olarak üretilmesi varsayımına dayanmaktadır (Karekatti ve Tiwari, 2021). Orantılılık ilkesi gereği işgücü, ekipman ve alan orantısı işletmenin tasarım aşamasında belirlenerek ilerleyen zamanlarda çalışan sayısının, işyeri kapasitesinin ve malzeme ihtiyaçlarının belirlenmesi sırasında hesaplamalar yapılarak gerekli iyileştirmeler gerçekleştirilir. Orantılılık ilkesinin üretim süreçlerinin organizasyonu sırasında göz ardı edilmesi üretimde darboğazların oluşmasına ve bu nedenle ekipman ve işgücü kullanımının kötüleşerek üretim döngülerinin süresinin uzayıp birikmiş işlerin oluşmasına sebep olacaktır. Orantılılık ilkesi, üretim sürecinin çeşitli unsurları arasındaki karşılıklı ilişkilerin sayısını tespit eden bir kurallar sistemi temelinde oluşturulur. Bu ilke, üretim sürecinin işlemlerinin ya da parçaların eş anlı olarak yürütülmesini gerektirmektedir.

İşletmelerin/kuruluşların uygulamada üret/satın al kararı, tasarım gereksinimleri, stok ihtiyaçları, kalite kontrolü, üretim, genel giderler ve nakliye maliyetleri, potansiyel tedarikçilerin yetenekleri, kapasiteleri ve müzakere gücü de dahil olmak üzere birçok faktörü içeren bir dizi tedarik kararıdır ve bazı durumlarda bazen üreticinin üretim mi yoksa satın alma mı programı olarak da adlandırılır (Masten, 1984). Satın al ya da üret kararı etkileyen faktörler Şekil 3'te gösterilmektedir.

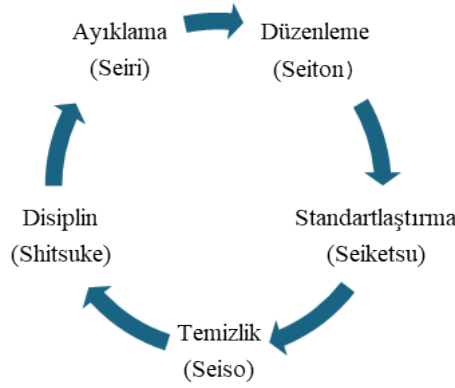
Şekil 3: Satın Alma veya Üretim Kararını Etkileyen Faktörler



Kaynak: Masten, 1984

Üretim sürecinin sürekli iyileştirilmesi oldukça önemli bir konudur. Üretim sürecinin sürekli iyileştirilmesinde kullanılan yöntemlerden biri de 5S yöntemidir. 5S yöntemi adından da anlaşılacağı gibi beş basit kuraldan oluşan bir yöntemdir. 5S yöntemi işletmelerin/kuruluşların faaliyet gösterdiği mekanları görsel perspektiften de kontrol etme imkânı sağlayan bir araçtır. 5S, Japonya'da popüler bir iş yeri yönetim girişimi olmasına rağmen dünya genelinde çeşitli sektörler tarafından da yaygın olarak benimsenmiştir (Stephen, 2023). Yöntemin ismi olan 5S, yöntemin tüm adımlarını uygularken faydalanılan beş adımı ifade etmektedir. Şekil 4'te 5S yöntemine ait olan döngü gösterilmektedir.

Şekil 4: 5S Metodolojisi



Kaynak: Stephen, 2023

Yapay zekanın yükseliş ve dijital teknolojilerin yaygınlaşmasıyla üretim süreçlerinin organizasyonlarında dijitalleşme çalışmaları artmıştır. Yapay zekâ, nesnelerin interneti ve diğer dijital teknolojiler çeşitli unsurlarla ilişkili olarak üretim süreçlerinin organizasyonundaki dijital dönüşüm iş uygulamalarının kapsamını ve sektörlerle ilişkili değişimin ölçeği ile hızını etkilerken, üretim süreçlerinin organizasyonundaki dijital dönüşümün başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesine yönelik zorlukları da içermektedir.

Özellikle Covid-19 pandemi krizinin ardından üretim süreçlerinin organizasyonunda dijital teknolojilerin önemi artarak dijital dönüşümün işletmelerdeki/kuruluşlardaki rolü stratejik bir konuma yükselmiştir. Üretim süreçlerinin organizasyonlarının geleceği yeni dijital araçların entegrasyonuna ve hızla gelişim gösteren dijital ortama sürekli uyum gösterme yeteneğine bağlıdır.

Üretim süreçlerinin organizasyonunda dijital dönüşüm tek bir seferde gerçekleştirilip tamamlanan bir süreç değildir. Bu süreç pazardaki yerini ve rekabet gücünü korumak isteyen işletmeler/kuruluşlar için stratejik bir vizyon, inovasyon, esneklik ve süreklilik ile gerçekleştirilmesi gereken bir süreçtir. Genel olarak üretim süreçlerinin organizasyonunda yararlanılan dijital araçlar aşağıdaki şekilde sıralanabilmektedir:

- **Yapay Zeka ve Makine Öğrenmesi:** Makinelerde yapay olarak zeka tasarımına ve geliştirilmesine odaklanan yapay zeka teknolojisi ile bilgisayarların insanların öğrenme biçimlerini taklit edebilmesi için matematiksel modellerden ulaşılan algoritmaların kullanımına odaklanan makinesi öğrenmesi, üretim süreçlerinin organizasyonunda, karmaşık süreçlerin otomatikleştirilmesi, tahmin odaklı analizlerin gerçekleştirilmesi, karar verme süreçlerinin optimizasyonu gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır.
- **Nesnelerin İnterneti (IoT):** Bu kavram veri toplanmasında faydalanan ve internetin kullanımıyla toplanan verilerin başka unsurlarla paylaşımına aracılık eden teknolojinin tanımlanması için kullanılmaktadır. Nesnelerin interneti üretim süreçlerinin organizasyonunda kullanılarak ekipmanlardan tedarik zincirlerine kadar gerçekleştirilen operasyonların gerçek zamanlı izlenmesine imkân sunup görünürlüğü ve verimliliğin artmasını sağlar.
- **Blok Zincir Teknolojisi:** Bu teknoloji, birbirine bağlı bloklar üzerinde gerçekleştirilen işlemleri depolayarak sürekli büyüme gerçekleştiren bir teknolojidir. Bu teknoloji aracılığıyla üretim süreçlerinin organizasyonunda blok zincir teknolojisinin kullanımı ile özellikle finans ve lojistik alanlarında işletmelere/kuruluşlara gerçekleştirdikleri operasyonlarda izlenebilirlik ve güvenlik imkânı sağlanmaktadır.
- **Gelişmiş Robotik ve Otomasyon Sistemler:** Gelişmiş robotik ve otomasyon sistemler üretim süreçlerinin organizasyonunda stratejik bir noktada yer almaktadır. Bu teknoloji yalnızca montaj hatlarında tekrarlayan görevlerde değil akıllı sistemleri de kapsamaktadır. İşletmeler/kuruluşlar bu teknolojiden yararlanarak tekrarlayan ya da oldukça karmaşık olan üretim süreçlerinde işletme maliyetlerini de düşürerek üretim süreçlerindeki doğruluğu arttırmaktadır.

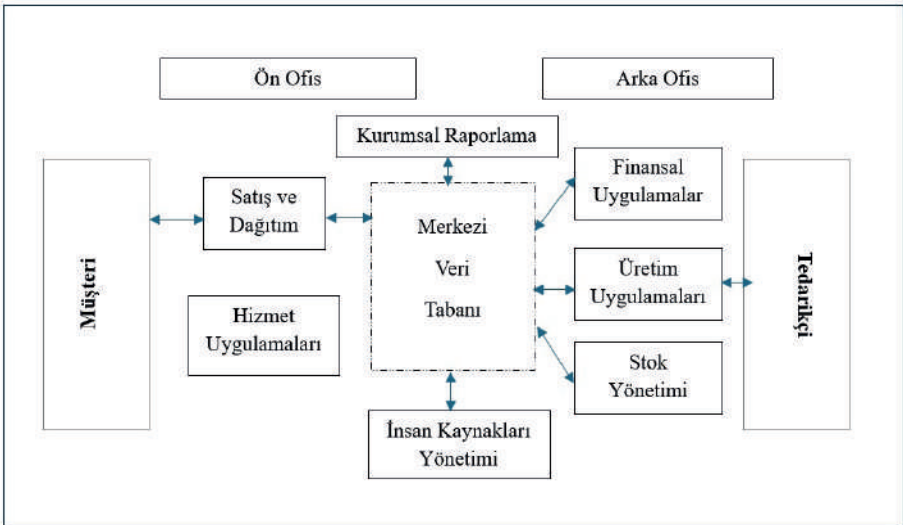
3. DİJİTAL ÇAĞDA KURUMSAL KAYNAK PLANLAMASININ ÖNEMİ VE KAPSAMI

Rekabette başarılı olmak ve önde kalmak için her işletme/kuruluş, yenilik yapmanın yanı sıra üretimi, verimliliği, hızı ve hizmeti geliştirmeye

çalışmaktadır (Fu vd., 2025). Değişen dünya düzeninde, rekabet avantajı elde etmek, müşteri gereksinimlerine kolayca uyum sağlamak ve finansal sonuçları artırmak isteyen işletmeler/kuruluşlar, genel olarak Kurumsal Kaynak Planlama (ERP) sistemini uygulamaya koymaya karar vermektedirler. Dijital çağda işletmelerin/kuruluşların ERP kullanımından kaçınması stratejik bir hata olarak kabul edilmektedir. İşletmeler/kuruluşlar ERP sistemini uygulayarak, hammadde bulunabilirliğine ilişkin bilgilere sıklıkla ulaşarak işletmenin/kuruluşun taleplerini karşılamaktadırlar (Fu vd., 2025). ERP sistemleri, kaynak yönetimlerinin verimli bir şekilde planlanmasına imkân sağlayan bir araç olarak işletmelere/kuruluşlara destek sunmaktadır.

Bu dijital araç ile, yönetim seviyelerinin tamamı veya bir kısmı desteklenebilmekte iken işletmelerin/kuruluşların kaynaklarının ve bu işletmelerin/kuruluşların içerisinde gerçekleşen süreçlerin optimizasyonu kolaylaşmaktadır. ERP sistemleri, birden fazla modüle sahip olan, fonksiyonel ve ölçeklenebilir sistemler olarak karşımıza çıkmaktadır. ERP sistemlerinin amacı, kuruluş ve paydaşlar arasında bilgi akışını düzene sokmak için tedarik zinciri yönetimi, insan kaynakları, üretim gibi ana fonksiyonel alanlardan ulaşılan bilgileri entegre ederek işletmelerde/kuruluşlarda yönetimi kolaylaştırmaktır. Günümüz iş dünyasında ERP'nin, işletmelerin/kuruluşların bilgilerini yönetmek için kullandığı temel teknoloji olduğuna inanılmaktadır. ERP sistemlerinin genel çerçevesi Şekil 5'te gösterilmektedir.

Şekil 5: ERP Sistemlerinin Temel Çerçevesi



Kaynak: Rashid vd., 2002

Bir kuruluşta ERP sisteminin uygulanması, iş süreçlerinin tanımlanmasından, ERP sistem tedarikçisinin seçilmesine hatta uygulama metodolojisinin seçimine kadar birçok karar alma işlemini gerektirmektedir. Metodolojik açıdan uygun olan sürecin seçimi, uygulama aşamasında bulunan her adımdan geçişi kolaylaştıracaktır. Günümüzde dünyasında ERP sistemleri içerisinde yaygın olarak sıklıkla kullanılan sistem metodolojileri Şelale (Waterfall) ve Çevik (Agile) metodolojileridir.

2001 yılında çevik yazılım geliştirme manifestosu ile isimlendirilen bir manifesto tasarlanarak çevik metodoloji kurulmuştur (Beck vd., 2001). Günümüzde çevik metodolojisi, esnekliği ve tüm ekiplerin eş zamanlı iş birliğini sağlaması nedeniyle giderek daha fazla yaygınlaşmaktadır. Çevik programlama metodolojisine dayalı ERP projelerinde görevlerin uygulanmasında aşağıdaki aşamalar izlenmektedir:

- Planlama,
- Tasarım,
- Geliştirme,
- Test etme,
- Yayınlama,
- Geri bildirim.

Çevik programlama metodolojisine dayalı ERP projelerinde uygulama aşamaları Şekil 6'da gösterilmektedir.

Şekil 6: Çevik (Agile) metodolojisi



Kaynak: Beck vd. 2001.

Şekil 6'da sunulan aşamalar, sistem uygulaması tamamlanana kadar tekrarlanan bir döngü oluşturmaktadır. Bu döngünün, geri bildirim bazında oluşturulan görevlerin düzeltiminde kullanılması oldukça önemlidir. Ancak sonraki döngüler, planlama aşamasındaki eksiklikler veya yanlışlıklardan kaynaklanan belirli bir görevin hatalarını sonsuza dek düzeltmek için tasarlanmamışlardır.

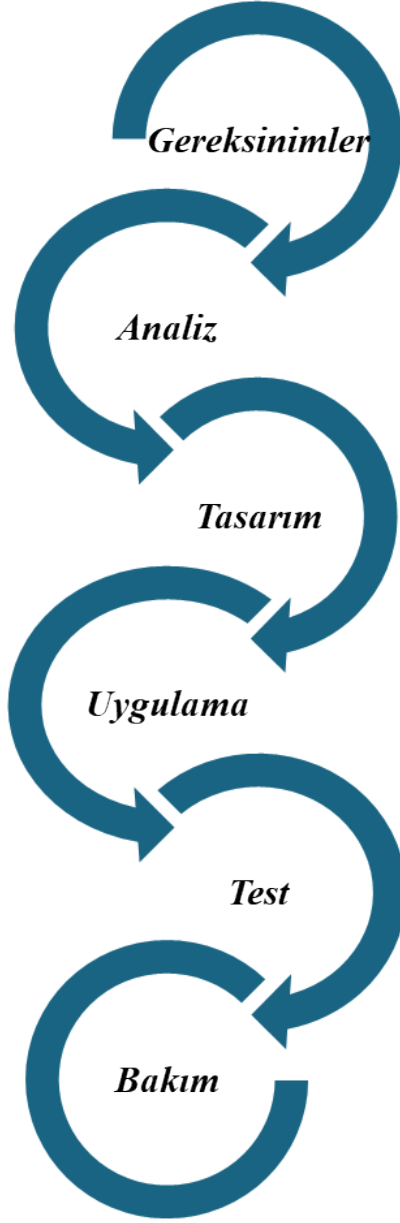
Şelale ya da bir diğer adıyla basamak metodolojisi 1987 yılında Royce tarafından geliştirilmiş olup, temel faaliyetlerin ayrı tasarım aşamaları olarak, birbiri ardına gerçekleştirilmesinden oluşmaktadır. Bu metodolojideki her faaliyet bir sonraki adımı oluşturmakta olup, bu faaliyetler aşağıdaki şekilde sıralanabilmektedir:

- Sistem planlaması,
- Sistem analizi,
- Sistem tasarımı,
- Uygulama,
- Test,
- Sistemin uygulanması
- Sistemsel bakım.

Eğer yukarıda bahsedilen aşamalardan herhangi biri tatmin edici olmayan bir ürün ortaya çıkarırsa, bu aşamaların sonunda tatmin edici bir ürün elde edene kadar sistem ardışık yinelemeler yaparak tekrarlanır.

Şelale (Waterfall) modeli ihtiyaçların anlaşılabilir, süreçlerin ise şeffaf olduğu durumlar için önerilmektedir. Bu durumun sebebi, modelde yer alan yinelemelerin maliyet açısından büyük bir iyileştirme maliyeti gerektirmesi, zaman açısından ise fazla zamana ihtiyaç duymasıdır. Şelale (Basamak) metodolojisi Şekil 7'de gösterilmektedir.

Şekil 7: Şelale metodolojisi



Kaynak: Royce, 1987

Kurumsal kaynak planlaması sistemlerinin yönetim etkisi iç faktörler ve dış faktörler olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Kurumsal kaynak planlamasının yönetim etkisi Şekil 8’de gösterilmektedir.

Şekil 8. ERP'nin Yönetim Etkisi



Kaynak: Bennani vd., 2024

Tipik bir ERP sisteminin modern işletmelerde/kuruluşlarda uygulanması kararı bir dizi adımı içermektedir. Bu adımlar şu şekilde sıralanabilmektedir (URL 1):

1. **Adım:** Kurumsal kaynak planlaması paketinin uygulanması için gereken ihtiyacın belirlenmesi.
2. **Adım:** İşletmenin/Kuruluşun mevcut durumunu değerlendirerek mevcut koşullar altında geçerli olan güçlü ve zayıf yönlerin anlaşılması.
3. **Adım:** ERP uygulamasının hayata geçirilmesinin ardından işletme/kuruluş ile ilgili olabilecek değişikliklere karar verilmesi.

4. **Adım:** Mevcut süreçlerde istenen sonuçlara ulaşmak için iş süreçlerinin yeniden yapılandırılması.
5. **Adım:** Piyasada bulunan çeşitli ERP paketlerinin incelenerek uygunluğunun değerlendirilmesi.
6. **Adım:** Uygulama için en uygun ERP paketinin belirlenmesi.
7. **Adım:** Seçilen ERP paketi için gerekli donanım ve ağların kurulumu.
8. **Adım:** Uygulama sürecinde yardımcı olacak danışmanların belirlenmesi.
9. **Adım:** ERP paketinin uygulanması.

Tipik bir ERP sisteminin modern işletmelerde/kuruluşlarda uygulanması kararı için gereken adımlar yukarıda sıralanmıştır. Bu adımlar detaylı bir biçimde incelenecek olursa;

Birinci adımda cevaplanması gereken temel sorular bulunmaktadır. Bu sorulardan bazıları şunlardır;

- Neden bir ERP paketi uygulanmalıdır?
- Uygulanacak olan ERP paketi karlılığı artıracak mı?
- ERP paketi ürün teslimat sürelerini kısaltabilir mi?
- ERP paketi kalite, maliyet, teslimat süresi ve hizmet açısından müşteri memnuniyetini nasıl artırır?
- ERP paketi ürün maliyetlerini düşürmeye yardımcı olacak mı?
- ERP paketi işletme cirosunu artırmaya ve aynı zamanda iş gücünü azaltmaya nasıl yardımcı olabilir?
- ERP paketi ile iş süreçlerini yeniden yapılandırmak mümkün olacak mı?

İkinci adımda İşletmenin mevcut durumunu anlamak için öncelikle çeşitli fonksiyonlar listelenmelidir. İşlem gerçekleştirmek için kullanılan süreçler ayrıntılı olarak listelenmelidir. İş süreçlerinin ayrıntıları, süreçlerin fonksiyonlarla eşleştirilmesiyle elde edilebilir. İkinci adımda sıralanması gereken temel fonksiyonlardan bazıları şunlardır:

- İş süreçlerinin toplam süresi,
- Mevcut senaryoda bulunan karar noktalarının sayısı,
- İş sürecinin departman/lokasyon sayısı,
- Bilgi akışı ve yönlendirilmesi,
- Mevcut raporlama noktalarının sayısı.

Üçüncü adımda kıyaslama (benchmarking) kavramı, elde edilen süreçlerin sektördeki en iyiler arasında yer almasını sağlamak için kullanılır. Kıyaslama, maliyet, kalite, hizmet gibi çeşitli faktörler üzerinden yapılır. Bu kavram, genel faydalar elde etmek için süreçleri optimize etmeyi mümkün kılar. Dördüncü adımda iş süreçlerinin yeniden yapılandırılması şu amaçlarla yapılır:

- İş süreçlerinin döngü süresinin kısaltılması,
- Karar verme noktalarının sayısının en aza indirilmesi,
- Bilgi akışını kolaylaştırılması ve istenmeyen bilgi akışının ortadan kaldırılması.

Beşinci adımda ERP paketlerinin değerlendirilmesi aşağıdaki kriterlere göre yapılır:

- Esneklik,
- Kapsam,
- Entegrasyon,
- En iyi iş uygulamaları,
- Yeni teknolojiler,
- ERP paketinin küresel varlığı,
- ERP paketinin yerel varlığı,
- ERP paketinin hedeflediği pazar,
- ERP paketinin fiyatı,
- ERP paketinin güncelliği,
- ERP paketinin uygulanma kolaylığı,
- ERP paketinin uygulama maliyeti,
- ERP paketinin uygulama sonrası destek mevcudiyeti.

Altıncı adımda ERP paketinin son halinin belirlenmesi, kritik faktörlerin matris analizi yoluyla karşılaştırılmasıyla gerçekleştirilebilir. Yedinci adım ise ilgili işlemlerin uygulama takvimine ve donanım bileşenlerinin ihtiyacına bağlı olarak aşamalı bir şekilde gerçekleştirilir. Sekizinci adımda ise danışman seçiminde dikkate alınan faktörler şunlardır;

- Beceri seti,
- Sektöre özgü deneyim,
- Danışman tutmanın maliyeti.

Son adım ise ERP paketinin uygulanmasında genel adımları içermektedir ve bu adımlar şu şekilde sıralanabilmektedir;

- Ekip oluşturma,
- Planın hazırlanması,
- İş süreçlerinin pakete eşleştirilmesi,
- Boşluk analizi,
- Özelleştirme,
- Kullanıcıya özel raporların ve işlemlerin geliştirilmesi,
- Mevcut sistemden veri yükleme,
- Test çalıştırmaları,
- Kullanıcı eğitimi,
- Paralel çalıştırma,
- Kullanıcı onayı,
- Yeni sisteme geçiş,
- Kullanıcı dokümantasyonu,
- Uygulama sonrası destek,
- Sistem izleme ve ince ayar.

Günümüz iş dünyasında hızla gelişen teknolojik ortamda işletmelerin/kuruluşların rekabetçi kalabilmeleri için dijital dönüşüm kritik bir gerekliliktir. Müşteri beklentilerini karşılayabilmek, rekabet avantajına ulaşmak, maliyet tasarrufu yapabilmek, çevikliği arttırmak ve güvenliği sağlamak için işletmeler/kuruluşlar dijital dönüşüm süreçlerini başlatmalıdırlar.

Kurumsal kaynak planlaması (ERP) sistemi, ortak bir veri ve süreç modeline sahip olan bütünleştirilmiş bir iş uygulama paketidir. ERP işletmelerin/kuruluşların uzun vadeli ve kaliteli gelişimlerini sağlamak için sahip olunan kaynakların kapsamlı ve sistematik bir şekilde yönetimi için gereklidir. ERP sistemleri geleceğe yönelik olup, kaynakların verimli kullanımını ve bilimsel dağılımını sağlayarak işletmelerin/kuruluşların gelecek için gelişim ihtiyaçlarının ve trendlerinin karşılanmasına imkân sunmaktadır.

Dijital dönüşüm kurumsal kaynak planlaması üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Dijital araçlar ile kurumsal kaynak planlaması daha güvenilir ve kapsamlı bir temelde gerçekleştirilerek işletmelerin/kuruluşların piyasa değişikliklerine daha hızlı tepki verebilmesine, tüketici taleplerine daha fazla

dikkat etmesine, kaynak dağılımlarında rasyonalitenin artmasına, rekabet gücünün yükseltilmesine ve kaynak kullanım oranının iyileştirilmesine imkân sağlamaktadır. Kurumsal kaynak planlamasında dijital araçların kullanılmasının çeşitli nedenleri bulunmaktadır. Bu nedenler aşağıdaki biçimde sıralanabilmektedir:

- Eski teknoloji,
- Kısıtlı işlevsellik,
- Entegrasyon zorlukları,
- Düşük kullanıcı deneyimleri,
- Bakım ve destek maliyetleri,
- İşletme zorlukları,
- Veri güvenliği.

4. DİJİTAL ÇAĞDA SATIN ALMA YÖNETİMİ

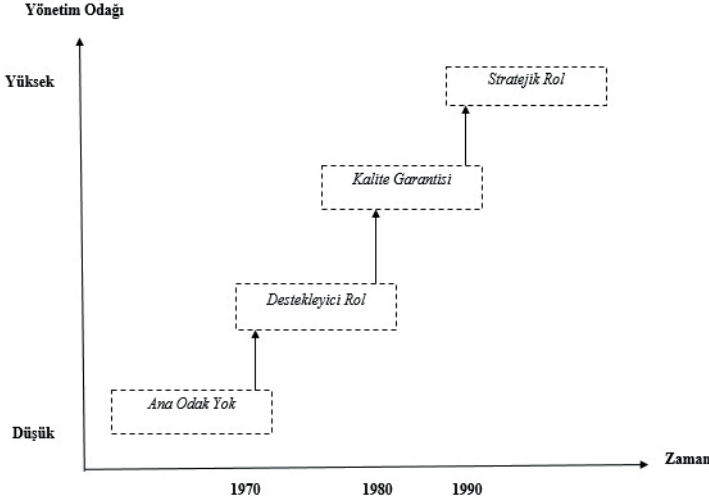
Küresel rekabet çağında ve imalat işletmelerinde toplam işletme maliyetleri içerisindeki satın alma maliyetlerinin artan payı göz önüne alındığında, satın alma süreçlerinin organizasyonu yeni bir önem kazanmaktadır. İşletmelerin/kuruluşların iş uygulamalarında, yöneticilerin satın alma alanına olan ilgisinde artış gözlemlenmektedir. Tedarik zinciri yönetimi çerçevesinde, satın alma yönetimi verimli ve etkili bir maliyet kontrolünün gerçekleştirilmesinde kritik bir rol üstlenmektedir (Firera vd., 2024).

Satın alma yönetimi, işletmelerin/kuruluşların stratejik ve idari hedeflerine katkı sunmak için tedarikçilerden kaynak ve mal edinimiyle ilgilenen bir fonksiyondur (Fung, 1999). Lojistik ve sermaye akışlarının önemli bir bileşeni olan satın alma yönetimi, bilgi akışının normal seyrinde ilerlemesini, teslimat sürelerine uyulmasını ve maliyetlerin düşürülmesini sağlamada önemli bir rol oynamaktadır (Zhenyuan vd., 2011). Satın alma ve tedarik yönetimi, çok katmanlı tedarik ağlarında çok sayıda paydaşla ilgilenmek için önemli, stratejik ve kritik bir iş faaliyeti olarak ön plana çıkmaktadır (Backstrand vd., 2019)

Satın alma kavramı, yeniden satış ya da tüketim için malzemenin, ekipmanın, parçanın, hizmetin veya bileşenin edinme sorumluluğunu ifade eden işlev olarak tanımlanmaktadır. Satın alma tanımı incelendiğinde, öncelikle kaynakların nasıl elde edildiğine odaklanıldığı görülmektedir. Özellikle dijital çağda dünyanın her bir noktasındaki tedarikçilere ulaşabilme imkanının varlığı işletmelerde/kuruluşlarda satın alma işlemlerinin rolünün yöneticiler tarafından daha fazla dikkat çekmesine sebep olmuştur. Günümüz iş dünyasında, satın alma işlemlerinin bir işletmenin/kuruluşun yönetiminde stratejik bir rol oynadığı

söylenilmektedir (Bedey vd., 2008). Satın alma yönetiminin tarihsel gelişimi Şekil 9'da sunulmaktadır.

Şekil 9: Satın Alma Yönetiminin Tarihsel Gelişimi



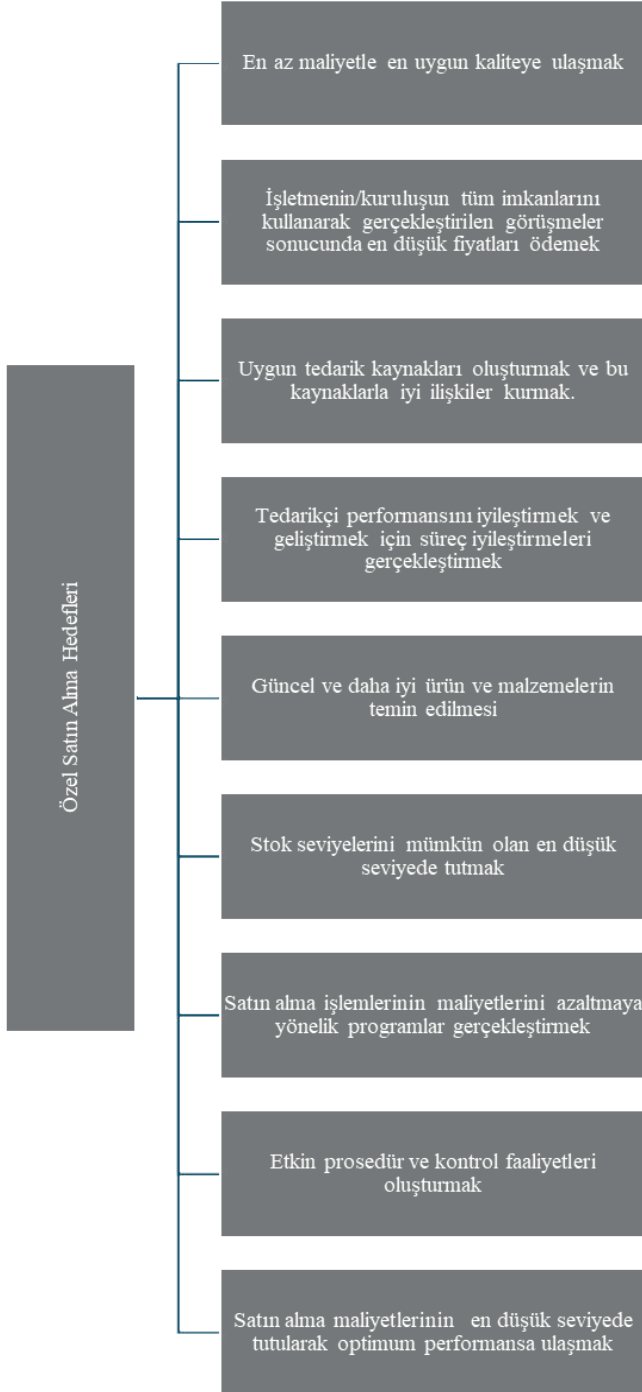
Kaynak: Bedey vd., 2008

Başarılı bir satın alma fonksiyonu için, işletmenin/kuruluşun bünyesinde bulunan her birim için hedefler belirlenerek bu hedeflere ulaşılması için özverili bir şekilde çalışılması gerekmektedir. İşletmenin/kuruluşun gelirlerindeki en büyük paya sahip olan satın alma birimi ise bu noktada sağladığı katkıları en üst seviyeye çıkarmalıdır. İşletmenin/kuruluşun genel performansına olan katkısını üst seviyelere taşıyabilmek için satın alma birimi aşağıdaki iki temel hedefe odaklanmalıdır (Pooler vd., 2004):

- İşletmenin/kuruluşun yürüttüğü faaliyetlerini devam ettirebilmesi için ihtiyaç duyulan malzeme, hizmet ve malların tedarikini gerçekleştirerek ekonomik arz sağlamak,
- İşletmenin/kuruluşun toplam maliyetinin kontrolünü verimli bir şekilde gerçekleştirerek toplam kara katkı sunmak.

Bu genel hedeflerin yanı sıra, satın alma birimleri tarafından bazı özel satın alma hedefleri de belirlenmelidir. Satın alma birimleri tarafından belirlenen özel satın alma hedefleri Şekil 10'da sunulmaktadır.

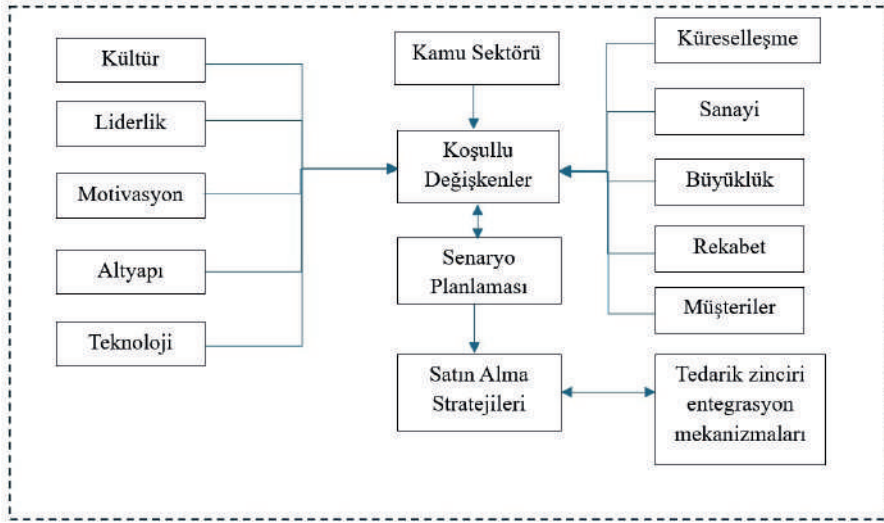
Şekil 10: Özel Satın Alma Hedefleri



Kaynak: Pooler vd., 2004

İşletmelerde/kuruluşlarda satın alma stratejilerini etkileyen çeşitli faktörler bulunmaktadır. İşletmelerin/kuruluşların satın alma stratejilerini etkileyen faktörler Şekil 11’de gösterilmektedir.

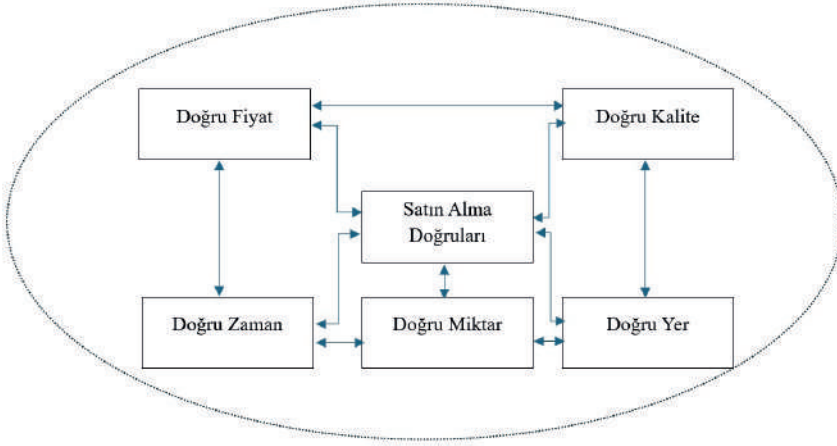
Şekil 11: Satın Alma Stratejilerini Etkileyen Faktörler



Kaynak: Quayle, 2006

İşletmelerde/kuruluşlarda gerçekleştirilen satın alma işlemlerinde, genel kabul görmüş doğrular bulunmaktadır. İşletmelerin/kuruluşların gerçekleştirdikleri satın alma faaliyetlerinde uyulması gereken doğrular satın almanın beş doğrusu olarak nitelendirilmektedir. Satın almanın beş doğrusuna ait bilgiler Şekil 12’de gösterilmektedir.

Şekil 12: Satın Almanın Beş Doğrusu



Kaynak: Quayle, 2006

Tüm işletmeler/kuruluşlar için geçerli olan tek bir satın alma organizasyonu bulunmamaktadır. Uygun bir satın alma organizasyon yapısı oluşturulurken, oluşturulacak olan yapının bulunacağı işletmenin/kuruluşun hedeflediği özel durumları belirlemek oldukça önemlidir. Yapılan satın alma işlemlerinin benzerliğinin çokluğu oluşturulacak yapının merkezileştirilme potansiyelini de arttırmaktadır. Gerçekleştirilen satın alma işlemlerinde benzerliğin az olması durumunda ise, oluşturulacak olan yapının merkezileştirilme durumu da o kadar az olmaktadır.

Satın alma yapıları genel olarak dört kategoride sınıflandırılabilir (Quayle, 2006). Bu sınıflandırma aşağıdaki biçimdedir:

- Tek ürün/Çoklu lokasyon operasyonları,
- Ürünlerin birbiriyle ilişkili olduğu çoklu ürün/çoklu lokasyon operasyonları,
- Birbirleriyle ilişkisiz ürünlerin yer aldığı çoklu ürün/çoklu lokasyon operasyonları,
- Her bölümünde çok katmanlı yapılar oluşturma imkânı bulunan, çok büyük, çok ürün/çok lokasyonlu operasyonlar.

Tek ürün/Çoklu lokasyon operasyonları: Her işletmenin/kuruluşun aynı ürünleri ürettiği durumlarda ihtiyaç duydukları süreçlerde benzerdir. Aynı ürünler için ihtiyaç duyulan hizmetlere ait talepler, genellikle ortak pazarlardan karşılanmaktadır. Bu sebeple, işletmelerin/kuruluşların satın alma güçlerinden

en fazla yararı sağlayabilmeleri ve karşılaşacakları problemlere ortak çözümler geliştirebilmeleri için merkezileştirilmiş bir satın alma yapısına gerek duyulur. Bu yapıda, satın alma işlemleri için işletmelerde/kuruluşlarda merkezi bir satın alma birimi bulunur. Bu satın alma birimi birçok ürünün tedarikinin sağlanabileceği işlemleri tek bir noktadan organize eder.

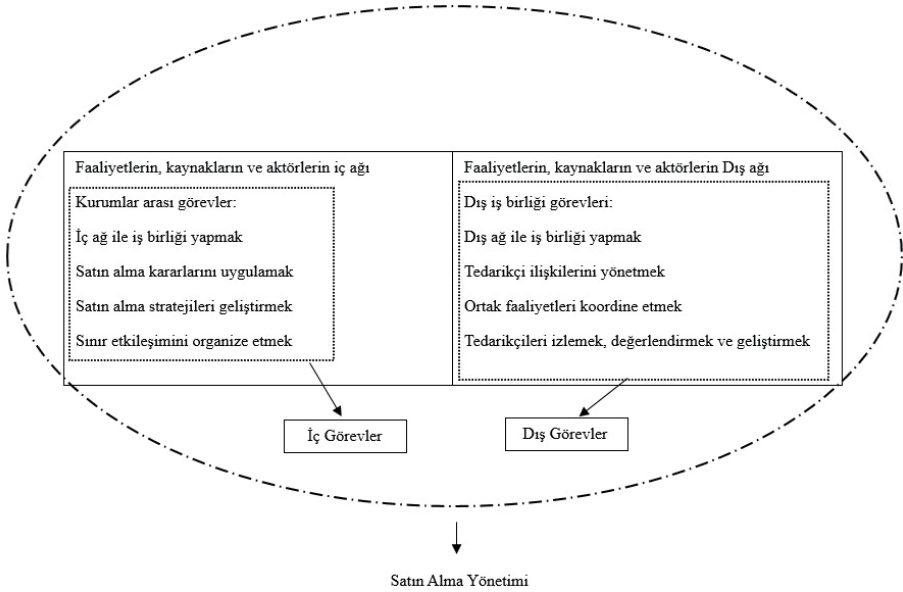
Ürünlerin birbiriyle ilişkili olduğu çoklu ürün/çoklu lokasyon operasyonları: Birden fazla ürün üretimi gerçekleştiren fakat üretilen ürünlerde kullanılan teknoloji ve malzemeler açısından benzerlik bulunan işletmelerin/kuruluşların satın alma işlemlerinde bu satın alma yapısından faydalanılabilmektedir. Bu satın alma yapısında merkezi bir satın alma birimi yeterli sayıda ortak ürün ve ilgili satın alma faaliyetleri ile uğraşmaktadır.

Birbirleriyle ilişkisiz ürünlerin yer aldığı çoklu ürün/çoklu lokasyon operasyonları: Üretim süreçlerinde birbirine benzemeyen malzemeler ve teknolojilerden faydalanan işletmeler/kuruluşlar bulunmaktadır. Bu tarz işletmeler/kuruluşlar için, satın alma işlemlerinde benzer problemlerin sayısı azdır. Bu nedenle bu tarz işletmelerde/kuruluşlarda merkezi bir satın alma biriminin mevcudiyeti çok fazla önem arz etmemektedir. Fakat, bu tarz satın alma organizasyonlarında, satın alma müdürleri satın alma yapısı içerisinde oldukça fazla sorumluluğa sahip oldukları için satın alma faaliyetlerinin planlamasında stratejik bir konumda yer almaktadırlar.

Her bölümünde çok katmanlı yapılar oluşturma imkânı bulunan, çok büyük, çok ürünlü/çok lokasyonlu operasyonlar: Çok büyük işletmelerde/kuruluşlarda satın alma birimlerinin birim içerisinde birden fazla katmana sahip bir organizasyon yapısı olabilmektedir. Bu tarz satın alma yapılarında, satın alma birimi satın alma müdürlerinin denetimi içerisinde yer almayken, bölgesel satın alma birimleri de bulunabilmektedir. Bu yapıya sahip satın alma birimlerinin en üst katmanında ise taleplerin benzerlik durumlarına bağlı olarak, diğer katmanlarda yer alan birimlerin gerçekleştirdikleri satın alma faaliyetlerini organize etmek adına kurumsal bir satın alma birimi bulunabilmektedir.

Satın alma fonksiyonu iç ve dış ağları kullanan kavramsal bir modeli kapsamaktadır. Şekil 13'te faaliyetleri, kaynakları ve katılımcıları kapsayan bir satın alma yönetim modeli gösterilmektedir. Satın alma yönetimi bu iki faaliyet alanını birleştirmektedir.

Şekil 13: Satın Alma Yönetiminin Kavramsal Modeli



Kaynak: Bedey vd., 2008

İç görevler, iç ağ içindeki iş birliğini, operasyonel satın alma kararlarını, satın alma stratejilerinin tanımlanmasını ve dış ağ ile etkileşimleri içermektedir. Satın alma fonksiyonu üç temel aşamada ifade edilebilmektedir. Bu aşamalar sırasıyla görüşmelerden önceki aşama, görüşmeler aşaması ve sözleşme imzalanması aşaması olarak temellendirilebilmektedir. Belirtilen aşamalardan bir sonraki aşamaya geçişin sağlanması için gerçekleştirilmesi gereken adımlar bulunmaktadır. Bu adımlar şu şekilde belirtilebilmektedir:

- İhtiyaçların belirlenmesi ve şartnamelerin geliştirilmesi,
- Gider miktarının belirlenerek potansiyel tedarikçiler ile potansiyel pazarların analiz edilmesi,
- Gerekli ayarlamaların tespit edilebilmesi için satın alma stratejisinin testinin gerçekleştirilmesi,
- Teklif belgelerinin oluşturulması,
- Tedarikçilere yönelik gerçekleştirilecek olan ön seçim,
- Tedarikçi seçimi ve sözleşme şartlarının görüşülmesi,
- Sözleşmenin imzalanması ve uygulanması,

- Tedarikler için yapılması gereken sınıflandırma, kayıt gibi iç işlemlerin gerçekleştirilmesi,
- İmzalanmış olan sözleşmelere yönelik olarak yapılan değerlendirmeler ve sonuçlar,
- Teslimat doğruluğu, teslimat miktarı, teslimat kalitesi, teslimatın zamanında yapılması durumlarının işletmenin/kuruluşun hem operasyonel hem de stratejik hedefleriyle uyumuna yönelik olan diğer şartların kontrollerinin gerçekleştirilmesi.

Son adım, ürünün yaşam döngüsü maliyetinin analizini ve alınan kararların değerine olan etkisini içermektedir. Ürün yaşam döngüsü analizinin amacı ise satın alma yönetiminin sürekli olarak iyileştirilmesidir. Bu adımlar işletmelerde/kuruluşlarda değer zinciri modeli aracılığıyla incelenebilmektedir.

Satın alma sürecinin temel aşamaları ve temel süreçlerin uygulanmasının mümkün olmadığı durumlarda ise yardımcı süreçlerden destek alınabilmektedir. Bu tarz durumlarda destek alınabilecek model Şekil 14'te gösterilmektedir.

Şekil 14: Satın alma yönetiminde değer zinciri modeli

Hedeflere ulaşmada tedarikin rolünün belirlenmesi			Kazanç
Tedarik stratejisi tasarımı			
Bilgi ve teknoloji sistemi			
Maliyet ve nakit yönetimi			
İnsan kaynakları yönetimi			
Risk yönetimi			
Görüşme öncesi aşama	Görüşmeler	Sözleşme performansı	

Kaynak: Kaufmann, 2002

Dijital teknolojilerin satın alma yönetimindeki rolü hem stratejik hem de çok yönlüdür. Satın alma yönetiminde faydalanılan temel dijital teknolojiler aşağıdaki biçimde sıralanabilmektedir:

- Yapay zekâ ve makine öğrenmesi,
- Blok zincir teknolojisi,
- Bulut tabanlı platformlar,
- Robotik süreç otomasyonları.

Yapay zekâ ve makine öğrenimi teknolojileri satın alma yönetiminde tahmin odaklı tedarikçi analizi, otomatik karar verme, talep tahmini gibi

çeşitli işlemlerin gerçekleştirilmesinde kullanılmaktadır. Blok zincir teknolojisi, tedarikçi ağlarında güveni arttıran, dolandırıcılığı azaltan, kayıtlarda ise şeffaflığı sağlayan bir dijital teknoloji olarak satın alma yönetiminde kullanılmaktadır.

Bulut tabanlı platformlar, satın alma verilerini merkezileştirerek tedarik zincirinde yer alan paydaşlara her yerden ve her noktadan gerekli bilgilere erişim imkânı sunarak satın alma yönetimi sürecine katkı sağlamaktadır. Robotik süreç otomasyonları ise sipariş işleme ve fatura işleme gibi satın alma yönetimi içerisinde tekrarlayan işlemlerin otomatikleştirilerek yapıp manuel müdahalelerin azaltılmasını sağlayan bir dijital teknoloji olarak yer almaktadır.

Genel olarak satın alma yönetimi içerisinde dijital teknolojilerin kullanımı hataların en aza indirilmesi, piyasada oluşabilecek olan dalgalanmalara karşı cevap verme çevikliğini artırması ve teslim sürelerini kısaltması sayesinde satın alma yönetiminin verimliliğinin artmasına katkı sunmaktadır.

5. DİJİTAL ÇAĞDA KAPASİTE PLANLAMA

Üretim kapasitesi bünyesinde birçok kavramı barınmakta olup her kavram dikkatle anlaşılmalıdır. Üretim kapasitesi kavramı içerisinde en yaygın olan kavramlar teorik üretim kapasitesi, pratik üretim kapasitesi, fiili üretim kapasitesi, atıl üretim kapasitesi ve optimal üretim kapasitesidir (Üreten, 2006).

Teorik üretim kapasitesi işletmenin/kuruluşun üretim sürecinde gecikme, arıza, bekleme ve darboğaz gibi herhangi bir aksama olmaması durumunda gerçekleştirebileceği üretim miktarını ifade etmektedir (Üreten, 2006). Teorik üretim kapasitesi işletmenin/kuruluşun ulaşabileceği en yüksek üretim miktarını ifade etmektedir.

Gerçek dünyada üretim süreçlerinde teorik üretim kapasitesine ulaşmak oldukça zordur. Herhangi bir aksamadan kaynaklı olarak gerçekleştirilemeyen üretim miktarı işletmenin/kuruluşun teorik üretim kapasitesinin altında kalmasına neden olacaktır. Bu durumda ortaya çıkan kapasite işletmenin/kuruluşun gerçek kapasitesidir ve pratik üretim kapasitesi olarak adlandırılmaktadır.

Pratik üretim kapasitesi işletmenin/kuruluşun her zaman üretebileceği ürün miktarını ifade etmekte iken fiili üretim kapasitesi ise işletmelerin/kuruluşların belirli bir süre zarfında üretim miktarının yeterli bir talep durumu karşısında satılan kısmı olarak tanımlanabilmektedir (Üreten, 2006).

Atıl üretim kapasitesi ise pratik üretim kapasitesi ile fiili üretim kapasitesi arasındaki farktan oluşan ve işletme/kuruluş tarafından yararlanılamayan kısım olarak tanımlanabilmektedir (Üreten, 2006). Atıl üretim kapasitesi, aylak üretim kapasitesi ya da boş üretim kapasitesi olarak ta adlandırılmaktadır.

Optimum üretim kapasitesi ise üretim birim başına en düşük maliyeti oluşturan üretim kapasitesini ifade etmektedir. İşletmelerin/kuruluşların üretim kapasiteleri optimum üretim kapasitesi seviyesinden uzaklaştıkça birim başına düşen sabit ve değişken maliyetlerin seviyesi artmaktadır.

Teorik üretim kapasitesi tanımına göre bir kereste fabrikasının gerçekleştirebileceği yıllık üretim miktarı 12.500 m³ ise bu kereste fabrikasının tamir ve bakıma girmeden, herhangi bir arızaya maruz kalmadan ve herhangi bir aksaklığa uğramadan yılda 12.500 m³ kereste üretimi yapabileceği anlaşılmaktadır.

Pratik üretim kapasitesi türünde ise teorik üretim kapasitesi 12.500 m³ olan bir kereste fabrikasının pratik üretim kapasitesi 10.500 m³ olabilmektedir. Pratik üretim kapasitesi ulaşılabilir ürün miktarını göstermektedir.

Fiili üretim kapasitesi türünde ise işletmenin/kuruluşun pratik üretim kapasitesinin yeterli talep durumunda satılan kısmı olduğu bilinmektedir. Bu durumda pratik üretim kapasitesi 10.500 m³ olan bir kereste fabrikasının gerçekleştirdiği kereste üretiminin yıllık olarak 9.500 m³'lük kısmı satılmış ise bu işletmenin/kuruluşun fiili üretim kapasitesi 9.500 m³'tür.

Fiili üretim kapasitesi 9.500 m³, pratik üretim kapasitesi 10.500 m³ olan bir kereste fabrikasında atıl üretim kapasitesinin varlığı söz konusudur. Bu durumda ilgili fabrikanın atıl üretim kapasitesi pratik üretim kapasitesinden fiili üretim kapasitesinin çıkarılması ile tespit edilir. Söz konusu değerlere göre kereste fabrikasının atıl üretim kapasitesi 10.500 m³-9.500 m³=1.000 m³ kereste olarak hesaplanmaktadır. Kapasite türlerinin matematiksel gösterimi aşağıdaki biçimdedir:

- Teorik Üretim Kapasitesi (TÜK) = Pratik Üretim Kapasitesi (PÜK) + Zorlanmış Kapasite (ZK)
- Pratik Üretim Kapasitesi (PÜK) = Fiili Üretim Kapasitesi (FÜK) + Atıl Üretim Kapasitesi (AÜK)
- Atıl Üretim Kapasitesi (AÜK) = Pratik Üretim Kapasitesi (PÜK) – Fiili Üretim Kapasitesi (FÜK)

Masa üretimi gerçekleştiren bir fabrikanın teorik üretim kapasitesi 85.000 adet masa, pratik üretim kapasitesi ise 55.000 adet masa olarak belirlenmiştir. Bu fabrikanın 2025 yılı içerisinde 40.000 adet masa üretimi gerçekleştirmesi durumunda fabrikanın atıl üretim kapasitesi aşağıdaki şekilde tespit edilmektedir:

$$\text{Yeterlilik Derecesi} = \frac{40.000}{55.000} \approx \%73$$

Atıl Üretim Kapasitesi = 55.000 – 40.000 = 15.000 adet masa.

İşletmeler/kuruluşlar açısından kapasite türlerinin hesaplanması yanı sıra çalışma derecesinin hesaplanması da önem arz etmektedir. Kapasite Kullanım Oranı olarak ifade edilen çalışma derecesi aşağıdaki formül aracılığıyla hesaplanmaktadır:

$$\text{Kapasite Kullanım Oranı} = \frac{\text{Fiili Kapasite}}{\text{Pratik Kapasite}}$$

Örneğin bir tekstil fabrikasının fiili üretim kapasitesi 500.000 metre kumaş ve pratik üretim kapasitesi ise 300.000 metre kumaş olduğu varsayılırsa, bu fabrikanın kapasite kullanım oranı %60, atıl üretim kapasitesi oranı ise %40 olarak hesaplanmaktadır.

6. SONUÇ

Dijitalleşme alanında son zamanlarda yaşanan gelişimler, işletmelerin/kuruluşların süreçlerinde de önemli değişimlerin gerçekleşmesine neden olmuştur. Dijital teknolojilerde yaşanan gelişimler ise bu değişimleri hızlandırarak operasyon yönetiminde yer alan faaliyetlerin bu dijital teknolojiler ile entegre edilmesine fırsat sağlamıştır. Dijitalleşme endüstriyel zincirde iş yapılma şeklini köklü bir şekilde değiştiren Sanayi 4.0'ın temel dönüştürücü unsurlarından biridir (Cenamor vd., 2017).

Dijitalleşen bir çağda, operasyon yönetiminin önemini koruyabilmesi için dijital teknolojilerle entegre edilmesi gerekmektedir. Operasyon yönetiminde yer alan faaliyetlerin dijital teknolojilerle entegre edilmesi durumunda işletmeler/kuruluşlar sektörde yer alan rakipleri üzerinde rekabet avantajı elde etmektedirler. Ayrıca operasyon yönetiminin dijitalleştirilmesi her geçen gün daha stratejik bir noktaya dönüşmekte, bu durum ise işletmelerin/kuruluşların başarısını doğrudan etkilemektedir.

Günümüz dünyasında üretim sistemleri ciddi anlamda yüksek teknoloji içeren üretim süreçleriyle şekillenmektedir. Bu bağlamda işletmelerin/kuruluşların üretim süreçlerini dijital araçlarla entegre ederek dijitalleştirilmiş faaliyetlerden oluşan şeffaf, esnek ve ölçeklenebilir bir üretim sistemine dönüştürmeleri gerekmektedir. Bu dönüşüm herhangi bir işletmenin/kuruluşun tüm akışlarının dönüşümüne ve dijitalleştirilmesine dayalı bir iş modelinin oluşturulmasını içermektedir.

Dijitalleşme teknolojileri içerisinde yapay zekâ, robotik süreç otomasyonu, blok zincir ve nesnelerin interneti gibi çeşitli dijital teknolojiler yer almaktadır. Bu dijital teknolojilerin operasyon yönetiminde kullanılması çeşitli avantajlar

sağlayabilmektedir. Dijital teknolojilerin kullanımıyla işletmeler/kuruluşlar, satın alma süreçlerini yeniden yapılandırabilmekte, iş ilişkilerinin önemini arttırabilmekte ve daha iyi planlama yeteneğine sahip olabilmektedir. Ayrıca operasyon yönetiminin dijitalleşmesi, işletmelere/kuruluşlara rekabet potansiyellerinin güçlenmesi, karşılıklı ilişkilerin ve işlemlerin değerlerinin artması, gelişim fırsatlarının genişletilmesi, kaynak tahsisinde optimizasyonun sağlanması, maliyetlerin azaltılması, üretimde etkinliğin ve verimliliğin gerçekleştirilmesi gibi geniş bir fayda yelpazesi sunmaktadır.

Kaynakça

- Backstrand, J., Suurmond, R., Raaij, E.V., Chen, C. (2019). "Purchasing Process Model: Inspiration for Tahin Purchasing and Supply Management". *Journal of Purchasing and Supply Management*, 25, 1-11.
- Beck, K., Beedle, M., Van Bennekum, A., Cockburn, A., Cunningham, W., Fowler, M., ... Jeffries, R. (2001). "Manifesto for Agile Software Development". <https://agilemanifesto.org/iso/en/manifesto.html> adresinden erişildi.
- Bedey, L., Eklund, S., Najafi, N., Wahren, W., Westerlund, K. (2008). "Purchasing Management". *Chalmers: Department of Technology Management and Economics*.
- Bennani, H., Outseki, J., Benhaddouch, M. (2024). "The Influence of Enterprise Resource Planning Systems on the Management Control Function in Large Companies". *Journal of Governance and Regulation*, 13 (4), 144-154.
- Cenamor, J., Sjödin, D.R., Parida, V. (2017). "Adopting a Platform Approach in Servitization: Leveraging the Value of Digitalization". *International Journal of Production Economics*, 192, 54-65.
- Firera, Al Musadieq, M., Solimun, Hutahayan, B. (2024). "The Impact of Purchasing and Inventory Performance on Sustainable Financial Performance with Fiscal Term as a Moderating Factor (A Case Study from Oil and Gas Industry in Indonesia)". *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 10, 1-8.
- Fu, W., Ali, T., Hussain, Y., Asif, M. (2025). "Advancing Environmental Sustainability through Enhanced Enterprise Resource Planning and Green Supply Chain Integration: Evidence from the Manufacturing Sector". *Journal of Environmental Management*, 391, 1-15.
- Fung, P. (1999). "Managing Purchasing in a Supply Chain Context-Evolution and Resolution". *Logistics Information Management*, 12 (5), 362-366.
- Gradillas, M., Thomas, L. D. W. (2025). "Distinguishing Digitization and Digitalization: A Systematic Review and Conceptual Framework". *Journal of Product Innovation Management*, 42(1), 112-143.
- Indira, A. (2023). "Main Principles of Organization of Production Process in Modern Conditions in Developing Production Organization". *International Scientific and Practical Conference -Economic Sciences and Management in the Modern World*, 2, 7-12.
- Karekatti, C., Tiwari, M. (2021). "Lean Tools in Apparel Manufacturing". *Process Balancing*, 257-289.
- Kaufmann, L. (2002). "Purchasing and Supply Management-A Conceptual Framework". In: Hahn, D., Kaufmann, L. (eds) *Handbuch Industrielles Beschaffungs Management*. Gabler Verlag, Wiesbaden.

- Masten, S. E. (1984). "The Organization of Production: Evidence from the Aerospace Industry". *The Journal of Law and Economics*, 27(2), 403-417.
- Mital, A., Desai, A. Subramanian, A., Mital, A. (2014). "Product Development: A Structured Approach to Consumer Product Development, Design, and Manufacture". *Elsevier*, Amsterdam, Netherlands.
- Pooler, V.H., Pooler, D.J., Farney, S.D. (2004). "Global Purchasing and Supply Management: Fulfill the Vision". *Kluwer Academics Publishers*, Boston, USA.
- Quayle, M. (2006). "Purchasing and Supply Chain Management: Strategies and Realities". *IRM Press*, Hershey, USA.
- Rashid, M.A., Hossain, L., Patrick, J.D. (2002). "The Evolution of ERP Systems: A Historical Perspective". *Idea Group Publishing*, 1-16.
- Royce, W. W. (1987). "Managing the Development of Large Software Systems: Concepts and Techniques." *Proceedings of the 9th International Conference on Software Engineering*, 328-338.
- Sajko, T., Koch, V., Treul, S., Pacher, C., Zunk, B.M. (2025). "Identifying Competences of Engineers in the Context of Operations Management: A Literature Overview". *Procedia Computer Science*, 253, 1760-1769.
- Stephen, C.H.N. (2023). "The Role of Perceived Organizational Supports and Management Nationality amid Physical Workplace's Planned Quality Change". *Asia Pacific Management Review*, 28, 132-145.
- Tutak, E., Koçer, G. (2023). "21. Yüzyıl Deniz Gücünün Askeri ve Ticari Perspektiften Analizi İçin Yeni Bir Yaklaşım Önerisi: Türkiye Örneği". *Akdeniz İİBF Dergisi*, 23 (1), 1-17.
- Tutak, E., Özgen, C. (2025). "İnsansız Deniz Araçları Çağı: Rusya-Ukrayna Savaşı'nda Alınan Dersler Kapsamında Bir Değerlendirme". *Güvenlik Bilimleri Dergisi*, 14 (1), 1-26.
- URL 1 <https://cag.gov.in/uploads/media/PC-03-ERPOerview-I-CAI-20210331115403.pdf> adresinden erişildi.
- Üreten, S. (2006). "Üretim/İşlemler Yönetimi-Stratejik Kararlar ve Karar Modelleri". *Gazi Kitabevi*, 5. Baskı, Ankara.
- Vilkas, M., Stefanini, A., Ghobakhloo, M., Grybauskas, A. (2024). "Digital Technology- Enabled Capability Development Pathways". *Computers & Industrial Engineering*, 196, Article 1-13.
- Zhenyuan, J., Xiaohong, L., Defeng, J., Yuanzhe, L. (2011). "Research and Development of Purchase Management System for Chinese Medium and Small Manufacturing Enterprises". *International Journal of Industrial Engineering*, 18 (3), 140-151.

Dijital Çağda Üretim Yönetiminde Dönüşüm: Dijital Ürün Pasaportu (DPP) ve Sürdürülebilirlik

Yasemin Karabulut¹

Özet

Dijital Ürün Pasaportu (DPP), bir ürünün yaşam döngüsü boyunca hammadde tedarikinden üretim, kullanım ve ömür sonu yönetimine kadar) çevresel ayak izi, malzeme bileşimi, geri dönüşüm süreçleri ve sürdürülebilirlik performansı gibi kritik verileri merkezi bir dijital platformda toplayan, depolayan ve ilgili tarafların yetki düzeylerine göre erişebildiği standartlaştırılmış bir dijital sistemdir. Avrupa Birliği Yeşil Mutabakatı ve Sürdürülebilir Ürünler İçin Eko-Tasarım Yönetmeliği (ESPR) kapsamında geliştirilen bu araç, “Endüstri 4.0”ın temel bileşenleri olan nesnelerin interneti, yapay zekâ, büyük veri ve bulut bilişim teknolojileriyle entegre çalışarak ürünlerin dijital bir kimlik kazanmasını sağlamakta; üretim süreçlerinde anlık izlenebilirlik, kalite kontrol, kaynak verimliliği ve atık yönetimi gibi alanlarda önemli avantajlar sunmaktadır.

Bu çalışmada, Dijital Ürün Pasaportu kavramı mevcut literatür doğrultusunda kavramsal bir zeminde ele alınmıştır. Çalışma kapsamında; DPP’nin tanımı, teknik altyapısı, yasal çerçevesi ve üretim süreçlerine entegrasyonu incelenmektedir.

1. GİRİŞ

Endüstri 4.0 bileşenleriyle ivme kazanan dijital dönüşüm, 21. yüzyılda üretim paradigmasının yeniden tanımlanmasına yol açacak köklü bir değişim sürecini başlatmıştır. Bu değişimin en somut yansımalarından biri olarak ortaya çıkan Dijital Ürün Pasaportu (DPP), sürdürülebilirlik, şeffaflık ve döngüsel ekonomi hedefleri doğrultusunda ürünlerin yaşam döngüsü boyunca izlenebilirliğini sağlayarak geleneksel üretim anlayışının yarattığı çevresel tahribatın önlenmesinde kritik bir rol üstlenmektedir (Gabaçlı, Uzunöz, 2017).

¹ Doktora Öğrencisi, Atılım Üniversitesi, SBE, İşletme A.B.D.,
yasemin.karabulut2506@gmail.com, ORCID ID: 0009-0009-1606-3966

Sanayi Devrimleriyle birlikte mekanik güçten elektrığe, oradan da otomasyon sistemlerine evrilen üretim yapıları, özellikle 20. yüzyıl boyunca “*ne kadar çok üretirsek o kadar başarılıyız*” anlayışını benimseyen lineer (doğrusal) bir ekonomi modelini (al-kullan-at) hâkim kılmıştır. Ancak küresel ölçekte artan çevre kirliliği, hızla tükenen doğal kaynaklar, iklim krizi ve atık sorunları, bu geleneksel üretim anlayışının sorgulanmasına neden olmuştur. İşte tam bu noktada, 21. yüzyılın başlarından itibaren hız kazanan dijital dönüşüm, üretim süreçlerine sadece hız ve verimlilik kazandırmakla kalmamış, aynı zamanda bu küresel sorunlara çözüm üretebilecek bir paradigma değişiminin de önünü açmıştır.

Endüstri 4.0 olarak adlandırılan bu yeni dönemde; nesnelerin interneti (IoT), yapay zekâ, büyük veri ve bulut bilişim gibi dijital teknolojiler, üretim hatlarını akıllı fabrikalara dönüştürmektedir (Pamuk, Soysal, 2018; Ata, 2024). Bu dönüşüm, üretim süreçlerinde benzeri görülmemiş bir şeffaflık, izlenebilirlik ve esneklik sağlarken, beraberinde yeni bir üretim felsefesini de getirmiştir: Sürdürülebilirlik ve Döngüsel Ekonomi. Artık üretim yönetiminin temel hedeflerinden biri, sadece bugünün ihtiyaçlarını karşılamak değil, gelecek nesillerin kaynaklarını da koruyarak, atıkları minimize eden ve kaynakları verimli kullanan bir sistem inşa etmektir (Avrupa Yeşil Mutabakatı, 2021). Dijital teknolojiler, bu döngüsel ekonominin hayata geçirilmesinde en büyük yardımcı konumundadır (Gabaçlı, Uzunöz, 2017).

Bu kapsamda ortaya çıkan en önemli dijital araçlardan biri hiç şüphesiz Dijital Ürün Pasaportu (DPP) kavramıdır. Dijital Ürün Pasaportu (DPP), bir ürünün tüm yaşam döngüsü boyunca sürdürülebilirlik, döngüsellik ve yasal uyum bilgilerini saklayan ve paylaşılan benzersiz bir dijital belgedir. Avrupa Birliği’nin Sürdürülebilir Ürünler İçin Eko-Tasarım Yönetmeliği (ESPR) kapsamında zorunlu hale gelen bu sistem, fiziksel bir ürünle doğrudan bağlantılı olan kapsamlı bir “*dijital kimlik kartı*” işlevi görür. Geleneksel üretim anlayışında bilgi akışı genellikle üretici ile ilk alıcı arasında sınırlı kalırken, (DPP), geleneksel sistemlerde bilginin kopukluğuna yol açan sınırları ortadan kaldırarak verinin tüm değer zinciri boyunca kesintisiz biçimde akmasını sağlamaktadır. Bu dijital sistem, bir ürünün bileşenlerinden kimyasal içeriğine, onarım kapsamından bertaraf yöntemlerine kadar geniş bir yelpazedeki detaylı verileri bünyesinde barındırarak, kaynak verimliliğini optimize eden kapsamlı bir veri seti sunmaktadır (Kılıç, Kurgun, 2025). Bu sistem, özellikle imalat süreçlerinde karmaşık bilgi eksikliklerini gidermeyi amaçlarken, ürünlerin çevresel etkilerini minimize eden şeffaf bir yönetim mekanizması oluşturmaktadır (Wicaksono vd., 2025). Dolayısıyla Dijital Ürün Pasaportu, sadece bir teknoloji uygulaması değil, aynı zamanda üretimde şeffaflık, hesap verebilirlik ve sürdürülebilirliğin somut bir göstergesi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Türkiye gibi üretim ve ihracat odaklı büyüyen ekonomiler için, 2026 yılından itibaren Avrupa Birliği pazarına girişte zorunlu hale gelecek olan uygulaması hem bir uyum zorunluluğu hem de rekabet avantajı elde etme fırsatı sunmaktadır. Ancak yerli literatürde DPP kavramını üretim yönetimi, sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi perspektifinden bütüncül bir şekilde ele alan çalışmaların sayısı oldukça sınırlıdır.

Bu çalışmada, dijital dönüşümün üretim yönetimine getirdiği yenilikler çerçevesinde Dijital Ürün Pasaportu (DPP) kavramı detaylı bir şekilde ele alınacaktır. DPP'nin tanımı, teknik altyapısı, üretim süreçlerine entegrasyonu ve özellikle sürdürülebilirlik ile döngüsel ekonomi hedeflerine ulaşmadaki kritik rolü incelenecektir.

Bu çalışmanın temel amacı, son yıllarda döngüsel ekonomi ve sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda önemi giderek artan Dijital Ürün Pasaportu (DPP) kavramını üretim yönetimi ekseninde incelemek ve kavramsal bir çerçeve sunmaktır. Çalışmanın kapsamı; DPP'nin tanımı, temel teknik bileşenleri, yasal altyapısı ve özellikle üretim süreçlerine (*kalite kontrol, kaynak verimliliği, atık yönetimi*) entegrasyonu ile sınırlandırılmıştır. Konunun çok geniş bir teknolojik altyapıya (*örneğin yazılım kodlamaları veya donanım mühendisliği detaylarına*) sahip olması nedeniyle, çalışma daha çok yönetsel ve sürdürülebilirlik perspektifinde tutulmuştur. Çalışmada yöntem olarak nitel araştırma desenlerinden “*kavramsal inceleme* ve “*betimsel literatür taraması*” benimsenmiştir. Bu doğrultuda, ulusal ve uluslararası akademik veri tabanlarında yer alan güncel makaleler, sektörel raporlar ve yayınlar incelenmiştir. Elde edilen veriler; üretim yönetimi, sürdürülebilirlik ve dijital dönüşüm bağlamında sentezlenerek okuyucuya bütüncül bir perspektifle sunulmuştur. Bu çalışmanın yazım sürecinde, metnin dil ve anlatımının iyileştirilmesi, kaynakların düzenlenmesi ve bazı alt başlıkların yapılandırılması amacıyla yapay zekâ tabanlı bir dil modeli “*Jenni.ai*” ve “*Nebooklm*” kullanılmıştır. Çalışmanın tüm akademik içeriği, kavramsal çerçevesi, analizler ve sonuçlar yazara ait olup, yapay zekâ yalnızca yardımcı bir araç olarak kullanılmıştır. Çalışma etik ilkelere uygun şekilde hazırlanmıştır.

2. ÜRETİMDE DİJİTAL DÖNÜŞÜM, ENDÜSTRİ 4.0 VE TEMEL BİLEŞENLERİ

2.1. Geleneksel Üretim Anlayışından Dijitalleşmeye: Tarihsel Evrim ve Dönüşüm Dinamikleri

Üretim sistemlerinin tarihsel gelişimi, enerji ve bilgi işleme teknolojilerindeki dönüşümler etrafında şekillenen üç sanayi devrimi ile karakterize edilmektedir. Birinci Sanayi Devrimi (Sanayi 1.0) buhar gücüyle mekanik üretimi başlatırken,

İkinci Sanayi Devrimi (Sanayi 2.0) elektrik enerjisiyle kitlesel üretim ve montaj hattı sistemlerini getirmiştir (Carvalho vd., 2025). Üçüncü Sanayi Devrimi (Sanayi 3.0) ise bilgisayar ve otomasyon teknolojileriyle üretimde programlanabilirliği ve kısmi otomasyonu sağlamıştır (Özbek, 2024). Her üç devrim de üretim kapasitesini önemli ölçüde artırmakla birlikte, sanayi yapısının temelde doğrusal ve kapalı niteliğini korumuştur. Yirminci yüzyıla damgasını vuran “*al-kullan-at*” anlayışı, esneklik eksikliği, izlenebilirlik sorunları ve verimsizlik gibi yapısal sınırlılıklar yaratmış; bu durum hem ekonomik kayıplara hem de çevresel tahribata yol açarak sürdürülebilirliği tehdit etmiştir (Chertow, 2007).

Günümüzde işletmeleri dijital dönüşüme zorlayan temel dinamikler; küresel rekabetin getirdiği hız ve kalite baskısı, tüketicilerin kişiselleştirilmiş ürünler ile şeffaf ve sürdürülebilir üretim süreçlerine yönelik talepleri ve kaynak verimliliğini merkeze alan çevresel zorunluluklar olarak sıralanmaktadır (D’Adamo, vd., 2025). Bu bağlamda nesnelerin interneti, yapay zekâ ve dijital ikizler gibi teknolojiler, ürünlerin tüm yaşam döngüsünün veriye dayalı olarak yönetilmesini sağlayarak Dijital Ürün Pasaportu (DPP) gibi yenilikçi araçların teknik altyapısını oluşturmaktadır (Haase, vd., 2025).

2.2. Endüstri 4.0: Dördüncü Sanayi Devrimi ve Üretimde Paradigma Değişimi

Endüstri 4.0 kavramı ilk kez 2011 yılında Almanya’nın Hannover Fuarı’nda kamuoyuna sunulmuş; Alman hükümetinin “*Yüksek Teknoloji Stratejisi 2020*” programı kapsamında geliştirilen bu vizyon, kısa sürede küresel bir üretim felsefesine dönüşmüştür (Karabulut vd., 2025). Bu paradigma, fiziksel nesnelerin dijital dünyayla kesintisiz entegrasyonuna dayanan siber-fiziksel sistemler (CPS) üzerine kuruludur (Lee vd., 2015). CPS, makineler, iş parçaları ve insanlar arasında kurulan iletişim ağıyla üretim sürecindeki her bir varlığı otonom kararlar alabilen akıllı aktörlere dönüştürmektedir. CPS’in üretim ortamına uygulanmasıyla ortaya çıkan akıllı fabrikalar (smart factories), “*tak ve üret*” (plug & produce) prensibiyle esnek üretim yapıları oluşturarak en küçük parti büyüklüklerinde dahi yüksek düzeyde ürün kişiselleştirmeyi mümkün kılmaktadır (Hermann, vd., 2016). Dijital ikiz (digital twin) teknolojisi ise fiziksel nesnelerin yaşam geçmişinin makine tarafından okunabilir biçimde saklanması ve üretim sürecinin aktif kontrolünü sağlamaktadır (Gabaçlı, Uzunöz, 2017).

Endüstri 4.0’a geçiş, modern işletmeler için stratejik bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu dönüşüm; kitlesel kişiselleştirme (mass customization) yeteneğiyle rekabet avantajı, kestirimci bakım ve enerji optimizasyonu ile maliyet avantajı,

dijital ikiz teknolojileriyle de pazara çıkış süresinde (time-to-market) radikal kısalma sağlamaktadır (Frank vd., 2019).

3. ÜRETİM YÖNETİMİNDE YENİ DÖNEM: PASAPORTLU FABRİKALAR

Dijital dönüşümün üretim süreçlerine entegrasyonu, endüstri 4.0 teknolojileri aracılığıyla verimlilik, esneklik ve kalite iyileştirmeleri sağlarken, sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda köklü bir paradigma değişimini de beraberinde getirmiştir (Carvalho vd., 2025). Bu değişimin merkezinde, Avrupa Birliği'nin 2050 iklim-nötr hedefi doğrultusunda şekillenen ve ürünlerin yaşam döngüsü boyunca izlenebilirlik, şeffaflık ve sürdürülebilirlik sağlamayı amaçlayan Dijital Ürün Pasaportu (DPP) yer almaktadır (Karabulut vd., 2025).

Endüstri 4.0'ın sağladığı teknolojik altyapı ile döngüsel ekonomi hedeflerinin kesişimi, üretim yönetiminde “*Pasaportlu Fabrikalar*” olarak adlandırılan yeni bir konseptin doğuşuna zemin hazırlamıştır (Kılıç, Kurgun, 2025). Bu konsept, fiziksel üretimin ötesine geçerek ürünün ardında bıraktığı ekolojik ve operasyonel izin sistematik biçimde kayıt altına alındığı, verinin üretim sürecinin ayrılmaz bir parçası haline geldiği akıllı üretim tesislerini ifade etmektedir.

Pasaportlu fabrikaların temel aktörü olan Dijital Ürün Pasaportu, geleneksel üretim sistemlerinde yaygın olarak görülen bilgi silolarını ortadan kaldırarak değer zincirindeki tüm paydaşlar (*üreticiler, tedarikçiler, tüketiciler, onarımclar, geri dönüşümcüler ve düzenleyici otoriteler*) arasında kesintisiz ve şeffaf bir veri akışı tesis etmektedir (Wicaksono vd., 2025). Bu yönüyle DPP, üretim süreçlerinde bilgi asimetrisini ortadan kaldırarak tüm aktörler için ortak bir görünürlük zemini oluşturan kritik bir mekanizma olarak işlev görmektedir.

DPP kavramı, sanayideki uzun süreli izlenebilirlik arayışının ve çevre politikalarının evrimsel sürecinin bir ürünü olarak ortaya çıkmıştır (Duarte vd., 2025). Kavramın kökenleri, malzeme pasaportu ve kaynak pasaportu gibi erken dönem modellerine dayanmakla birlikte, asıl ivmesini Avrupa Yeşil Mutabakatı (European Green Deal) ve Sürdürülebilir Ürünler İçin Eko-Tasarım Yönetmeliği (ESPR) gibi bağlayıcı düzenlemelerden almıştır (European Commission, 2020). Bu düzenlemelerle birlikte DPP, gönüllü bir uygulama olmaktan çıkarak yakın gelecekte AB pazarına erişimin ön koşulu haline gelmiştir.

Bu bağlamda DPP, yalnızca bir uyumluluk aracı olmanın ötesinde, dijital ve yeşil dönüşümün (ikiz dönüşüm) bütünleşik bir enstrümanı olarak üretim yönetiminde yeni bir dönemi temsil etmektedir. Takip eden alt bölümlerde,

DPP'nin kavramsal çerçevesi, teknik altyapısı, içerdiği bilgiler ve tarihsel gelişim süreci detaylandırılacaktır (Gabaçlı, Uzunöz, 2017).

3.1. Dijital Ürün Pasaportu Kavramı: Bir Ürünün Dijital Kimliği

Dijital Ürün Pasaportu (DPP), bir ürünün ham madde tedariklerinden başlayarak üretim, kullanım ve ömür sonu geri kazanım süreçlerini kapsayan tüm yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan verileri; sürdürülebilirlik, döngüsellik ve yasal uyum açısından kritik bilgileri şeffaflık ve izlenebilirlik odaklı olarak standartlaştırılmış bir formatta merkezi bir dijital platformda toplayan, depolayan ve yetkilendirilmiş paydaşlarla paylaşan yapılandırılmış bir kayıt sistemidir (Haase vd., 2025).

Dijital Ürün Pasaportu, yalnızca bir veri deposu işlevi görmekten ziyade, fiziksel bir ürünün döngüsel ekonomi ve sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda tasarlanmış dijital kimliğini temsil eder. Sıklıkla karıştırıldığı dijital ikiz kavramından farklı olarak dijital ürün pasaportu, ürünün mühendislik performansı ya da anlık işleyiş durumundan farklı olarak, çevresel, yasal ve bileşen temelli şeffaflığı merkeze alır. Bu yönüyle tedarik zincirindeki tüm aktörler (*tüketiciler, onarımclar, geri dönüşümcüler ve düzenleyiciler*) arasında bilginin simetrik, güvenilir ve kesintisiz akışını sağlar (Walden vd., 2021).

DPP, özünde geleneksel üretim sistemlerinin yol açtığı bilgi asimetrisi sorununa çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Mevcut piyasa koşullarında tüketiciler ve denetleyiciler, ürünlerin çevresel etkilerine ilişkin doğrulanabilir verilere erişmekte güçlük çekmektedir. Avrupa Komisyonu tarafından yapılan kapsamlı çalışmalara göre, AB pazarında öne sürülen çevresel iddiaların çoğunluğu ya muğlak ifadeler içermekte ya da somut kanıtlardan yoksun bulunmaktadır (Haase vd., 2025).

Literatürde bu durum ise “*yeşil aklama*” (greenwashing) olarak adlandırılan sistematik bir soruna işaret etmektedir. DPP, sürdürülebilirlik iddialarını soyut pazarlama ifadeleri olmaktan çıkararak veri temelli, doğrulanabilir ve denetlenebilir bir nitelik kazandırır. Bu sayede piyasa şeffaflığı artar, bilgi kirliliği azalır ve haksız rekabetin önüne geçilir (Adisorn vd., 2021).

3.2. Dijital Ürün Pasaportu'nun Teknik Altyapısı

Pasaportlu fabrikalar, üretim sürecindeki her bir ürünün dijital bir kimlikle izlendiği, verinin üretim hattının ayrılmaz bir parçası haline geldiği akıllı üretim tesisleridir. Bu vizyonun hayata geçirilebilmesi, ileri düzeyde bir donanım-yazılım bütünleşmesini zorunlu kılmaktadır. Zira DPP'nin işlevselliği, fiziksel ürün ile ona ait dijital veri kümesi arasında güvenilir bir bağ kuran sağlam bir teknolojik katmana dayanır (European Commission, 2024). Bu katman;

makine tarafından okunabilirlik, sistemler arası uyumluluk (interoperability) ve güvenli veri paylaşımını olanaklı kılacak biçimde tasarlanmıştır. Sistem, dağıtık (decentralised) bir veri mimarisi ile AB düzeyinde oluşturulan merkezi bir doğrulama altyapısının eşgüdüm içinde çalıştığı hibrit bir modele dayanmaktadır. DPP'nin teknik mimarisi, fiziksel dünya ile siber uzay arasında köprü işlevi gören üç temel altyapı bileşeninden oluşmaktadır (Wicaksono vd., 2025).

Veri taşıyıcılar (QR kod, RFID, NFC), ürün üzerinde bulunan ve her ürüne özgü benzersiz tanımlayıcı (UPI) taşıyan fiziksel arayüzlerdir. Kullanıcılar bu etiketleri tarayarak ürünün yaşam döngüsü verilerine anlık erişim sağlar (Hakola vd., 2025).

Blokzincir teknolojisi, ürünün menşei, karbon emisyon beyanları ve kritik hammadde bilgileri gibi verilerin değiştirilemez, şeffaf ve güvenli biçimde kaydedilmesini sağlar. Bu sayede “yeşil aklama” (greenwashing) riski ortadan kalkmakta ve paydaşlar arasında merkeziyetsiz bir güven ağı tesis edilmektedir (Wicaksono vd., 2021).

Bulut sistemler, ürün yaşam döngüsü boyunca üretilen statik ve dinamik verilerin depolanması, işlenmesi ve farklı coğrafyalardaki üreticiler, tedarikçiler ile geri dönüşümcüler arasında standart protokollerle güvenli biçimde paylaşılmasını olanaklı kılar. Bulut mimarisi, Kurumsal Kaynak Planlaması (ERP) ve Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (PLM) gibi sistemlerle entegrasyonu mümkün kılarak dijital ekosistemin bütünlüğünü garanti eder (Shee-Weng, 2025).

DPP'de verilere erişim, kullanıcı rollerine göre kademelendirilmiştir: tüketiciler malzeme bileşimi, karbon ayak izi gibi temel bilgilere erişirken; piyasa gözetim ve gümrük makamları denetim için gerekli daha kapsamlı teknik verilere ulaşabilmektedir. Bu rol bazlı erişim modeli, ticari gizlilik ile kamusal denetim arasında denge kurmaktadır (Adisorn vd., 2021).

3.3. Dijital Ürün Pasaportu: Kapsanan Bilgi Alanları ve Veri Yapısı

Dijital Ürün Pasaportu, bir ürünün sürdürülebilirlik performansının ölçülmesi ve döngüsel ekonomi ilkeleri çerçevesinde yönetilmesi için gerekli çok boyutlu veri setini bünyesinde barındırmaktadır. Bu veriler üç ana başlıkta toplanmaktadır.

Malzeme ve Kimyasal Bileşim: Ürünün fiziksel yapısını oluşturan tüm girdilerin izlenebilirliği sağlanır. Hammaddelerin menşei, tedarik zinciri izlenebilirliği ve çevresel açıdan kritik bileşenlerin dökümü yer alır (Kılıç, Kurgun, 2025). Ürünü oluşturan tüm alt bileşenlerin listesi (Bill of Materials –

BOM), “Çok Yüksek Önem Arz Eden Maddeler” (SVHC) olarak sınıflandırılan tehlikeli kimyasalların varlığı ve oranı, nadir toprak elementleri gibi kritik hammaddelerin menşei ile geri dönüştürülmüş içerik oranı ve kaynağı bu kapsamda detaylandırılır (Özkazancı, 2026).

Çevresel Performans ve Döngüsellik: Ürünün yaşam döngüsü boyunca doğal kaynaklar üzerinde oluşturduğu baskıyı niceliksel olarak ortaya koyan veriler bu başlıkta toplanır. Sera gazı emisyonları, su tüketimi ve enerji kullanımına ilişkin ölçümler detaylandırılır (Basal, Demircioğlu, 2024). Karbon ayak izi, Kapsam 3 (Scope 3) emisyonları dahil olmak üzere toplam sera gazı salınımını kapsarken; su ayak izi üretim sürecinde tüketilen tatlı su miktarını yansıtır. Ürün ömrü sonu yönetimine ilişkin demontaj talimatları, geri dönüşüm yöntemleri, geri dönüşüm indeksi, atık kodları ve Genişletilmiş Üretici Sorumluluğu (EPR) bilgileri de burada yer alır. Enerji verimliliği sınıfı, dayanıklılık, onarılabildik ve geri dönüştürülebilirdik gibi niteliksel göstergeler ile çevresel etiket bilgileri de kayıt altına alınır (Zhang , Seuring, 2024). Üretim, Kimlik ve Kullanım Verileri: Ürünün benzersiz tanımlayıcıları (GTIN, seri numarası, parti numarası), üretici bilgileri, üretim tarihi ve menşei, üretim sürecinde tüketilen kaynaklar, kalite kontrol sertifikaları ve sınıflandırma bilgileri (TARIC kodu) bu kapsamda sunulur. Yasal uygunluk ve sertifikasyon kapsamında AB uygunluk beyanı (CE işareti), test raporları ve sektörel sertifikalar yer alır (Kılıç, Kurgun, 2025). Ayrıca ürünün kullanım ömrünü uzatmaya yönelik demontaj talimatları, yedek parça bilgileri, onarım rehberleri, kullanım kılavuzları, bakım talimatları ve garanti koşulları da bu başlıkta toplanır. “*Tamir Hakkı*” (Right to Repair) düzenlemeleri çerçevesinde bu veriler, ürünlerin onarılabilişliğini artırarak döngüsel ekonomi hedeflerine katkı sağlamaktadır (Hakola vd., 2025).

Özellikle karbon ayak izi, su ayak izi ve yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) gibi çevresel performans göstergeleri, uluslararası standartlarla uyumlu ve dijital ortamlarda birlikte çalışabilir bir altyapıya kavuşturulmaktadır (European Commission, 2019). Bu alanda Yıldız Teknik Üniversitesi öncülüğünde yürütülen proje, Karbon Ayak İzi (ISO 14067), Su Ayak İzi ve LCA standartlarının yeni nesil dijital veri yapılarıyla uyumlu hale getirilmesini hedeflemektedir (Yıldız Teknik Üniversitesi, 2025).

3.4. DPP’nin Tarihsel Gelişimi ve Yasal Çerçeve

Dijital Ürün Pasaportu kavramı, endüstriyel ekoloji, yaşam döngüsü değerlendirmesi ve bilgi yönetimi disiplinlerinin evrimsel sürecinin bir ürünü olarak ortaya çıkmıştır. 2000’li yılların başlarında perakende ve lojistik sektörlerinde kullanılan “*Elektronik Ürün Kodu*” (EPC) ve barkod sistemleri,

ürün izlenebilirliğine yönelik ilk uygulamalar olmakla birlikte, çevresel sürdürülebilirlik kaygısı taşımamaktaydı (Adisorn vd., 2021).

DPP'nin sürdürülebilirlik odaklı modern vizyonu, asıl ivmesini Avrupa Birliği'nin yeşil dönüşüm politikalarından almıştır. Avrupa Komisyonu tarafından 2019 yılında açıklanan Avrupa Yeşil Mutabakatı (European Green Deal) ve 2020 yılında yayımlanan Döngüsel Ekonomi Eylem Planı (CEAP), bu dönüşümün temel politika çerçevesini oluşturmuş; sürdürülebilir ürünleri norm haline getirmeyi hedeflerken dijital araçların kullanımının gerekliliğini vurgulamıştır (European Commission, 2019). Bu bağlamda DPP, ürünlerin yaşam döngüsü boyunca izlenebilirliğini ve şeffaflığını sağlayacak stratejik bir araç olarak tartışılmaya başlanmıştır (Kılıç, Kurgun, 2025).

Uygulama aşamasındaki en önemli dönüm noktası, döngüsel ekonomi modelini güçlendirmek amacıyla dijital araçların kullanımı zorunlu hale gelmektedir. Bu doğrultuda, Küresel Batarya İttifakı tarafından 2023 yılında hayata geçirilen dünyanın ilk *“Batarya Pasaportu”* pilot uygulaması, Dijital Ürün Pasaportu ekosistemi için öncü bir model teşkil etmektedir. Bu dijital kimliklendirme sistemi; ürünün karbon ayak izi, teknik özellikleri ve sürdürülebilirlik verilerini şeffaf bir şekilde sunarak, endüstriyel değer zincirindeki kaynak verimliliğini ve geri dönüşüm süreçlerini optimize etmeyi hedeflemektedir. Bu tür teknolojik altyapılar, yalın üretim prensipleriyle birleştiğinde atık yönetiminde dijitalleşmenin sağladığı sinerjiyi en üst düzeye çıkarmaktadır (Özcan vd., 2022). Bunu takiben, Avrupa Birliği Komisyonu'nun Sürdürülebilir Ürünler İçin Eko-Tasarım Yönetmeliği (ESPR) taslağını yasalaştırma süreci, DPP'yi gönüllü bir fikir olmaktan çıkarak küresel pazara erişim için zorunlu bir ticaret ve üretim kuralına dönüştürmüştür (European Commission, 2022). ESPR kapsamında, başta bataryalar olmak üzere tekstil, elektronik ve demir-çelik gibi öncelikli sektörlerde DPP uygulaması kademeli olarak zorunlu hale getirilmektedir (European Commission, 2024). 2026 yılından itibaren başlayacak bu zorunlu uygulama süreci, dijitalleşme ile yeşil dönüşümün (ikiz dönüşüm) birbirini beslediğinin somut örneğini oluşturmakta; DPP yakın gelecekte AB pazarına erişimin ön koşulu haline gelerek küresel tedarik zincirlerinin yönetim biçimini kökten dönüştürecektir (D'Adamo vd., 2025).

4. DİJİTAL ÜRÜN PASAPORTUNUN ZORUNLU KILAN DİNAMİKLER: SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE DİJİTALLEŞMENİN KESİŞİMİ

Endüstri 4.0'ın imalat sanayisine kazandırdığı dijital altyapı, uzun yıllar boyunca ağırlıklı olarak operasyonel verimlilik ve maliyet avantajı perspektifinden

değerlendirilmiştir (Özbek, 2024). Ancak küresel iklim krizinin derinleşmesi, doğal kaynakların hızla tükenmesi ve artan çevresel tahribat, dijitalleşme ile sürdürülebilirlik hedeflerini stratejik bir zorunluluk olarak bir araya getirmiştir. Günümüzde Dijital Ürün Pasaportunu (DPP) marjinal bir teknolojik kavram olmaktan çıkarak küresel tedarik zincirlerinin vazgeçilmez bir unsuru haline dönüştüren temel itici güç, çevresel krizlere karşı geliştirilen makroekonomik düzenlemelerdir (Voulgaridis vd., 2024).

4.1. Sürdürülebilir Üretim, Döngüsel Ekonomi ve DPP'nin Rolü

Yaklaşık iki yüzyıldır “*al-kullan-at*” (take-make-waste) şeklinde özetlenebilecek doğrusal ekonomi modeli, ürünlerin nihai tüketiciye ulaştıktan sonraki yaşam döngüsünü büyük ölçüde dışsallaştırmış; üretim ve tüketim süreçlerinin çevresel maliyetlerini göz ardı etmiştir (Ellen MacArthur Foundation, 2020). Ancak küresel ölçekte artan çevre kirliliği, iklim krizi ve atık sorunları, bu geleneksel üretim anlayışının sorgulanmasına yol açmıştır. Bu yapısal sorunun aşılması, ekonomik büyümenin kaynak tüketiminden ayrıştırılmasını (decoupling) öngören döngüsel ekonomi paradigmasına geçişle mümkündür (Geissdoerfer vd., 2017).

Döngüsel ekonomi, ürünlerin, bileşenlerin ve malzemelerin ekonomik değerinin mümkün olan en uzun süre korunmasını, atık oluşumunun en aza indirgenmesini ve kaynak verimliliğinin maksimize edilmesini hedefleyen bir sistemdir (Kirchherr vd., 2017). Bu paradigma, ürünlerin dayanıklılık, yeniden kullanılabilirlik, tamir edilebilirlik ve geri dönüştürülebilirlik gibi niteliklerini merkeze almakta; atık kavramını tasarım aşamasında ortadan kaldırmayı amaçlamaktadır. Ancak döngüsel ekonominin teoriden pratiğe aktarılabilmesi, ürünlerin içerdiği malzemelerin, kimyasal bileşenlerinin ve çevresel etkilerinin tüm paydaşlar tarafından bilinmesini gerektirmektedir. Bu noktada şeffaflık ve izlenebilirlik, döngüsel ekonominin olmazsa olmaz koşulu haline gelmekte; DPP bu ihtiyacı karşılayan temel veri altyapısını sunmaktadır (Wicaksono vd., 2025).

Avrupa Çevre Ajansı değerlendirmeleri, ürün tasarımının döngüsel ekonomi hedeflerine ulaşmadaki kritik rolünü ortaya koymaktadır. Tasarım aşamasında yapılan iyileştirmeler, atık oluşumunun önlenmesi ve kaynak verimliliğinin artırılması açısından en etkili müdahale alanlarından birini oluşturmaktadır (Farmer, 2019). Nitekim Avrupa Komisyonu verilerine göre, bir ürünün çevresel etkilerinin yaklaşık %80'i tasarım aşamasında belirlenmektedir (European Commission, 2022). Bu bulgu, ürünlere ilişkin doğru, güvenilir ve erken veriye erişimin stratejik önemini açıkça ortaya koymaktadır. DPP, ürünün malzeme içeriği, geri dönüştürülebilirlik oranı ve kimyasal bileşenleri

gibi verilerin dijitalleşmesini sağlayarak atık yönetimini “*ikincil hammadde yönetimi*”ne dönüştürmekte ve sürdürülebilir üretimi ölçülebilir bir zemine oturtmaktadır (Özkazancı, 2026).

4.2. Avrupa Yeşil Mutabakatı, ESPR ve Uygulama Takvimi

DPP kavramının fikir aşamasından yasal zorunluluğa evrilmesinde temel belirleyici unsur, Avrupa Birliği’nin sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi hedefleri doğrultusunda şekillendirdiği makro politika çerçevesidir. 2019 yılında açıklanan Avrupa Yeşil Mutabakatı (European Green Deal) ve 2020 yılında yayımlanan Döngüsel Ekonomi Eylem Planı (CEAP), bu dönüşümün temel politika belgelerini oluşturmuştur (European Commission, 2019, 2020). Yeşil Mutabakat, AB’nin 2050 yılına kadar iklim-nötr bir kıta olma vizyonunu yansıtırken, CEAP bu vizyona ulaşmada ürünlerin çevresel etkilerini minimize etmeye yönelik yasal düzenlemelerin gerekliliğini ortaya koymuştur.

Bu politika çerçevesinin en somut yasal çıktısı, 18 Temmuz 2024 tarihinde yürürlüğe giren Sürdürülebilir Ürünler İçin Eko-Tasarım Yönetmeliği (ESPR) olmuştur. ESPR, 2009 tarihli Eko-tasarım Direktifi’nin yerini alarak yalnızca enerji tüketen ürünleri kapsayan önceki düzenlemenin sınırlarını radikal biçimde genişletmiş; gıda, yem ve tıbbi ürünler hariç olmak üzere AB pazarına arz edilen neredeyse tüm fiziksel malları kapsama altına almıştır (European Commission, 2024). Yönetmeliğin en devrimci yönü, belirli ürün grupları için Dijital Ürün Pasaportu bulundurmaya yasal bir zorunluluk (mandatory requirement) olarak dikte etmesidir. ESPR kapsamında DPP, ürünlerin dayanıklılık, yeniden kullanılabilirlik, onarılabirlik ve çevresel ayak izi gibi performans metriklerini kanıtlamak için birincil araç olarak konumlandırılmıştır (Özkazancı, 2026). Bu düzenleme ile sanayide şeffaflık, gönüllü bir kurumsal sosyal sorumluluk faaliyeti olmaktan çıkarak yasal bir uyum zorunluluğuna dönüşmüştür (Haase vd., 2025).

DPP uygulaması, sektörel önceliklere göre kademeli olarak hayata geçirilmektedir. İlk ve en kapsamlı uygulama, AB Batarya Yönetmeliği (Regulation (EU) 2023/1542) kapsamında başlamıştır. Bataryalar, karmaşık kimyasal yapıları ve elektrikli araç dönüşümündeki stratejik rolleri nedeniyle pilot sektör olarak seçilmiş; 18 Şubat 2027 itibarıyla kapasitesi 2 kWh’in üzerinde olan bataryalar için dijital pasaport zorunlu hale gelmiştir (Karabulut vd., 2025). ESPR Çalışma Programı’na göre, tekstil ve hazır giyim (2027-2028), elektronik ürünler (2028 sonrası), demir-çelik ve alüminyum (2026-2027) ile mobilya (2028-2029) gibi öncelikli sektörlerde DPP zorunluluğu kademeli olarak devreye alınacaktır (Adisorn vd., 2021; European Commission, 2024).

4.3. 2026 ve Sonrası: AB Pazarına Erişimde DPP Zorunluluğu

Dijital Ürün Pasaportu, tekil bir yasal düzenlemeden ziyade, birbiriyle entegre regülasyonlar ekosisteminin parçası olarak tasarlanmıştır. ESPR bu yapının temelini oluştururken, sektörel detaylar ikincil mevzuatla belirlenmekte ve uygulama takvimi ürün gruplarının öncelik derecesine göre kademeli olarak ilerlemektedir (European Commission, 2024).

DPP uygulamasının ilk ve en kapsamlı örneği, AB Batarya Yönetmeliği (Regulation (EU) 2023/1542) kapsamında hayata geçirilmektedir. 18 Şubat 2027'den itibaren kapasitesi 2 kWh'in üzerinde olan tüm elektrikli araç bataryaları, endüstriyel bataryalar ve hafif ulaşım araçları bataryaları için QR kod üzerinden batarya pasaportuna erişim zorunlu hale gelecektir (Hakola vd., 2025).

ESPR Çalışma Programı'na göre, DPP zorunluluğu diğer ürün grupları için kademeli olarak uygulanacaktır. T.C. Ticaret Bakanlığı ve sektör uzmanları tarafından paylaşılan bilgilere göre öngörülen takvim aşağıdaki gibidir:

Tablo 1. Sektör Uygulama Grupları ve Uygulama Takvimleri

Sektör/Ürün Grubu	Uygulama Takvimi
Piller ve Bataryalar	2027 başı itibarıyla zorunlu
Tekstil ve Hazır Giyim	2027-2028 arası (kademeli geçiş)
Demir-Çelik ve Alüminyum	2026-2027 (ikincil düzenlemelerin yayımı)
Elektronik ve Bilişim Ürünleri	2028 sonrası
Mobilya (yataklar dahil)	2028-2029
Lastikler	2027
Deterjanlar, Boyalar, Kimyasallar	2028-2030

Bu tarihler, ikincil düzenlemelerin yayımlanmasının planlandığı yılları göstermekte olup, firmaların fiilen yükümlü olacağı tarihler ayrıca belirlenecektir. Komisyon tarafından yetki devrine dayanan mevzuatlar ile çıkarılacak ürün bazlı kurallara uyum için 18 aylık geçiş süresi tanınması beklenmektedir (European Commission, 2024). Bu düzenlemeler, DPP'yi Avrupa pazarına erişim için vazgeçilmez bir “*dijital vize*” haline getirmekte ve AB ile ticari ilişkisi olan tüm küresel tedarikçileri bu dönüşüme zorlamaktadır (D'Adamo vd., 2025).

Bu düzenlemeler, DPP'yi Avrupa pazarına erişim için vazgeçilmez bir “*dijital vize*” haline getirmekte ve AB ile ticari ilişkisi olan tüm küresel tedarikçileri bu dönüşüme zorlamaktadır (D'Adamo vd., 2025; Shee-Weng, 2025). Türkiye gibi ihracatının önemli bölümünü AB'ye yapan ülkeler için DPP'siz bir ürünün

yakın gelecekte Avrupa pazarında yer bulması mümkün olmayacak; dijital dönüşüm bir tercih olmaktan çıkarak stratejik bir zorunluluğa dönüşmektedir (T.C. Ticaret Bakanlığı, 2024; Zhang, Seuring, 2024).

5. DPP'NİN ÜRETİM YÖNETİMİNE ENTEGRASYONU VE SAĞLADIĞI AVANTAJLAR

Dijital Ürün Pasaportu, çoğunlukla ürünün pazar ve tüketici yolculuğu bağlamında ele alınsa da en dönüştürücü etkileri doğrudan işletmelerin üretim hatlarında ortaya çıkmaktadır. DPP'nin üretim yönetimine entegrasyonu, fabrikaları salt fiziksel çıktı üreten tesisler olmaktan çıkararak, her bir ürünün kendi üretim geçmişini kaydettiği dinamik bir veri üretim merkezine dönüştürmektedir. Bu dönüşüm, veriyi yalnızca bir çıktı olmaktan öte, üretimin her aşamasını şekillendiren stratejik bir girdi haline getiren yeni bir operasyonel model inşa etmektedir (Kılıç, Kurgun, 2025).

5.1. Anlık İzlenebilirlik ve Kalite Yönetiminde Dönüşüm

DPP'nin üretim yönetimine sağladığı en önemli katkılardan biri, üretim süreçlerinde anlık izlenebilirlik ve buna bağlı olarak kalite yönetiminde sağlanan iyileştirmelerdir. DPP, bir ürünün hammaddeden nihai ürüne kadar tüm üretim aşamalarının dijital ortamda kayıt altına alınmasını ve gerçek zamanlı olarak izlenebilmesini mümkün kılmaktadır (European Commission, 2024). Üretim sürecinin her aşamasında sensörler ve RFID etiketleri aracılığıyla veriler otomatik olarak kaydedilir; her bir ürüne benzersiz bir QR kod veya veri matrisi atanarak fiziksel varlık ile dijital kimlik eşleştirilir (Karabulut vd., 2025). Bu sayede üretim hattındaki her bir ürünün hangi aşamadan geçtiği, hangi makinede işlem gördüğü ve hangi operatör tarafından kontrol edildiği gibi bilgiler anlık olarak izlenebilmektedir (Karabulut vd., 2025).

Kalite yönetimi açısından DPP, geleneksel yaklaşımı öngören ve düzelten anında müdahaleci bir yapıya dönüştürmektedir. Geleneksel sistemlerde hatalı ürünler genellikle üretim sürecinin sonunda tespit edilirken, DPP ile sürecin her aşamasında toplanan veriler sayesinde olası hatalar anında tespit edilebilmekte ve düzeltici önlemler gecikmeden alınabilmektedir (Wicaksono vd., 2025). DPP'nin sağladığı en önemli kalite avantajlarından biri, bir hata tespit edildiğinde bu hatanın kaynağına hızlı bir şekilde ulaşılabilmesidir. Ürünün üretim sürecindeki tüm aşamalar geriye dönük olarak incelenebilmekte, hangi parti hammaddeden üretildiği, hangi makinede işlem gördüğü gibi bilgilere anında erişilebilmektedir. Bu izlenebilirlik, özellikle otomotiv, elektronik ve beyaz eşya gibi sektörlerde kalite yönetiminin etkinliğini artırmakta ve olası geri çağırma (recall) süreçlerini daha hedefli ve düşük maliyetli hale getirmektedir (Carvalho vd., 2025).

DPP, ürünün fiziksel varlığı ile dijital ikizi arasında sürekli senkronizasyon sağlayarak üretim sürecindeki her değişikliğin anlık olarak dijital ikize yansıtılmasına olanak tanır. Bu sayede üretim yöneticileri, üretim hattının durumunu, makinelerin performansını ve ürünlerin kalitesini gerçek zamanlı izleyebilmekte, olası darboğazları ve verimsizlikleri önceden tespit edebilmektedir (The Hashgraph Group, 2026). Üretim Yürütme Sistemleri (MES) ile entegre çalışan DPP, ürün montaj hattında ilerlerken maruz kaldığı her bir işlemin anlık olarak dijital kimliğine işlenmesini sağlayarak sıfır hata vizyonunu operasyonel bir gerçekliğe dönüştürmekle kalmayıp döngüsel iş modeline uyumu da kolay kılmaktadır (Karabulut vd., 2025).

5.2. Kaynak Verimliliği ve Atık Yönetimi

Üretim yönetiminde kaynak verimliliği, minimum girdi ile maksimum çıktıyı sağlama ilkesine dayanmakta olup, sürdürülebilir üretim paradigmasının temel unsurlarından birini oluşturmaktadır. DPP, fabrikalardaki enerji ve malzeme tüketimini geleneksel “*makine veya hat bazlı*” hesaplama yöntemlerinden çıkarak “*tekil ürün bazlı*” hesaplamaya olanak tanımakta; böylece kaynak kullanımında benzeri görülmemiş bir ayrıntı düzeyi sunmaktadır (Zhang, Seuring, 2024).

DPP, üretimde kullanılan hammaddelerin miktarı, menşei ve kalitesi hakkında detaylı bilgi sağlayarak tedarik zinciri yönetiminde şeffaflığı artırmaktadır (European Commission, 2024). Bu bilgiler sayesinde üretim planlamacıları hammadde kullanımını daha hassas planlayabilmekte, fire oranlarını azaltabilmekte ve stok yönetimini iyileştirebilmektedir. Üretim hattında belirli bir hammaddenin tüketim miktarı anlık izlenebilmekte, stok seviyeleri otomatik güncellenmekte ve yeniden sipariş süreçleri optimize edilebilmektedir (Zhang, Seuring, 2024). Enerji yönetimi açısından ise DPP’ye entegre sensörler, üretim süreçlerinde tüketilen enerji miktarını ürün bazında takip ederek enerji yoğun süreçlerin tespit edilmesini ve iyileştirilmesini sağlamaktadır (The Hashgraph Group, 2026).

DPP’nin en önemli katkılarından biri de işletme içi atık yönetiminde yaşanmaktadır. Üretim sırasında ortaya çıkan fireler ve atıklar, geleneksel sistemlerde homojen olmayan yığınlar halinde biriktirildiği için şirket içi geri kazanımı zorlaştırmaktadır. DPP entegrasyonu sayesinde, üretim hattında hatalı ayrılan bir yarı mamulün tam malzeme kompozisyonu anında bilindiği için, bu fire doğrudan ve yüksek saflıkta işletme içi geri dönüşüm hattına yönlendirilebilmektedir (Shee-Weng, 2025). Üretim sürecinde ortaya çıkan fireler ve yan ürünler, DPP’nin sunduğu veri şeffaflığı sayesinde “*atık*” yerine “*ikincil hammadde*” potansiyeli olarak tanımlanabilmekte; bu yaklaşım sanayide

“*endüstriyel metabolizma*” kavramını güçlendirerek kaynakların kapalı döngü içerisinde yönetilmesini sağlamaktadır (Wicaksono vd., 2025; Kılıç, Kurgun, 2025).

5.3. Yeşil Aklamanın Önlenmesi, Tüketici Güveni ve Rekabet Avantajı

Dijital Ürün Pasaportu’nun (DPP) en önemli işlevlerinden biri, işletmelerin sürdürülebilirlik iddialarını şeffaf, doğrulanabilir ve denetlenebilir bir zemine oturtmasıdır. Bu yönüyle DPP, İngilizce literatürde “greenwashing” olarak adlandırılan yeşil aklama olgusunun önüne geçilmesinde kritik bir rol üstlenmekte; sürdürülebilirlik odaklı yanıltıcı uygulamaların bertaraf edilmesini sağlayarak piyasa güveninin tesis edilmesine katkıda bulunmaktadır. Avrupa Komisyonu araştırmaları, AB pazarındaki çevresel iddiaların %50’den fazlasının muğlak, yanıltıcı veya asılsız olduğunu; %40’ının ise hiçbir somut kanıta dayanmadığını ortaya koymaktadır (European Commission, 2019). Bu durum, tüketici güvenliğini zedelemekte ve gerçek anlamda sürdürülebilir üretim yapan işletmeleri haksız rekabete maruz bırakmaktadır (Wicaksono vd., 2025).

DPP, tüketicilere bir ürünün QR kodunu okutarak hammadde kaynağı, üretim süreçleri, karbon ayak izi, su tüketimi ve geri dönüştürülmüş içerik oranı gibi sürdürülebilirlik verilerine doğrudan erişim imkânı sunmaktadır. Bu sayede “*eko*”, “*çevre dostu*” veya “*sürdürülebilir*” gibi iddialar, pazarlama sloganı olmaktan çıkarak veriye dayalı ve bağımsız olarak doğrulanabilir bir nitelik kazanmaktadır (The Hashgraph Group, 2026). DPP’nin blokzincir tabanlı, değiştirilemez veri yapısı, yeşil aklama riskini teknik olarak ortadan kaldırmakta; tüketiciler ve denetleyici kuruluşlar, akıllı etiketleri tarayarak gerçek üretim verilerine anlık erişebilmektedir (Hakola vd., 2025).

Ayrıca DPP’nin tüketici davranışları üzerinde de özellikle Y ve Z kuşaklarının tüketim alışkanlıklarında kendini gösterdiği bilinmektedir. Tüketiciler için verilerini şeffaf ve doğrulanabilir biçimde sunan markalar, Tüketiciler nezdinde güven tesis ederken, söz konusu güven zamanla marka sadakatine evrilmektedir. Karabulut vd.’nin (2025) de vurguladığı üzere DPP, markalara ürünlerinin çevresel performansını belgeleme ve tüketicilerle doğrudan iletişim kurma imkânı tanıyarak, onları rakipleri karşısında farklılaştıran stratejik bir araç konumuna yükselmektedir.

5.4. Stratejik Bir Dönüşüm Aracı Olarak Dijital Ürün Pasaportu

Pek çok işletme için DPP, başlangıçta yasal bir zorunluluk olarak görülse de, stratejik bir olarak değerlendirildiğinde ihracatçı işletmeler için rekabet üstünlüğü sağlayan dönüşüm aracıdır. Sürdürülebilirliği bir uyum sorunu

olarak değil, bir inovasyon katalizörü olarak gören firmalar rakiplerine üstünlük sağlamaktadır. ESPR kapsamında birçok ürün kategorisi için 2026'dan itibaren zorunlu hale gelen DPP, özellikle elektrik, batarya, tekstil, demir-çelik, otomotiv ve beyaz eşya gibi Türkiye'nin ihracatında önemli paya sahip sektörleri doğrudan etkileyecektir (European Commission, 2024; T.C. Ticaret Bakanlığı, 2024).

DPP düzenlemelerine erken uyum sağlayan işletmeler, aynı pazarda rekabet ettikleri diğer işletmelere karşı avantaj sağlayacaktır. DPP altyapısına erken yatırım yapan üreticiler, veriye dayalı operasyonel verimlilikleri sayesinde maliyet optimizasyonu sağlarken, “*şeffaf üretim*” sertifikasyonu ile küresel pazarlarda tercih sebebi haline gelmektedir (Haase vd., 2025). Ayrıca DPP, işletmelere ürünlerinin tüm yaşam döngüsü hakkında zengin veriler sunarak veri odaklı karar alma mekanizmalarının geliştirilmesine olanak tanımakta; ürün geliştirme, pazarlama ve müşteri ilişkileri stratejilerini daha etkin yönetmelerini sağlamaktadır (D'Adamo vd., 2025).

DPP'nin üretim yönetim sistemleri (MES), kurumsal kaynak planlama sistemleri (ERP) ve diğer dijital platformlara entegrasyonu, işletmelerin dijital dönüşüm süreçlerini hızlandırmakta ve endüstri 4.0 olgunluk seviyelerini artırmaktadır (The Hashgraph Group, 2026). Sonuç olarak DPP, üretimi salt bir “*mal üretme süreci*” olmaktan çıkarıp, yaşam döngüsü boyunca yönetilen ve katma değeri veriyle desteklenen sürdürülebilir bir iş modeline dönüştürmekte; işletmeleri yasal uyumluluğun ötesine taşıyarak stratejik bir rekabet aracına dönüşmektedir (Fares vd., 2025).

6. TÜRKİYE PERSPEKTİFİ

Küresel imalat sanayisinde eş zamanlı olarak ilerleyen dijitalleşme ve yeşil dönüşüm süreçleri, İkiz Dönüşüm kavramı etrafında şekillenmektedir. Bu paralel dönüşüm, gelişmekte olan ülkeler açısından iki yönlü bir etki yaratma potansiyeline sahiptir. Bir yandan mevcut üretim yapılarını ve rekabet avantajlarını tehdit ederek yapısal bir kırılmalık oluştururken, diğer yandan teknolojik sıçrama ile kalkınma süreçlerini hızlandırabilecekleri fırsat sunabilmektedir. (Karabulut vd., 2025). Türkiye ise, hem Gümrük Birliği hem Avrupa üretim ağlarına uyum nedeniyle bu dönüşümün tam merkezinde yer almaktadır. DPP,

Türkiye sanayisi için pazarda değer zincirlerindeki konumunu belirleyecek stratejik bir eşik niteliği taşıyan dönüşüme işaret etmektedir. Özellikle ihracatın bel kemiğini oluşturan sektörler başında yer alan tekstil, hazır giyim, demir-çelik, otomotiv sektörleri olmak üzere birçok sektörler, Avrupa Birliği'nin 2026 itibarıyla uygulamaya aldığı dijital ürün pasaportu düzenlemelerinden

doğrudan etkilenecektirler. Bu düzenlemeler, uzun bir süre boyunca öz konusu bu sektörler başta olmak üzere tüm sektörler üzerinde tedarik zinciri yönetiminden üretimin tüm süreçlerine kadar etkili olup Türkiye'nin Avrupa pazarında rekabet gücü belirleyicisi olarak önemli rol oynayacaktır (T.C. Ticaret Bakanlığı, 2024).

Zira Türkiye'de ihracatının yaklaşık %40-45'ini AB pazarı oluşturmaktadır. Bu pazarlarda varlığın korunması da DPP gibi uygulamalara uyumu zorunlu kılmaktadır (European Commission, 2024). DPP'siz bir ürünün özellikle Avrupa pazarında yer bulması imkansız hale gelecektir. Dolayısıyla DPP, Türk ihracatçısı için “*dijital vize*” yada “işletme karnesi” anlamı taşımaktadır (Zhang, Seuring, 2024). Öte yandan, şeffaf ve doğrulanabilir sürdürülebilirlik verileri sunan ihracatçı firmalar, küresel pazarda “*tercih edilen tedarikçi*” konumuna yükselerek rekabet avantajı elde edebilecektir (Haase, vd., 2025).

Türk imalat sanayisinin dijital olgunluk düzeyi, sektörler ve işletme ölçekleri arasında belirgin bir heterojenlik sergilemektedir. Bu durum, büyük ölçekli ve sermaye yoğun sektörlerde dijital dönüşüm süreçlerinin nispeten daha ileri seviyede olmasına karşın, küçük ve orta ölçekli işletmeler ile emek yoğun sektörlerde dijital olgunluğun sınırlı düzeyde kalması şeklinde tezahür etmektedir. Büyük ölçekli firmalar Endüstri 4.0 teknolojilerine uyumu daha hızlı elde ederken, üretim ağının omurgasını oluşturan KOBİ'lerde geleneksel yöntemlerin hâkim olmasına bağlı daha yavaş seyirde solduğu gözlemlenmektedir (TÜSİAD, 2021). Kobi'ler de DPP farkındalığı ise, genellikle ya çok az ya da yüzeysel olup, birçok sanayici dijital ürün pasaportunu QR kod veya PDF rapor olarak algılamaktadır (Kılıç, Kurgun, 2025). Bu kavramsal kargaşa, uyum sürecinin önündeki en önemli engellerden biridir.

Özellikle küçük ve orta ölçekli işletmeler, pasaportlu fabrikalar vizyonuna geçişte üç yapısal bariyerle karşı karşıya kalmaktadır. Bunlardan birincisi, teknik altyapı yetersizliğidir. Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde ki çoğu işletmelerde üretim, akıllı teknolojiler yerine sensörsüz, internete bağlı olmayan eski nesil makineler üretim gerçekleşmekte ve DPP'nin gerektirdiği verilerin toplanması ise ciddi mühendislik eforu gerektirmektedir (Wicaksono vd., 2025). İkincisi, yüksek yatırım maliyetleridir. Benzer şekilde blokzincir, sensör, bulut aboneliği ve Yaşam döngüsü analizi (LCA) yazılımları gibi kalemler, sermaye birikimi kısıtlı işletmeler için ağır bir finansal yüküdür (Haase, vd., 2025). Üçüncüsü ise, nitelikli insan kaynağı eksikliğidir. DPP, veri bilimi ve çevre mühendisliğine hâkim yeteneklerin istihdamı, KOBİ'ler için büyük güçlük oluşturmaktadır (Karabulut vd., 2025). Söz konusu bariyerlerin aşılması, Türkiye'nin yapısal koşulları göz önünde bulundurulduğunda, salt teknolojik yatırımların ötesine geçen köklü bir dönüşüm sürecini gerektirmektedir.

Kurumsal düzeyde T.C. Ticaret Bakanlığı istişare süreçlerini yürütürken, Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği (TOBB) bünyesinde kurulan GSI Türkiye ise DPP konusunda en aktif kurum olarak öne çıkmaktadır. Akademik alanda ise Yıldız Teknik Üniversitesi öncülüğünde yürütülen karbon ve su ayak izi verilerinin uluslararası standartlarla uyumlu ve birlikte çalışabilir bir altyapıya kavuşturulmasını hedefleyen proje ile (Yıldız Teknik Üniversitesi, 2025). Türkiye'nin DPP dönüşümünde önemli adımlar olmakla birlikte, dönüşümün başarısı kamu-özel sektör-akademi iş birliğine örnek çalışmalar arasında yer almaktadır.

Dijital olgunluk seviyesinin bölgesel ve sektörler arası düzeyde farklılık arz ettiği Türkiye sanayisi için teknoloji tabanlı bir sistem olan DPP'nin geliştirilmesi öncelikli çalışma alanlarından biri olarak değerlendirilmelidir.

7. SONUÇ

Üretim yönetiminde ki teknolojik inovasyon döngüsel ekonomi iş modelinin uygulanmasında iş birlikçi rolü oynamaktadır. DPP, tedarik zincirinden başlayarak üretim sürecinden geçip son tüketiciye kadar ürünler hakkında şeffaflık, izlenebilirlik ve hesap verebilirlik sağlayarak, döngüsel ekonomiye geçişi hızlandırmada güçlü bir katalizör rolü oynar. Avrupa Yeşil Mutabakatı ve ESPR ile birlikte DPP, gönüllülüğten zorunluluğa evrilmiş; gönüllülük esassından zorunlu hale geldi ve 2026 yılına kadar AB pazarına erişim için dijital bir vize niteliği kazanacak.

Araştırma sonuçları, DPP'nin üretim sürecine entegre edilmesinin işletmelere birçok avantaj sağlayabileceğini göstermektedir. Anlık izlenebilirlik, sayesinde kalite yönetiminde pasif olmaktan öngörülebilir olmaya doğru bir devrim yaratıyor. Ayrıca, ürün düzeyinde kaynak kullanımı optimize ediliyor. Blok zinciri destekli veri yapıları, sürdürülebilir kalkınma yanılması riskini ortadan kaldırarak yasal uyumluluğu rekabetçi bir stratejik avantaja dönüştürebilmektedir.

Türkiye perspektifinden değerlendirildiğinde, ihracatın yaklaşık %45'ini oluşturan AB pazarına DPP'nin gerekliliklerini uygulama da isteğe bağlılıktan çıkıp zorunlu hale gelmiştir. 2026 yılı ile başlayan ve 2027 yılı sonuna kadar başta elektrik, batarya, kimya sektörleri olmak üzere tekstil, otomotiv, beyaz eşya ve demir-çelik gibi lokomotif sektörler için DPP uygulaması işletmeler özellikle Avrupa. pazarına giriş karnesi niteliği taşıyacaktır. İşletmeler için bu sisteme oryantasyonu sadece yönetsel bir değişim ile değil üretim yönetiminde yapılacak teknolojik inovasyonunu gerçekleştirebilme gücüyle de sağlayacaktır. Çünkü DPP'ye geçiş tedarik zinciri yönetiminden başlayarak ürünün lojistiğine kadar hem teknik altyapı hem nitelikli insan kaynağını

da içinde barındıran bütüncül bir sistemi gerekli kılmaktadır. Blok zinciri, IOT nesnelerin interneti gibi endüstri 4.0 araçları hem döngüsel ekonomi iş modelinin işletmede uygulanabilirliğini kolaylaştıracak hem de üretimin her aşamasındaki kaydettiği verileri koruyarak aktarımını başarıyla sağlayacaktır.

İşletmelerin uluslararasılaşmasında pazara giriş için stratejik bir rol oynayan DPP'ler hem alıcı firmalar hem de nihai tüketiciler için kapsamlı bir bilgi kaynağı niteliği taşıırken, aynı zamanda işletmenin hedef pazardaki güvenilirlik düzeyini pekiştiren stratejik bir unsur olarak değerlendirilmektedir.

Yüksek yatırım maliyetleri barındıran bu yeni teknolojinin, özellikle küçük ve orta ölçekli işletmelerin Avrupa pazarında varlık gösterebilmeleri açısından herkes için uygulanabilir, eşit ve adil bir sistem olup olmadığı sorusunu gündeme getirdiği görülmektedir. Bu durum, söz konusu teknolojinin beraberinde getirdiği zorlukların aşılabilmesi adına yeni düzenlemelere duyulan ihtiyacı tartışmaya açmaktadır.

Kaynakça

- Adisorn, T., Tholen, L., & Götz, T. (2021). Towards a digital product passport fit for contributing to a circular economy. *Energies*, 14(8), 2289. <https://doi.org/10.3390/en14082289>
- Ara, N. S. (2024). Türkiye'nin endüstri 4.0'a geçiş sürecinin değerlendirilmesi. *Yönetim Bilimleri Dergisi*, 22(51), 119-141. <https://doi.org/10.35408/comuybd.1344608>
- Basal, M., & Demircioglu, A. (2024). Digital product passport in marketing and the future of sustainable development. *SCIRP*. <https://doi.org/10.4236/ajibm.2024.145039>
- Voulgaridis, K., Lagkas, T., Angelopoulos, C. M., Boulogeorgos, A. A. A., Argiriou, V., & Sarigiannidis, P. (2024). Digital product passports as enablers of digital circular economy: a framework based on technological perspective. *Telecommunication systems*, 85(4), 699-715. <https://doi.org/10.1007/s11235-024-01104-x>
- Chertow, M. R. (2007). "Uncovering" industrial symbiosis. *Journal of industrial Ecology*, 11(1), 11-30. <https://doi.org/10.1162/jiec.2007.1110>
- García Vaquero, M., Sánchez-Bayón, A., & Lominchar, J. (2021). European Green Deal and Recovery Plan: Green Jobs, Skills and Wellbeing Economics in Spain. *Energies*, 14(14), 4145. <https://doi.org/10.3390/en14144145>
- Carvalho, C., Silva, C. J., & Abreu, M. J. (2025). Circular economy: Literature review on the implementation of the digital product passport (DPP) in the textile industry. *Sustainability*, 17(5), 1802. <https://doi.org/10.3390/su17051802>
- D'Adamo, I., Fratocchi, L., Grosso, C., & Tavana, M. (2025). An integrated business strategy for the twin transition: leveraging digital product passports and circular economy models. *Business Strategy and the Environment*, 34(7), 9008-9022. <https://doi.org/10.1002/bse.70065>
- Duarte, N., Pereira, C., Grzywińska-Rapca, M., Kulli, A., & Goci, E. (2025). Consumers' knowledge and decisions on circularity: Albanian, Polish, and Portuguese perspectives. *Environment, Development and Sustainability*, 27(10). <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05077-4>
- Farmer, A. (2019). Developing the circular economy in the European Union. In *Circular economy: Global perspective* (pp. 389-412). Singapore: Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-1052-6_20
- Ellen MacArthur Foundation, The circular economy: a transformative Covid-19 recovery strategy: How policymakers can pave the way to a low carbon, prosperous future (2020)
- M. (2024). Models of state digital sovereignty from the global south: Diverging experiences from China, India and South Africa. *Policy & Internet*, 16(4), 727-738. <https://doi.org/10.1002/poi3.427>

- European Commission. (2019). The European Green Deal (COM(2019) 640 final). Brussels. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>
- European Commission. (2019). Closing the loop: Commission delivers on Circular Economy Action Plan. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_19_1480
- European Commission. (2022). Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council establishing a framework for setting ecodesign requirements for sustainable products and repealing Directive 2009/125/EC (COM(2022) 142 final). Brussels. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52022PC0142>
- European Commission. (2024). New EU sustainability rules explained: Ecodesign Regulation FAQs. https://environment.ec.europa.eu/news/new-eu-sustainability-rules-explained-ecodesign-regulation-faqs-2024-09-27_en
- European Commission. (2024). Ecodesign for Sustainable Products Regulation – Digital Product Passport requirements. Brussels https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/ecodesign-sustainable-products-regulation_en
- Fares, N., Islam, M. S., Jauhar, S. K., & Kucukaltan, B. (2025). Towards an international digital product passport: the new paradigm of a worldwide circular economy. *Circular Economy and Sustainability*, <https://doi.org/10.1007/s43615-025-00690-5>
- Frank, A. G., Dalenogare, L. S., & Ayala, N. F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International journal of production economics*, 210, 15-26. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>
- Gabaçlı, N., & Uzunöz, M. (2017). IV. Sanayi devrimi: Endüstri 4.0 ve otomotiv sektörü. *ICPESS (International Congress on Politic, Economic and Social Studies)*, (3).
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Hakola, L., Abedi, F., Nordman, S., Smolander, M., & Paltakari, J. (2025). Smart tags as enablers for digital product passports in circular electronics value chains. *Circular Economy and Sustainability*, <https://doi.org/10.1007/s43615-025-00500>
- Haase, L. M., Lythje, L. S., Skouboe, E. B., & Petersen, M. L. (2025). More than legislation: the strategic benefits and incentives for companies to implement the digital product passport. *Journal of Circular Economy*, 2(2). <https://doi.org/10.55845/CAXG2280>

- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016, January). Design principles for industrie 4.0 scenarios. In 2016 49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS) (pp. 3928-3937). IEEE. <https://doi.org/0.1109/HICSS.2016.488>
- Karabulut, A. N., Çalıkoğlu, G., & Bulut, Z. A. (2025). Discussing and Reviewing the Digital Product Passport: An Up-to-Date Bibliometric Analysis. *Systems*, 13(11), 930. <https://doi.org/10.3390/systems13110930>
- Kılıç, G. B., & Kurgun, A. (2025). Dijital Dönüşüm Stratejilerinin Döngüsel Ekonomi Uygulamalarına Etkisi. *Journal of Business in The Digital Age*, 8(1), 87-105. <https://doi.org/10.46238/jobda.1694308>
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, conservation and recycling*, 127, 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Kouhizadeh, M., Saberi, S., & Sarkis, J. (2021). Blockchain technology and the sustainable supply chain: Theoretically exploring adoption barriers. *International journal of production economics*, 231, 107831. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107831>
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing letters*, 3, 18-23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- Özbek, M. E. (2024). The Age of Digitalization in Industry: From Digital Twins to Digital Product Passport *Journal of Artificial Intelligence and Data Science*, 4(1), 11-21.
- Özcan, N. A., Bulut, M., Özcan, E. C., & Eren, T. (2022). Enerji üretim yatırım alternatiflerinin değerlendirilmesinde çok kriterli karar verme yöntemlerinin istatistiksel ve analitik olarak karşılaştırması: Türkiye örneği. *Politeknik Dergisi*, 25(2). <https://doi.org/10.2339/politeknik.763579>
- Özkazancı, F. E. (2026, Ocak 22). Dijital Ürün Pasaportu: Sürdürülebilirlikten rekabet avantajına. *Escarus*. <https://escarus.com/dijital-urun-pasaportu-surdurulebilirlikten-rekabet-avantajina>
- Psarommatis, F., & May, G. (2024). Digital product passport: A pathway to circularity and sustainability in modern manufacturing. *Sustainability*, 16(1), 396. <https://doi.org/10.3390/su16010396>
- Pamuk, N. S., & Soysal, M. (2018). YENİ SANAYİ DEVRİMİ ENDÜSTRİ 4.0 ÜZERİNE BİR İNCELEME. *Verimlilik Dergisi*, 1, 41-66. <https://izlik.org/JA43BX94EL>
- Shee Weng, L. (2024). Digital Product Passports: Transforming industries through transparency, circularity, and compliance. *Digital Product Passports: Transforming Industries Through Transparency, Circularity, and Compliance* (November 10, 2024). <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5158550>

- T.C. Ticaret Bakanlığı. (2024). Sürdürülebilir Ürünler İçin Eko-Tasarım Tüzüğü-ESPR. ticaret.gov.tr. Erişim tarihi: 1 Mart 2026, <https://ticaret.gov.tr/dis-iliskiler/yesil-mutabakat/surdurulebilir-urunler-icin-eko-tasarim-tuzugu-espr>
- The Hashgraph Group. (2026). TrackTrace for EU Digital Product Passport regulation compliance. retailtechinnovationhub.com. Erişim tarihi: 1 Mart 2026, <https://retailtechinnovationhub.com/home/2026/02/15/tracktrace-launches-digital-product-passport-solution/>
- TÜSİAD. (2021). Türkiye'nin sanayide dijital dönüşüm yetkinliği: Mevcut durum ve gelecek vizyonu. <https://tusiad.org/tr/yayinlar/raporlar>
- Walden, J., Steinbrecher, A., & Marinkovic, M. (2021). Digital product passports as enabler of the circular economy. *Chemie Ingenieur Technik*, 93(11), 1717-1727. <https://doi.org/10.1002/cite.202100121>
- Wicaksono, H., Mengistu, A., Bashyal, A., & Fekete, T. (2025). Digital Product Passport (DPP) technological advancement and adoption framework: A systematic literature review. *Procedia Computer Science*, 253, 2980-2989. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.02.022>
- Yıldız Teknik Üniversitesi. (2025). YTÜ'nün 'Dijital Ürün Pasaportu' projesine Avrupa Birliği'nden destek. yildiz.edu.tr. Erişim tarihi: 1 Mart 2026. <https://www.yildiz.edu.tr/haber/ytunun-dijital-urun-pasaportu-projesine-avrupa-birliginden-destek>
- Zhang, A., & Seuring, S. (2024). Digital product passport for sustainable and circular supply chain management: a structured review of use cases. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 27(12), 2513-2540. <https://doi.org/10.1080/13675567.2024.2374256>

Dijital Tedarik Zinciri ve Üretim Sistemlerinin Entegrasyonu

Fuat Karamahmutoglu¹

Özet

Endüstri 4.0 ile birlikte küresel çapta dijital dönüşüm yaşanmış ve modern üretim anlayışı ile tedarik zincirlerinin yapısı, koordinasyonu ve stratejik rolü temelden yeniden şekillenmiştir. Dijital dönüşüm ile birlikte literatüre Nesnelerin İnterneti (IoT), yapay zekâ (AI), büyük veri analitiği, blockchain (blok zinciri), bulut bilişim, sensörler ve dijital ikizler gibi kavramlar girmiştir. Literatüre ilk defa giren bu dijital teknolojiler ile birlikte tedarik zincirlerinin doğrusal ve parçalı sistemlerden yüksek düzeyde birbirlerine bağlı, akıllı ve uyarlanabilir ağlara evrimi gelişmiştir. Bu bölüm, dijital tedarik zinciri yönetiminin kavramsal temellerini, mimari yapısını, teknolojik olanaklarını, yönetsel etkilerini ve üretim sistemlerine entegrasyonunu incelemektedir.

Bu çalışma, dijital dönüşümün tedarik zinciri yönetimine etkisi geniş bir perspektifle ele alınmış ve dijital altyapıların tedarik zinciri ağlarında görünürlüğü, izlenebilirliği, çevikliği ve dayanıklılığına nasıl etki ettiği ve bununla birlikte üretim planlaması ve operasyonel kontrolü nasıl senkronize ettiği hususunda kapsamlı bir şekilde analiz etmektedir. Ayrıca bu bölümde veri odaklı karar verme stratejisi, platform tabanlı ekosistemler, akıllı üretim entegrasyonu ile birlikte sürdürülebilir tedarik zinciri stratejilerine önem verilmektedir.

Bu çalışmanın amacı teorik perspektifleri pratik uygulamalarla birleştirerek akademik literatüre katkıda bulunmayı hedeflemektedir. Ayrıca, rekabetçi ve dayanıklı üretim entegre dijital tedarik zincirleri tasarlamak isteyen araştırmacılar, yöneticiler ve politikacılar için stratejik olarak rehberlik etmektedir.

1 Dr., fuat.karamahmutoglu@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4091-4950

1. Giriş

Endüstri 4.0 ile birlikte dijitalleşme çağına girilmiş ve küresel pazarların hızlı teknolojik gelişmelerle birlikte artan karmaşıklığı, değişken talep yapıları ve sürdürülebilirlik baskıları ile birlikte tedarik zincirlerini sadece operasyonel işlevlerden ziyade stratejik varlıklara dönüştürmüştür. Geleneksel tedarik zinciri modellerinin sahip olduğu silo tabanlı bilgi akışları, sınırlı şeffaflık ve gecikmeli koordinasyon modern üretim sistemlerinin dinamik gereksinimlerine cevap verememektedir. Dijitalleşme ile birlikte tedarik zinciri yönetiminin üretim sistemlerine entegrasyonu, organizasyonel rekabet gücünün kritik bir belirleyicisi haline gelmiştir. Dijitalleşme, tedarik zincirlerini sadece daha verimli hale getirmekle birlikte, çevresel ve sosyal açıdan sürdürülebilir kılmak için de kullanılmaktadır.

Dijital Tedarik Zinciri Yönetimi (DTZY), reaktif ve işlem tabanlı koordinasyondan öngörücü, veri odaklı ve otonom karar alma yapılarına doğru bir paradigma değişikliğini temsil etmektedir. Endüstri 4.0 teknolojilerinin ortaya çıkışı, tedarikçiler, üreticiler, lojistik sağlayıcılar ve müşteriler arasında gerçek zamanlı bilgi alışverişini mümkün kılmaktadır. Üretim sistemleri artık izole operasyonel birimler değil, talep sinyallerini, kapasite planlamasını, envanter yönetimini ve dağıtım süreçlerini senkronize eden dijital ekosistemlere giderek daha fazla entegre olmaktadır.

Dijital tedarik zincirlerinin üretim sistemlerine entegrasyonu, fiziksel akışların ve dijital bilgi akışlarının eşzamanlı olarak çalıştığı birleşik bir mimari oluşturmaktadır. Akıllı sensörler, siber-fiziksel sistemler, gelişmiş analitik ve bulut tabanlı platformlar uçtan uca görünürlük sağlamak ve kaynakların dinamik optimizasyonunu mümkün kılmaktadır. Bu entegrasyon, kamçı etkisini azaltmakta, piyasa dalgalanmalarına karşı tepki hızını artırmakta ve yalın ve sürdürülebilir üretim modellerini desteklemektedir.

Ancak dijital entegrasyon, yeni zorlukları da beraberinde getirmektedir. Veri güvenliği riskleri, teknolojik birlikte çalışabilirlik sorunları, yasal kısıtlamalar ve değişime karşı örgütsel direnç başarılı uygulamayı engelleyebilmektedir. Bu nedenle, dijital tedarik zinciri entegrasyonunun teknolojik temellerini, mimari katmanlarını, yönetim mekanizmalarını ve stratejik etkilerini anlamak çok önemlidir.

Bu çalışma, dijital tedarik zinciri yönetimini ve bunun üretim sistemleriyle uyumunu yapılandırılmış ve disiplinler arası bir incelemeyle ele almaktadır. Operasyon yönetimi, bilgi sistemleri ve stratejik yönetim perspektiflerini birleştirerek, dijital dönüşümü yöneten akademisyenler ve uygulayıcılar için kapsamlı bir çerçeve sunmaktadır.

2. Dijital Tedarik Zinciri Yönetimine Giriş

2.1. Tedarik Zinciri Yönetimi Kavramının Evrimi

Tedarik zinciri kavramı, mamul ve hizmetlerin tedarikinden üretim sürecine ve nihai son tüketiciye ulaşana kadarki toplam sürecin bütünüdür. TZY, hammadde temininden nihai ürünün müşteriye ulaştırılmasına kadar geçen tüm aşamaların planlanması, koordinasyonu ve kontrolünü kapsayan bütünlük bir yönetim yaklaşımını oluşturmaktadır.

Tedarik zinciri yönetimi (TZY), ilk olarak 1980’li yıllardan itibaren literatüre giren ve her geçen gün ilgisi artan bir kavramdır. Artan rekabet koşullarında tedarik zinciri ağında yer alan firmalar, tedarikçiler ve çeşitli kuruluşlardan bağımsız olunamayacağı görüşüyle ortaya çıkmıştır. Böylece bir kuruluş TZ’nin bir parçası olduğunda başarısı, iç verimlilikleriyle sınırlı kalmayıp aynı zamanda iş ortaklarına da bağlı olmaktadır (Aslan, 2013).

Tedarik zinciri yönetimi (TZY) ve lojistik kavramlarını sanayi devrimleri ile ilişkilendirmek tarihsel gelişim sürecini yansıtmaktadır. *Tablo 1*’de sanayi devrimleri ile birlikte lojistik ve TZY’nin gelişimi gösterilmiştir (Doğan ve Derici, 2025).

Tablo 1: Tedarik Zinciri Yönetimi ve Lojistiğin Sanayi Devrimleri ile İlişkisi

Dönem	Sanayi Devrimi	Lojistik Çağı	Tedarik Zinciri Yönetimi
1780-1870	Endüstri 1.0 (1784–1870) - Mekanik aletler - Su gücü - Buhar gücü	Lojistik 1.0 (19. yy sonu–20. yy başı) - Taşımacılığın mekanizasyonu - Yerleşik dönem - Birim yük	
1870-1960	Endüstri 2.0 (1870–1969) Elektrik enerjisi ile kitlesel üretim	Lojistik 2.0 (1960–1980) - Taşıma sisteminin otomasyonu - Fiziksel dağıtım dönemi - Ulusal Fiziksel Dağıtım Yönetim Konseyinin kurulması - Karayolu taşımacılığının başlangıcı 1961 Whip Etkisi	

		• Malzeme İhtiyaç Planlaması (MRP) • Bilimsel kitaplar ve dergiler	
1969–2000	Endüstri 3.0 (1969–2000’ler) • Mikroişlemciler • PLC (Programlanabilir Mantık Denetleyicisi) • Elektronik ve bilgi teknolojileri	Lojistik 3.0 (1980–2010) • Lojistik yönetim sistemi • Kişisel bilgisayarlar • Lojistik planlama • Hızlı yanıt sistemi • Üçüncü parti lojistik • Lojistik–TZY ayrımı	TZY 3.0 (1980’lerin başı) • İki kanal arasında entegrasyon • TZY kavramı • Kurumsal kaynak planlaması (ERP) • İlk robot kullanımı • Etkin müşteri yanıtı • Lojistik–TZY ayrımı • LARG SCM • VUCA dönemi
2010–...	Endüstri 4.0 (2010–...) • Yüksek esnek kişiselleştirilmiş üretim • Dijitalleşme • Bulut bilişim • Nesnelerin interneti • Büyük veri • Makine öğrenmesi • Sensörler	Lojistik 4.0 (2010–...) • Akıllı ulaşım sistemleri (ITS) • Gerçek zamanlı tespit sistemleri (RTLS) • Dijitalleşme • Risk yönetimi • Tersine lojistik • Büyük veri analizi • Yapay zekâ • Nesnelerin interneti	TZY 4.0 (2010–...) • Toplam ağ entegrasyonu • Dijitalleşme • Risk yönetimi • Tersine lojistik • Büyük veri analizi • Yapay zekâ • Nesnelerin interneti • Sensörler • Akıllı sistemler

1780’li yıllarda yapılan ilk Sanayi Devrimi olan Endüstri 1.0 ile birlikte buharlı makineler, basit mekanik aletler ve su gücünden faydalanılması insanlık için bir dönüm noktası olmuştur. Bu dönemde üretimin artması ile birlikte taşıma sorunu ortaya çıkmıştır ve ilk lojistik kavramı dile getirilmiştir. Üretim ve talep noktaları arasındaki taşımacılığın sistematik hale getirilmesiyle birlikte ilk lojistik uygulama çalışmaları bu dönemde yapılmıştır.

İkinci Sanayi Devrimi olan Endüstri 2.0 ile birlikte elektrik enerjisi ile kitlesel üretim çağına geçilmiştir. Bu dönemde lojistik kavramı ve uygulamaları profesyonelleşmiş, taşıma sisteminin otomasyonu ile fiziksel dağıtım dönemi başlamıştır. Ayrıca ilk karayolu taşımacılığı da bu dönemde yapılmıştır. Lojistik

2.0'ın diğer yenilikleri Ulusal Fiziksel Dağıtım Yönetim Konseyi'nin kurulması, Whip etkisi ve MRP (Malzeme İhtiyaç Planlaması) olmuştur. Ayrıca bu dönemde bilimsel kitaplar ve dergiler basılmıştır.

Üçüncü Sanayi Devrimi olan Endüstri 3.0 ile elektronik devrine girilmiştir. Endüstri 3.0'ın getirmiş olduğu yenilikler; mikroişlemciler, PLC (Programlanabilir Mantık Denetleyicisi) ve elektronik bilgi teknolojileridir. Bu dönemle birlikte lojistik alanında da gelişmeler yaşanmıştır. Lojistik 3.0 ile lojistik yönetim sistemleri geliştirilmiş, kişisel bilgisayarlar kullanılmaya başlanmıştır. Lojistik alanında planlamalara bu dönemde başlanmıştır ve hızlı yanıt sistemleri geliştirilmiştir. Günümüz iş dünyasında lojistik süreçlerinin etkili ve verimli şekilde yönetilmesini sağlayan 3.Parti lojistiği (3PL) stratejisi geliştirilmiştir. Bu dönemle birlikte TZY kavramı kullanılmaya başlanmıştır ve lojistik ile farkları belirtilmiştir.

Endüstri 3.0 ile birlikte tedarik zinciri yönetimi (TZY) kavramı ilk defa literatüre girmiştir. TZY, 1980'li yıllarda iki kanal arasında farklı işlevsel alanları entegre ederek daha bütünleşik bir yapı kazanmıştır. Gelişen teknoloji ve artan rekabet koşullarında lojistik kavramının tek başına yeterli olmayacağı düşüncesiyle ortaya çıkan TZY ile aralarında farklar oluşmuştur. Lojistik, fiziksel olarak malzeme akışına odaklanırken, TZY kapsamlı bir perspektif ile tüm TZ süreçlerini kapsamaktadır. Bu dönemin başka önemli bir yeniliği, MRP sisteminin geliştirilmesiyle birlikte ilk kez ERP (Kurumsal Kaynak Planlaması) kavramının ortaya çıkmasıdır. Kurumsal Kaynak Planlama (ERP) sistemleri, lojistik ve tedarik zinciri sektöründe operasyonel verimlilik ve veri entegrasyonu açısından temel bir yapı taşı hâline gelmiştir (Stevens, 2023). 1980'li yılların sonlarına yaklaşırken geliştirilen ilk robotlar ile üretim süreçlerinde esneklik ve verimlilik sağlanmıştır. Ayrıca 1992 yılında ECR (Etkin Müşteri Yanıtı), ABD gıda perakendeciliği sektöründe TZ performansını optimize etmek için güçlü bir araç olarak sunulmuştur (Kotzab, 1999). VUCA (Volatility, Uncertainty, Complexity, Ambiguity) terimi oynaklık, belirsizlik, karmaşıklık ve muğlaklık anlamına gelmektedir ve iş dünyasında artmakta olan belirsizliği ifade etmektedir. LARG (Lean, Agile, Resilient, Green) TZY, yalınlık, çeviklik, dirençlilik ve çevreci bir TZY perspektifi ile sürdürülebilir ve esnekliği yüksek bir model oluşturmaktadır.

Sanayi Devrimi'nin dördüncüsü olan Endüstri 4.0 ile birçok yenilik ortaya çıkmıştır. Dijitalleşme dönemiyle birlikte yüksek kişiselleştirilmiş üretim yapılarak müşteri memnuniyeti ön plana alınmıştır. Dijitalleşme ile birlikte bulut bilişim, nesnelerin interneti (IoT), büyük veri, makine öğrenmesi ve sensörler gibi birçok terim literatüre girerek sektöre önemli katkılar sunmuştur.

Endüstri 4.0 ile birlikte gelişen Lojistik 4.0 ise dijitalleşme ile birlikte önemli yenilikler getirmiştir. Akıllı ulaşım sistemleri (ITS) ve gerçek zamanlı konum/takip sistemleri (RTLS) ile birlikte fiziksel taşımacılığın dijital olarak kontrolünü ve optimizasyonunu sağlamıştır. Dijitalleşme ile birlikte ayrıca risk yönetimi, tersine lojistik, büyük veri analizi, yapay zekâ inovasyonu, süreçlerde Nesnelerin İnternetinin (IoT) kullanımı ve son olarak robotik uygulamalar bu dönemde hayata geçirilmiştir (Doğan ve Derici, 2025).

Endüstri 4.0 ile birlikte gelişen TZY 4.0, toplam ağ entegrasyonunu benimsemiştir. Böylece TZY, tedarik, üretim, depolama, dağıtım ve müşteri süreçlerini dijital platformlar üzerinden bir bütün olarak ele almıştır. Dijital tedarik zinciri yönetimine nesnelerin interneti (IoT), blockchain, büyük veri analizi, bulut bilişim, akıllı sistemler, sensörler ve yapay zekâ (AI) gibi birçok yeni kavram girmiştir.

2.2. Dijitalleşmenin Tedarik Zinciri Üzerindeki Etkisi ve Önemi

Dijitalleşme ile birlikte tedarik zinciri önemli yeniliklere kapı açmış ve tedarik zinciri yöneticileri açısından da önemli faydalar sağlamıştır. Özellikle entegrasyon, verimlilik, görünürlük, çeviklik, dayanıklılık ve maliyet üzerinde olumlu etkileri olmuştur.

Dijital teknolojilerin TZY entegrasyonu, geleneksel TZY sistemlerinin sınırlamalarının üstesinden gelerek dönüştürücü bir etki yaratmıştır. Nesnelerin İnterneti (IoT), yapay zekâ (AI), blok zinciri, büyük veri analitiği ve bulut bilişim gibi teknolojiler, tedarik zinciri operasyonlarının çehresini değiştirerek, modern iş hedefleriyle uyumlu, gelişmiş verimlilik, şeffaflık ve çeviklik sunmuştur (Mhaskey, 2024).

TZ yeteneği, firmaların dijital ürünlerin organizasyonel süreçlerde kullanıldığı ve dijital ürünlerin kullanımının firma ihtiyaçlarına uyarlandığı iş faaliyetlerini yürütmelerine yardımcı olmaktadır. Böylece, TZY'nin değer yaratma mekanizması, bir firmanın kendi faaliyetlerine uyacak şekilde bir dijital ürünü başarıyla kullanma kapasitesidir (Hautala-Kankaanpää, 2022).

Dijitalleşme, tedarik zinciri entegrasyonunu ve verimliliğini önemli ölçüde artırarak tedarik zinciri performansının iyileşmesine yol açmakta ve tedarik zinciri dinamizmi de bu iyileşmede dengeleyici rol oynamaktadır (Salamah, Alzubi ve Yinal, 2024).

Tedarik zincirinin dijitalleşmesi, belirsiz ortamlarda absorbe etme, yanıt verme ve toparlama yeteneklerini geliştirerek tedarik zincirinin dayanıklılığını ve performansını artırmaktadır (Zhao, Hong ve Lau, 2023).

Tedarik zinciri dijitalleşmesi, üretim firmalarında tedarik zinciri performansını, çevikliği ve dayanıklılığı artırarak olumlu yönde etkilerken, çevresel dinamizm bu ilişkiyi dengeleyici bir faktör olarak ele almaktadır (Jum'a, Zighan ve Alkalha, 2025).

Tedarik zincirinin dijitalleştirilmesi ve yönetimi, ERP, IoT, blok zinciri ve eklemeli üretim gibi en yeni teknolojileri entegre ederek dayanıklılığı, şeffaflığı ve verimi artırmaktadır (Tiwari vd., 2024).

Dijital dönüşüm, tedarik zinciri yoğunlaşmasını ve verimliliğini artırarak firma performansını olumlu yönde etkilemekte ve bu süreçte işletme sahipliği, büyüklüğü ve konumu gibi faktörler farklı roller oynamaktadır (Yang vd., 2025).

Dijital dönüşüm ve tahmine dayalı analizler, küresel tedarik zinciri yönetiminde devrim yaratarak çevikliği, şeffaflığı ve dayanıklılığı artırmaktadır, ancak kuruluşlar siber güvenlik ve düzenleyici karmaşıklıklar gibi zorluklarla karşı karşıya kalmaktadırlar (Ezeamii, Idoko ve Ojochogwu, 2025).

Dijital dönüşüm, dış işlem maliyetlerini artırarak ve yönetim yeteneklerini geliştirerek tedarik zinciri verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır ve bu durum, tedarik zinciri hassasiyeti yüksek sektörlerde ve büyük işletmelerde daha belirgin bir şekilde gözlemlenmektedir (Zheng ve Shang, 2025).

Tedarik zinciri işlemlerinin dijital dönüşümü, finansman maliyetlerini azaltarak, operasyonel verimliliği artırarak ve yoğunlaşma seviyelerini düşürerek tedarik zinciri verimliliğini önemli ölçüde iyileştirir (Zhang, Liang ve Chen, 2025).

TZY'nin ana unsurlarından biri olan lojistik, firmalar açısından maliyet, mesafe ve süre bakımından önemli bir optimizasyon alanı sunmaktadır (Karamahmutoğlu ve Tüzemen, 2025). Tedarik zinciri dijitalleşmesi, sipariş işleme, envanter yönetimi ve lojistik dağıtımını optimize ederek KOBİ'lerde operasyonel verimliliği önemli ölçüde artırırken, teknolojik uygulama engelleri ve uygulama yolu seçimi gibi zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır (Zuo, 2025).

2.3. Üretim ve Tedarik Zinciri Entegrasyonunun Önemi

Üretim operasyonlarını tedarik zinciriyle entegre etmek, iç süreçleri, bilgi sistemlerini ve dış ortakları uyumlu hale getirerek malzemelerin, bilgilerin ve kararların tedarikçilerden üretime ve müşterilere sorunsuz bir şekilde akmasını sağlamak anlamına gelmektedir. Araştırmalar, bu entegrasyonun verimlilik, yanıt verme hızı, dayanıklılık ve finansal performansın temel itici gücü olduğunu sürekli olarak göstermektedir.

2.3.1. Daha iyi operasyonel ve finansal performans

Üretim ve operasyon yönetimi uygulamaları, tedarik zinciri entegrasyonunun aracı rolü sayesinde büyük ölçüde organizasyonel finansal performansı iyileştirmektedir (Salah, Çağlar ve Zoubi, 2023).

Üretim firmalarının geniş örneklemelerinde operasyonel ve finansal performanstaki varyansın büyük bir kısmını, iç entegrasyon, tedarikçi entegrasyonu ve müşteri entegrasyonu birlikte açıklamaktadır (Masa'deh vd., 2022).

Entegre tedarik zincirleri, teslimat sürelerini kısaltmakta, maliyetleri düşürmekte, kaliteyi ve zamanında teslimatı iyileştirmekte ve müşteri memnuniyetini artırmaktadır (Salah, Çağlar ve Zoubi, 2023).

2.3.2. Duyarlılık, esneklik ve dayanıklılık

Üretim planlamasının tedarikçiler ve müşterilerle entegrasyonu, tedarik zinciri esnekliğini ve dayanıklılığını artırarak, özellikle COVID-19 gibi aksaklıklar altında işletme performansını iyileştirmektedir. Gelişmiş üretim teknolojisi ve dijital tedarik zincirlerinin, yanıt verme hızı ve teslimat süresinde gerçek kazanımlara dönüştürülmesi için iç ve dış entegrasyon gerekmektedir (Alzoubi vd., 2022)

2.3.3. Yalın, çevre dostu ve dijital operasyonların destekleyicisi

Tedarik zinciri entegrasyonu, yalın üretim, israfın azaltılması ve üretim ile lojistik genelinde sürekli iyileştirmeyi desteklemektedir. Sürdürülebilir ve yeşil tedarik zinciri yönetiminin merkezinde yer alan bu yaklaşım, kârlılığı korurken çevresel etkiyi azaltan koordineli envanter, üretim ve lojistik kararlarına olanak tanımaktadır (Christian vd., 2024).

ERP, büyük veri ve yapay zekâ yoluyla dijital entegrasyon, uçtan uca görünürlük, daha iyi tahminleme ve senkronize üretim sağlayarak verimliliği ve rekabet gücünü artırmaktadır (Adenekan vd., 2024).

Üretim sistemlerini daha geniş tedarik zinciriyle entegre etmek, verimlilik, hız, dayanıklılık, sürdürülebilirlik ve iyi bir finansal sonuç arayan modern işletmeler için isteğe bağlı değil, temel bir zorunluluktur.

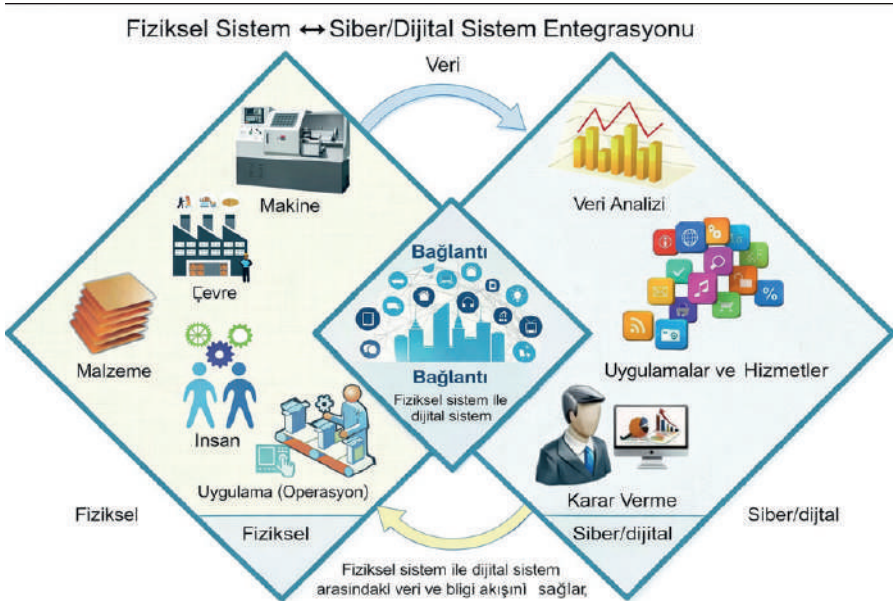
3. Dijital Tedarik Zinciri Mimarisi

Dijital tedarik zinciri mimarisi, veri, sistem ve teknolojilerin zincir genelinde görünürlük, otomasyon ve analitik imkânları sağlamak üzere nasıl yapılandırıldığını açıklamaktadır. Son çalışmalar, Nesnelerin İnterneti (IoT),

bulut bilişim, yapay zekâ/analitik ve blok zincirini entegre eden çok katmanlı, platform tabanlı mimariye odaklanmaktadır.

3.1. Dijital Platformlar ve Üretim Sistemleri

Endüstri 4.0 ile birlikte üretim sistemlerine dijital platformlar dahil edilmiştir. Makineler ile verileri birbirlerine bağlayarak akıllı sistemler oluşturulmuştur. Dijital endüstriyel platformlar, veri depolama, işleme ve standartlaştırılmış arayüzler aracılığıyla endüstriyel varlıkları (makineler, sensörler ve hatlar) uygulamalarla birleştiren bir “entegrasyon ara katman yazılımı” görevi görmektedir (Pauli, Fiel ve Matzner, 2021). Fiziksel sistem ile siber/dijital sistem arasındaki eşleştirme Şekil 1’de gösterilmiştir (Tao vd., 2019).



Şekil 1: Fiziksel ve Siber/Dijital Sistemleri Arasında Eşleştirme

Platformlar, akıllı üretim sistemlerinde gerçek zamanlı izleme, kontrol ve optimizasyonu desteklemek için makineler, hatlar ve fabrikalar genelinde verileri toplamakta, depolamakta ve analiz etmektedir (Tao vd., 2019). Dijital platformlar hem inovasyon platformu hem de işlem platformu olarak işlem görmektedir (Pauli, vd., 2021). Endüstri 4.0 için akıllı üretim sistemleri, siber-fiziksel sistemler aracılığıyla fiziksel ve sanal dünyaları birleştirerek tasarım, işleme, kontrol, izleme ve planlamayı dönüştürerek üretim sektöründe devrim yaratmaktadır (Zheng vd., 2018). Akıllı üretim planlama ve kontrol, üretim operasyonlarının beynine odaklanmakta ve mevcut endüstriyel varlıkları ve

malzemeleri, ayrıca gelecekteki daha uyarlanabilir üretim sistemlerini akıllıca planlamayı ve kontrol etmeyi amaçlamaktadır (Oluyisola vd., 2022).

3.1.1. Endüstriyel IoT/ Bulut Platformları

Dijital endüstriyel platformlar, imalat sektörü için veri toplama, analiz ve uygulama geliştirme olanağı sağlayan hem inovasyon hem de işlem platformları olarak hizmet vermektedir (Pauli vd., 2021).

Nesnelerin İnterneti (IoT), büyük veri analitiği ve makine öğrenimini kullanan akıllı üretim planlama ve kontrol sistemleri, çeşitli veri kaynaklarından yararlanarak, planlamacının deneyimini yakalayarak ve neredeyse gerçek zamanlı eyleme olanak tanıyarak üretim performansını artırmaktadır (Oluyisola vd., 2022).

3.1.2. Akıllı Fabrika / CPS Platformları

Siber-fiziksel sistemlere ve nesnelerin internetine dayalı akıllı bir siber-fiziksel sistem, Endüstri 4.0 için etkili bir şekilde akıllı bir üretim sistemi oluşturmaktadır (Ryalat, ElMoaqet ve AlFaouri, 2023).

Siber-fiziksel üretim sistemleri, veri odaklı sürdürülebilir akıllı üretime katkıda bulunarak, teknolojik ve operasyon yönetimi özellikleriyle sosyal sürdürülebilirlik performansını şekillendirmektedir (Andronie vd., 2021).

3.1.3. Dijital Üretim Platformları

Dijital üretim platformları, Endüstri 4.0'da akıllı fabrikaları mümkün kılarak ve rekabet baskılarına yanıt vermek ve yeni değer zinciri organizasyonuna uyum sağlamak için yeni teknolojileri, uygulamaları ve hizmetleri entegre ederek çok önemli bir rol oynamaktadır (Gerrikagoitia vd., 2019).

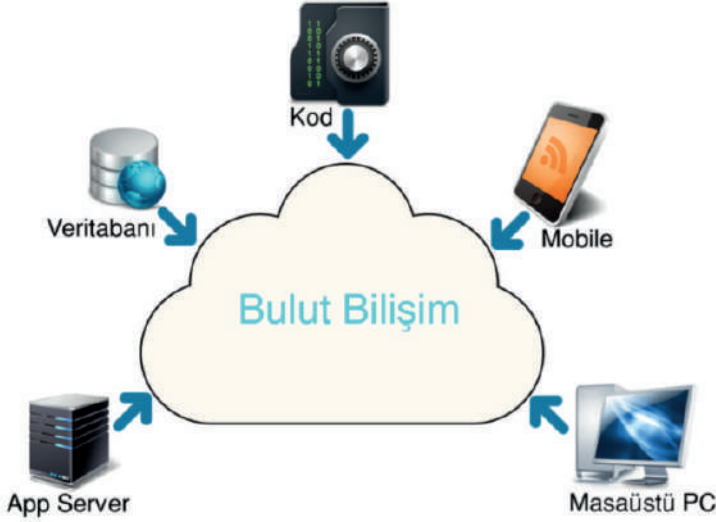
3.1.4. Dijital İkiz Platformları

Siber-fiziksel sistemler ve dijital ikizler, siber-fiziksel entegrasyon yoluyla akıllı üretim verimliliğini, dayanıklılığını ve zekasını artırabilmektedir, ancak kökenleri, gelişimleri, mühendislik uygulamaları ve temel unsurları farklılık gösterebilmektedir (Tao vd., 2019).

Dijital ikizler, montaj süreçlerini gerçek zamanlı olarak optimize ederek 3D simülasyon ve veri madenciliği gibi Endüstri 4.0 kavramlarını mümkün kılmaktadır (Židek vd., 2020).

3.2. Bulut Tabanlı Tedarik Zinciri Yönetimi

Endüstri 4.0 ile birlikte dijitalleşme çağı yaşanmış ve birçok yenilikleri de beraberinde getirmiştir. Türkçesi “*Bulut Bilişim*” olan “*Cloud Computing*” kavramı bu yeniliklerin başında gelmektedir. Bulut bilişim kısaca; gerçek zamanlı servis, altyapı ve uygulamaların dünyanın farklı yerlerinde bulunan sunucular üzerinden çalıştırılabilmesi şeklinde tanımlanmaktadır ve bulut bilişim ve bileşenleri *Şekil 2*'de gösterilmiştir (Kavzoğlu ve Şahin, 2012).



Şekil 2: Bulut Bilişim ve Bileşenleri

Tedarik zinciri yönetiminde bulut bilişim ise; tedarik zinciri boyunca yer alan işletmelerin bilgi sistemlerini, süreçlerini ve verilerini; internet üzerinden erişilen ortak bir bulut platformunda birleştirerek, gerçek zamanlı görünürlük, esnek kapasite kullanımı ve işbirlikçi karar vermeyi sağlayan hizmet odaklı bilişim yaklaşımıdır (Khan ve Sinha, 2022). TZY’de bulut bilişimin ölçeklenebilir olması, gerçek zamanlı erişim sağlaması, maliyet avantajı sağlaması, veri güvenliği sağlaması ve yedekleme kolaylığı ile önemli avantajlar sunmaktadır.

Büyük veri ve bulut bilişimin gelişmesiyle birlikte, çok kanallı dağıtık hesaplama yöntemi yüksek hesaplama hızına ulaşmaktadır. Ayrıca bulut sistemleri, bu verilerin depolanması, işlenmesi ve analiz edilmesi için geniş bir kaynak havuzu sunmakta ve bu durum daha doğru veri bilgilerinin elde edilmesini sağlarken maliyetlerin azaltılmasına da katkıda bulunmaktadır (Yue vd., 2015).

Bulut tabanlı tedarik zincirleri, gerçek zamanlı görünürlüğü, standartlaştırılmış iletişim protokollerini ve kuruluşlar arası iş birliğini artırarak, şirket içi alternatiflere kıyasla kaynak kullanımında, altyapı maliyetlerinde ve yatırım getirisinde önemli avantajlar sağlamaktadır (Byreddy, 2025).

Bulut destekli endüstriyel siber-fiziksel sistemler (ICPS), üretim verimliliğini artırmakta, üretim kalitesini yükseltmekte ve sürdürülebilir endüstriyel sistemler ile çevre dostu işletmeleri mümkün hâle getirmektedir (Yue vd., 2015).

Tedarik zinciri yönetiminde bulut bilişim, veri güvenliği, tedarikçi bağımlılığı ve felaket kurtarma zorlukları ele alınarak operasyonlar iyileştirilmektedir, ancak aynı zamanda tedarikçi bağımlılığı ve veri gizliliği endişeleri gibi riskler de taşımaktadır (Yenugula, Sahoo ve Goswami, 2023).

Bulut bilişim, esnek BT altyapısı ve bulut/işletme sinerjisi yoluyla tedarik zinciri performansını iyileştirirken, tedarik zinciri yönetimi aracı ve piyasa belirsizliği ise düzenleyici rol oynamaktadır (Yang, Li ve Liu, 2025).

4. Blockchain ve İzlenebilirlik

4.1. Blockchain Teknolojisinin Temel Prensipleri

Dijitalleşme ile birlikte Blockchain (Blok Zinciri); kriptografi, fikir birliği ve zincirleme veri yapıları kullanarak oluşturulmuş, merkeziyetsiz ve değiştirilmeye karşı dayanıklı bir defter olarak tanımlanmaktadır. Kaydedilen tüm işlemler yetkili katılımcılar tarafından görülebilir, defter içinde izlenebilir, değiştirilemez ve geri alınamaz ve bu durum tedarik zincirlerinde veri paylaşımı için blockchain kullanımının artmasına neden olmaktadır (Guo ve Yu, 2022). Veriler birçok düğümde depolanmakta ve defteri tek bir merkezi otorite kontrol etmemektedir (Tripathi, Ahad ve Casalino, 2023). Her düğüm aynı sıralı işlem günlüğünü tutmakta, bu da kullanılabilirliği artırmakta ve tek hata noktalarını ortadan kaldırmaktadır (Guo ve Yu, 2022).

İşlemler bloklar halinde gruplandırılmakta, her blok önceki bloğun kriptografik özetini, zaman damgasını ve işlem verilerini içererek, zincirleme bir yapı oluşturmaktadır (Tripathi vd., 2023). Geçmiş verileri değiştirmek, karma değerlerinin yeniden hesaplanması ve ağ üzerinde fikir birliğine varılmasını gerektirmekte olup, bu da kayıtları fiilen kurcalamaya karşı dayanıklı ve değiştirilemez hale getirmektedir (Dong vd., 2023; Tripathi vd., 2023).

Düğüm, mutabakat algoritmaları aracılığıyla hangi blokların geçerli olduğu konusunda anlaşmaktadır (Yadav, Singh ve Kushwaha, 2023). Uzlaşma, katılımcılar birbirine güvenmeseler bile tek ve yetkili bir tarihsel kayıdın oluşmasını sağlamaktadır (Guo ve Yu, 2022).

Blockchain teknolojisi, güvenli, hızlı, şeffaf ve yarı anonim bir çözüm sunarak güven, mülkiyet, kimlik ve finansal sistemlerde devrim yaratmaktadır, ancak çeşitli alanlarda zorluklar ve sorunlarla karşılaşmaktadır (Tripathi vd., 2023). Karşılaşılan bazı sorunlar ölçeklenebilirlik, enerji tüketimi, birlikte çalışabilirlik ve düzenleyici endişeler olarak sıralanmaktadır (Mayani, 2022).

4.2. Ürün İzlenebilirliği ve Şeffaflık

Defterler genellikle yalnızca ekleme yapılabilen ve küresel olarak görünür yapıdadır ve bu durum varlık veya veri akışlarının tam denetim izlerini ve takip edilebilirliğini sağlamaktadır (Dong vd., 2023). Bu, güveni yeniden tanımlamaktadır ve taraflar, merkezi bir aracı yerine protokol kurallarına ve paylaşılan duruma güvenmektedirler (Tripathi vd., 2023).

Blockchain teknolojisi, merkeziyetsizlik, değiştirilemezlik ve şeffaflık sunarak çeşitli sektörler ve devlet kurumlarına fayda sağlamaktadır (Dong vd., 2023).

4.3. Güvenlik ve Bütünlük

Açık anahtarlı şifreleme, kullanıcıların kimliğini doğrulamakta ve işlemleri dijital olarak imzalamaktadır ve karma fonksiyonlar ise bütünlüğü korumaktadır (Tripathi vd., 2023; Guo ve Yu, 2022). Merkeziyetsizlik ve uzlaşma ile birleştiğinde, bu durum veri bütünlüğü ve inkâr edilemezlik konusunda güçlü güvenceler sağlamaktadır (Zhang, Xue ve Liu, 2019).

4.4. Tedarik Zinciri Penceresinden Blockchain Teknolojisi

Blockchain teknolojisi, tüm işlemlerin değiştirilemez dağıtık deftere kaydedilmesi ile şeffaflık ve izlenebilirlik sunmaktadır. Bu sayede sahtecilik, ürün karıştırma, belge tahrifatı gibi sorunları ortadan kaldırmakta ve bunu teknoloji üzerinden sağlamaktadır. Endüstri 4.0 ile ortaya çıkan bu teknoloji tedarik zinciri yönetimi üzerinde de uygulama alanları sunmaktadır.

Akıllı sözleşmeler, ödeme, sevkiyat oranları, gümrük genişlikleri gibi adımları otomatikleştirerek işlem süresini ve aracı maliyetleri azaltmaktadır (Kumar vd., 2025). Blockchain dayanlı izlenebilirlik, demokratik performans, adil çalışma koşulları, çatışma mineralleri, organik/helal vb. sertifikaların TZ boyunca yaygınlaştırılmasını kolaylaştırarak sürdürülebilir ve etik TZY'yi desteklemektedir (Park ve Li, 2021). Ayrıca Blockchain teknolojisi, çevre koruma, sosyal eşitlik ve yönetim verimliliği alanlarında tedarik zinciri sürdürülebilirlik performansını iyileştirme potansiyeline sahiptir (Park ve Li, 2021). Blockchain teknolojisi, özellikle yüksek değerli mallar ve düşük hacimli ticaret için lojistikte önemli ekonomik faydalar sunmaktadır ve burada veri

korunmasından ziyade verilerin şeffaflığı ve değiştirilemezliği daha önemlidir (Berneis, Bartsch ve Winkler, 2021). Blockchain tabanlı TZ izlenebilirliği, kayıtları birden fazla parçaya bölerek ve paralel arama kullanarak, uygun fiyatlı depolama maliyetiyle zaman kaybını %85'e kadar azaltmaktadır (Wu, Jiang ve Cao, 2022). Blockchain teknolojisi, TZ şeffaflığı ve izlenebilirliği önemli ölçüde artırarak, evrak işlerini %85 ve anlaşmazlık çözüm süresini %30 azaltırken, paydaş güvenini artırmakta ve operasyonel gereksizliği azaltmaktadır (Amiri vd., 2025).

Blockchain teknolojisinin TZY alanında uygulanmasının bazı zorlukları ve sınırları mevcuttur. Ölçeklenebilirlik, birlikte çalışabilme, veri gizliliği, standart eksikliği ve organizasyonel direncin yaygınlaşmasını engellemektedir (Kumar vd., 2025). Blockchain'in TZY'ye faydasının yüksek olması için veri kalitesi, IoT karşılaştırması ve sektör standartları kritik görülmektedir (Berneis vd., 2021). Ayrıca Blockchain teknolojisi teknolojik karmaşıklıklar, düzenleyici belirsizlik ve kurumsal direnç yaygın kullanımın önünde engeller oluşturmaktadır (Nwani, 2025).

Araştırmalar incelendiğinde Blockchain teknolojisinin tedarik zinciri yönetimine şeffaflık, izlenebilirlik, güven ve verimlilik artışı sağladığı görülmektedir. Ancak ölçeklenebilirlik, gizlilik ve standartlaşma sorunlarının çözülmesi gerekmektedir. Aksi halde yaygın ve tam etkili bir şekilde kullanımı kısıtlamalara maruz kalmaktadır.

5. Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Akıllı Lojistik

Dijitalleşme çağı ile birlikte Nesnelerin İnterneti (IoT), akıllı lojistiğin temel unsurunu oluşturmaktadır. Nesnelerin İnterneti (IoT), lojistik süreçlerini baştan sona daha görünür kılmakta, otomatik ve veri odaklı hale getirmektedir. Sensörler, RFID, GPS ve bağlantılı cihazlar malların konumunu, durumunu ve koşulunu sürekli olarak kaydetmektedir.

Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojisi taşıma, filo ve transit hâlindeki araçların görünürlüğüne mümkün hâle getirmektedir. IoT, araçların ve kargoların gerçek zamanlı takibini (GPS, RFID, 3G/5G, Bluetooth, GIS) mümkün hale getirerek; hız, yakıt, lastik basıncı, trafik ve kargo koşullarının izlenmesini sağlamaktadır (Khan vd., 2022). IoT teknolojisinin faydaları arasında rota optimizasyonu, trafik sıkışıklığından kaynaklanan gecikmelerin azalması, daha az kayıp ve kaza ile düşük ulaşım maliyetleri yer almaktadır (Petthe vd., 2024).

5.1. IoT Tabanlı Sensör Ağları

Nesnelerin İnterneti (IoT) tabanlı sensör ağları; fiziksel ortamda veriyi toplayan çok sayıda sensör düğümünü, ağ geçişlerini ve bulut/edge bilişimi birleştirerek gerçek zamanlı izleme ve otomasyon sağlamaktadır.

IoT tabanlı sensör ağlarının çok sayıda kullanım alanı mevcuttur. Akıllı fabrikalar, durum izleme, kestirimci bakım vb.; akıllı şehirler, akıllı ulaşım, hava kalitesi, enerji yönetimi, afet yönetimi, akıllı binalar vb.; tarım ve çevre, hassas tarım, su seviyesi, kirlilik ve afet erken uyarı sistemleri; sağlık ve akıllı evler, giyilebilir sensörler gibi pek çok alanda uygulaması görülmektedir (Majid vd., 2022; Zeng, Pang ve Tang, 2024).

Nesnelerin İnterneti (IoT), birçok alanda umut vadeden fırsatlar sunarken, aynı zamanda yeni zorluklar da ortaya koymaktadır. Nesnelerin İnterneti (IoT) tabanlı sensör ağları, çeşitli alanlarda bağlantı, veri toplama ve otomasyonu mümkün kılarken, tam potansiyellerine ulaşabilmeleri için ölçeklenebilirlik, birlikte çalışabilirlik, güven ve enerji verimliliği gibi zorlukların üstesinden gelmeleri gerekmektedir (Ashfaq ve Nur, 2024).

5.2 Gerçek Zamanlı Takip ve Optimizasyon

Nesnelerin İnterneti (IoT), izleme ve optimizasyonu sürekli algılama-analiz-harekete geçirme döngüsü olarak yeniden tanımlamaktadır. Cihazlar veri akışı sağlarken, platformlar bunu gerçek zamanlı analiz etmekte ve sistemler otomatik olarak uyum sağlamaktadır. Fabrikalar, tarım, sağlık hizmetleri ve şehirler genelinde yapılan araştırmalar, IoT'nin kuruluşları periyodik kontrollerden öngörücü, kendi kendini optimize eden operasyonlara geçirdiğini göstermektedir.

Farklı sektörlerde uygulama alanları görülmektedir. Endüstriyel ve akıllı fabrikalarda, tahmine dayalı bakım ve üretim izleme, arıza sürelerini azaltmakta, kaliteyi artırmakta ve enerji ve tedarik zincirlerini optimize etmektedir (Pandey, Chaudhary ve Toth, 2025). Hassas tarım sektöründe, sensör ağları sulama ve girdi optimizasyonu için bitki modellerine veri sağlayarak verimi artırmakta ve israfı azaltmaktadır (Pandey vd., 2025). Sağlık ve giyilebilir cihazlar için sürekli hayati belirti takibi yaparak, daha erken müdahaleleri ve kaynakların daha iyi kullanımını sağlamaktadır (Shafi vd., 2024). Akıllı şehirler ve enerji alanında trafik, hava kalitesi ve fotovoltaiik performans, operasyonları gerçek zamanlı olarak optimize etmek ve sürdürülebilirlik hedeflerini desteklemek için izlenmektedir (Pandey vd., 2025).

Veri hacmi, gecikme süresi, enerji kullanımı, güvenlik/gizlilik ve birlikte çalışabilirlik tam otonom optimizasyonu kısıtlamaktadır (Koot, Mes ve Iacob, 2021).

5.3. Depo Yönetiminde IoT Uygulamaları

Depolarda nesnelerin interneti (IoT), etiketlenmiş ürünleri, ekipmanları ve ortamları bir depo yönetim sistemine (WMS) bağlayarak gerçek zamanlı görünürlük, otomasyon ve veri odaklı optimizasyon sağlamaktadır. IoT doğru şekilde entegre edildiğinde envanter doğruluğunda, toplama verimliliğinde ve alan ve işgücü kullanımında sürekli kazanımlar sağlamaktadır.

IoT tabanlı RFID ve makine öğrenimi destekli depo yönetim sistemi (WMS), Endüstri 4.0 ortamlarında depo verimliliğini, toplama doğruluğunu ve oldukça değişken, küçük partili siparişlere karşı dayanıklılığı artırmaktadır (Lee vd., 2018). DeneySEL ve anket çalışmaları, IoT uygulamalarının ardından işlem sürelerinde %20-30 oranında azalma, envanter doğruluğunda %99,5'e varan artış ve işgücü ile alan kullanımında önemli iyileşmeler olduğunu bildirmektedir (Uppalapati, 2025). Sistematik incelemeler, IoT depo uygulamalarının çoğunun gerçek zamanlı takip, envanter optimizasyonu, akıllı izleme ve akıllı lojistik entegrasyonunu hedeflediğini doğrulamaktadır, ancak depo araştırmaları genel olarak lojistiğe kıyasla yetersiz durumdadır (Pethe vd., 2024).

Başlıca sorunlar arasında eski depo yönetim sistemi/kurumsal kaynak planlama (ERP) sistemiyle entegrasyon, başlangıç yatırımı, siber güvenlik ve büyük heterojen tesislerde ölçeklendirme yer almaktadır (Khan, Huda ve Zaman, 2022). Gelişen trendler, tamamen akıllı, kendi kendini optimize eden depolar ve lojistik ağları için Nesnelerin İnterneti (IoT), yapay zekâ/makine öğrenimi, robotik, blockchain ve takviyeli öğrenme ile birleştirmektedir (Pethe vd., 2024).

6. Büyük Veri ve Tedarik Zinciri Analitiği

Büyük veri analitiği, tedarik zincirlerini reaktif, tahmine dayalı sistemlerden veri odaklı, öngörücü ve reçeteleyici ağlara dönüştürmektedir. Uçtan uca zincir boyunca verileri entegre eden açıklayıcı gösterge panelleri, talep tahmini, optimizasyon modelleri ve bulut/yapay zekâ mimarilerini kapsamaktadır.

6.1. Talep Tahmini ve Veri Analitiği

Talep tahmini günümüzde büyük ölçüde veri analitiğine ve makine öğrenimine dayanmaktadır. Basit zaman serisi yöntemlerinin ötesine geçerek zengin, çok kaynaklı verilerden yararlanmaktadır.

Veri analitiği talep tahminine önemli katkılar sunmaktadır. Makine öğrenimi ve derin öğrenme modelleri genellikle ARIMA ve üstel düzeltmeden daha iyi performans göstererek perakende, e-ticaret ve ilaç sektöründe %89-92'nin üzerinde doğruluk veya önemli hata azaltımı sağlamaktadır (Murni, Choiri ve Rahmawati, 2025). Modern sistemler promosyonları, fiyatları, hava durumunu, makro göstergeleri, sosyal medyayı ve pazarlama karması değişkenleri entegre ederek "talep algılama"yı ve dalgalanmalara karşı duyarlılığı artırmaktadır (Punia ve Shankar, 2022). Birçok ilgili ürün üzerinde (çapraz seri) eğitim ve büyük veri platformlarının kullanımı, sınırlı geçmişe sahip ürünler için bile daha iyi performans sağlamaktadır (Aamer vd., 2022).

Veri analitiği, özellikle makine öğrenimi, derin öğrenme ve hibrit modeller zengin iç ve dış verilerle birleştirildiğinde talep tahmini doğruluğunu sürekli olarak artırarak daha iyi envanter, kapasite ve tedarik zinciri kararlarını desteklemektedir.

6.2. Risk Analizi ve Öngörüs el Modeller

Büyük veri, tedarik zinciri risk yönetimini olay sonrası değerlendirmeden, aksaklıkların gerçek zamanlı, öngörücü ve kuralcı kontrolüne doğru şekillendirmektedir. Yapılan çalışmalara göre genel tedarik zinciri risk yönetimi çerçevelerinden sektöre özgü modellere ve gelişmiş makine öğrenimi mimarilerine kadar uzanmaktadır.

Büyük veri analitiği risk analizine olanaklar sunmaktadır. Olayları, kısıtlıkları veya fiyat artışlarını erken tespit etmek için haberlerin, sosyal medyanın, sensör/IoT verilerinin, lojistik ve işlem verilerinin entegrasyonunu sağlamaktadır (Aljohani, 2023). Güçlü BDA+BT altyapısına sahip firmalar, tüm kademelerde aksaklıkları öngören ve işaretleyen otomatik risk uyarı araçları oluşturmaktadır (Park ve Singh, 2023). Karar ağacı ve çok kriterli modeller, risk etkenleri arasındaki etkileşimleri ortaya çıkarmakta ve en uygun risk azaltma stratejilerinin seçilmesini desteklemektedir (Han, Pan ve Zhang, 2024). Büyük veri, çeşitli veri kaynakları üzerinde tahmine dayalı analizleri kullanarak sosyal riskleri, sürdürülebilirlik ihlallerini ve fikri mülkiyet ihlallerini tahmin etmeye yardımcı olmaktadır (Mani vd., 2017).

Büyük veriye dayalı olarak geliştirilen tahmin modelleri, tedarik zinciri risklerinin erken tespiti, nicelendirilmesi ve azaltılmasında sürekli olarak iyileştirme sağlamaktadır. Ancak bunlar tam değeri, sağlam veri altyapısına, katmanlar arası görünürlüğe ve büyük veri analizi uygulama risklerinin dikkatli yönetimine bağlıdır.

6.3. Performans Göstergeleri (KPI'lar)

Büyük veri tedarik zincirlerinde, performans göstergeleri (KPI'lar) statik, yalnızca finansal metriklerden analitik platformlara ve gösterge panellerine yerleştirilmiş dinamik, tahmine dayalı ve genellikle gerçek zamanlı ölçümlere dönüşmektedir. Ayrıca, analitik yeteneğin kendisini değerlendiren KPI'lar ile tedarik zinciri performans sonuçlarını ölçen KPI'lar arasında ayırım yapmaktadır. KPI kategorilerinin büyük veri tedarik zinciri yönetimi üzerindeki rolü ve örnekleri *Tablo 2*'de gösterilmiştir (Kamble ve Gunasekaran, 2020; Gopal vd., 2024; Stefanovic vd., 2025).

Tablo 2: KPI Kategorilerinin Büyük Veri Tedarik Zinciri Yönetimindeki Temel Rolü

KPI Kategorisi	Tipik örnekler	Büyük veri tedarik zinciri yönetimindeki rolü
Tedarik zinciri operasyonları	Hizmet seviyesi/doluluk oranı, sipariş teslim süresi, stok devir hızı, kapasite kullanım oranı, talep tahmini hatası, ulaşım maliyetleri/endeksleri	Temel verimlilik ve yanıt verme ölçütleri
Entegrasyon ve çeviklik	Tedarikçi/müşteri entegrasyonu, iç entegrasyon, esneklik, çeviklik, dayanıklılık, toparlanma hızı	Verilerin koordinasyonu ve dayanıklılığı nasıl geliştirdiğini gösterir.
Sürdürülebilirlik ve döngüsellik	Eko-inovasyon, ulaşım maliyeti, tersine lojistik, ürün geri kazanımı, sosyal kalkınma	Üçlü sonuç odaklı ve döngüsel tedarik zincirlerini takip eder.
Büyük veri / analitik yeteneği	Veri kalitesi, veri entegrasyonu, gelişmiş analitik kullanımı, görselleştirme, veri odaklı kültür	Analitik yatırımlarının olgunluğunu ve yatırım getirisini ölçer.

Büyük veri ve tedarik zinciri analitiğindeki temel performans göstergeleri (KPI'lar) artık analitik yetenekleri, entegrasyon/çeviklik, sürdürülebilirlik ve ayrıntılı operasyonel performansı kapsamakta olup, proaktif, veri odaklı kararları doğrudan bilgilendiren gerçek zamanlı, tahmine dayalı ve sadeleştirilmiş gösterge setlerine güçlü bir şekilde vurgu yapılmaktadır.

7. Talep Odaklı Tedarik Zinciri Yönetimi

Talep odaklı tedarik zinciri yönetimi, geleneksel tahmin odaklı modellerden, tedarigi gerçek müşteri talebiyle yakından uyumlu hale getiren uçtan uca bir sürece geçiş yaparak, şirketlerin talep dalgalanmalarına veya teslim sürelerine rağmen stok seviyelerini düşürmelerini ve hizmetlerini iyileştirmelerini sağlamaktadır. Talep odaklı tedarik zinciri yönetimi, talep ve arzda gerçek zamanlı görünürlüğe önem vererek, dijitalleşme, dayanıklılık ve sürdürülebilirlik entegrasyonu yoluyla tedarik zinciri verimliliğini ve yanıt verme yeteneğini artırmaktadır (Majda ve Imane, 2024). Özellikle rekabetçi piyasa koşullarında, resmi sözleşmeler ve stratejik BT-iş uyumu ile desteklenen tedarik zinciri ortakları arasındaki işbirliği, etkili talep odaklı tedarik zinciri yönetimi için kritik öneme sahiptir (Chi, Huang ve George, 2020).

Pazarlama analitiğini lojistik operasyonlarıyla senkronize etmek, gerçek zamanlı talep değişikliklerine dinamik olarak yanıt veren, müşteri memnuniyetini ve stok kullanımını iyileştiren esnek sistemler oluşturmak için çok önemlidir (John ve Kambona, 2025). Gelişmiş veri odaklı talep planlama teknikleri, makine öğrenimi ve gerçek zamanlı veri entegrasyonu da dahil olmak üzere, tahmin doğruluğunu ve operasyonel çevikliği artırarak, talep odaklı tedarik zinciri yönetimi süreçlerinde proaktif karar alma süreçlerini desteklemektedir (Jasiński, 2024). Genel olarak, talep odaklı tedarik zinciri yönetimi çerçeveleri daha yalın envanterleri, daha hızlı müşteri yanıtını ve pazarlama içgörülerini ile tedarik zinciri uygulaması arasında daha iyi bir uyumu teşvik etmekte ve sağlık ve üretim de dahil olmak üzere çeşitli sektörlerde giderek artan uygulamalara sahip olmaktadır (Bvuchete, Grobbelaar, ve Van Eeden, 2021).

7.1. Çekme (Pull) Sistemleri

Talep odaklı TZY’de çekme sistemleri, stok seviyelerini düşürmeye, üretim döngülerini kısaltmaya ve yanıt verme hızını artırmaya yardımcı olmak için tahminlerden ziyade gerçek müşteri talebine dayalı olarak mal üretmeye ve stok yenilemeye odaklanmaktadır. Otomotiv sektöründe, çekme tabanlı stratejiler bilgi akışını ve lojistiği entegre ederek tedarik zinciri verimliliğini optimize etmekte ve bu da rekabet gücünü ve müşteri memnuniyetini artırırken maliyetleri düşürmektedir (Wu ve Xiao, 2025).

Hibrit itme-çekme modelleri yaygın olarak kullanılmaktadır ve bu modellerde yarı mamul ürünler tahminlere dayalı olarak stok noktalarına itilir ve daha sonra gerçekleşen siparişlere göre aşağı yönde çekilir, bu da envanter maliyetlerini önemli ölçüde artırmadan teslim süresi yönetimini iyileştirmektedir (Fowler, Kim ve Shunk, 2019).

Dinamik Kanban sistemleri, talep belirsizliği altında, sipariş gecikmelerini en aza indirerek ve gerçek zamanlı talep değişikliklerine uyum sağlayarak, sabit Kanban sistemlerine göre daha iyi performans göstermekte ve daha esnek çekme üretimini desteklemektedir (Reddy vd., 2021).

Çekme stratejileri, üretimi tüketimle yakından hizalayarak kapalı döngü tedarik zincirlerindeki kırbaç etkisini azaltmaya yardımcı olmakta ve bu da daha düşük işletme maliyetlerine ve daha iyi hizmet seviyelerine yol açmaktadır (Fernández-Arribas, Ponte ve Fernández, 2024). Ancak, ahşap ürün tedarik zinciri gibi bazı sektörler, sürdürülebilirlik kaygıları ve güven sorunları nedeniyle saf çekme stratejilerini daha az uygulanabilir veya arzu edilir bulmakta ve genellikle birden fazla ayırıştırma noktasına sahip itme-çekme yaklaşımlarının bir karışımını tercih etmektedir (Milewski, 2025).

7.2. Just-in-Time ve Dijital Uygulamalar

Talep odaklı TZY, verimliliği, yanıt verme hızını ve dayanıklılığı artırmak için giderek daha fazla tam zamanında (JIT) prensibi gelişmiş dijital teknolojilerle entegre etmektedir. JIT tedarik zincirleri, müşteri bilgi yönetimi, bilgi paylaşımı ve ortaklar arasındaki iş birliği de dahil olmak üzere talep odaklı tedarik zinciri zekâsından önemli ölçüde faydalanmakta ve bu da üretim planlamasını, tedariki ve lojistiği iyileştirerek operasyonel performansı artırmaktadır (Yang vd., 2021). Gerçek zamanlı envanter takibi ve yapay zekâ destekli talep tahmini gibi dijital uygulamalar, dinamik envanter optimizasyonu ve proaktif stok yenileme olanağı sağlayarak, güvenlik stoğunu azaltırken hizmet seviyelerini iyileştirmekte ve maliyetleri düşürmektedir (Yenuganti, 2025). SAP S/4HANA gibi kurumsal kaynak planlama (ERP) sistemleri, JIT üretimini ve talebe dayalı tedarik stratejilerini destekleyen birleşik görünürlük, tahmine dayalı analiz ve IoT bağlantısı sağlayarak bu entegrasyonu kolaylaştırmaktadır (Abdul-Azeez, Ihechere ve Idemudia, 2024). Daha geniş kapsamlı dijitalleşme çabaları, şeffaflık ve güven için blok zincirini, gerçek zamanlı izleme için Nesnelerin İnterneti'ni (IoT), tahmine dayalı içgörüler için büyük veri analizini ve tedarik zinciri ekosistemi genelinde sorunsuz veri paylaşımı için bulut bilişimi içermektedir (Tiwari vd., 2024). Bu teknolojiler, geleneksel tedarik zincirlerini, piyasa değişikliklerini öngörebilen ve kaynak tahsisini gerçek zamanlı olarak optimize edebilen, çevik ve veri odaklı ağlara dönüştürmektedir (Majda ve Imane, 2024).

7.3. Esnek Üretim ve Tedarik Koordinasyonu

Talep odaklı tedarik zinciri yönetiminde esnek üretim ve tedarik koordinasyonu, belirsiz talebe uyum sağlama ve maliyetleri ve hizmet seviyelerini optimize etmek için tedarik zinciri üyeleri arasında iş birliğini vurgular. Zaman esnekliği ve opsiyonlar içeren karma sözleşmeler, perakendecilerin siparişlerini

güncellenmiş talep tahminlerine göre ayarlamasına olanak tanıyarak üreticilerin kapasite ve üretim zamanlamasını daha iyi planlamasını sağlamakta ve bu da genel tedarik zinciri koordinasyonunu ve kârlılığını artırmaktadır (Xiong, Shao ve Tang, 2025). Üretim hızını karar değişkeni olarak ele alan esnek üretim sistemleri, rastgele talebi ve teslim sürelerini yönetmeye yardımcı olarak, toplam tedarik zinciri maliyetlerini en aza indirirken, ayrı yatırımlar yoluyla kurulum maliyetlerini dengelemekte; Nash pazarlık modelleri gibi oyun teorisi yaklaşımları, bu esnek ortamlarda alıcılar ve satıcılar arasında maliyet paylaşımını ve işbirliğini kolaylaştırmaktadır (Malik ve Sarkar, 2020). Tesisler arasında kapasite paylaşımı, kaynakları bir araya getirerek talep belirsizliğine karşı dayanıklılığı artırırken, üretim kararlarının ertelenmesi sınırlı ek fayda sağlamaktadır ve bu da yukarı yönlü esnekliğin, üretimin tamamen ertelenmesinden daha değerli olduğunu göstermektedir (Ahmadi Digehsara vd., 2025). İstikrarlı talebe yönelik özel makinelerle ani talep artışlarına yönelik esnek üretim sistemlerini birleştiren hibrit üretim sistemleri, talep belirsizliği altında dayanıklılığı ve maliyet etkinliğini artırmaktadır (Elyasi vd., 2024). Ayrıca, çevresel hususları içeren esnek tedarik zincirleri, ekonomik performansı korurken emisyonları azaltmak için üretim oranlarını optimize etmekte ve sürdürülebilirliğin esnek koordinasyon stratejilerine entegre edilmesinin önemini vurgulamaktadır (Malik ve Kim, 2021).

8. Dijital Tedarik Zincirinde Risk ve Dayanıklılık

Dijital tedarik zincirleri, bağlantılı verileri, otomasyonu ve gelişmiş analitiği, giderek artan bir şekilde aksamalara, siber tehditlere ve makroekonomik şoklara maruz kalan küresel ağlarla birleştirmektedir. Araştırmalar, dijitalleşmenin dayanıklılığı önemli ölçüde güçlendirebileceğini, ancak aynı zamanda yeni risk türleri ortaya çıkardığını ve etkili olabilmesi için koordineli yönetim ve insan kaynakları gerektirdiğini göstermektedir.

Dijitalleşme tedarik zincirinde dayanıklılığı artırmaktadır ve aşağıda maddeler halinde sunulmuştur (Zhao, Hong ve Lau, 2023; Xu vd., 2025; Nayal vd., 2024):

- Dijital teknolojiler (Nesnelerin İnterneti, büyük veri, bulut, yapay zekâ, blok zinciri) görünürlüğü, algılamayı ve analizi geliştirerek, aksaklıklardan sonra hazır olmayı, müdahaleyi ve toparlanmayı iyileştirmektedir.
- Meta-analiz, dijital araçların hazırlık ve müdahale üzerinde en güçlü etkiye sahip olduğunu, iyileşme üzerinde ise biraz daha az etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Analitik yöntemler özellikle erken aşamalarda güçlüdür ve iyileşme sürecinde daha fazla etki göstermektedir.

- Dijitalleşme, emilim, yanıt ve toparlanma yeteneklerini geliştirerek COVID-19 gibi krizlerde tedarik zinciri performansını artırmaktadır.
- Dijital tedarik zinciri yetenekleri, dayanıklılığı, çevikliği ve sağlamlığı güçlendirerek, aksaklıklar karşısında sürdürülebilir uygulamaları ve rekabet avantajını mümkün kılmaktadır.

Dijital tedarik zincirlerinde artmakta olan riskler aşağıda sıralanmıştır (Ghadge vd., 2020; Yoon, 2025):

- **Siber risk:** Birbirine bağlı dijital zincirler fidye yazılımı, DDoS saldırıları ve veri ihlalleriyle karşı karşıya kalmakta, insan/davranışsal güvenlik açıkları ve şirketler arası yayılım kritik endişe kaynakları olmaktadır.
- **Teknoloji riskleri:** Blok zinciri, dijital ikizler, yapay zekâ ve kuantum araçları şeffaflığı ve analitiği geliştirirken aynı zamanda enerji tüketimini, maliyeti, karmaşıklığı ve siber güvenlik açıklarını da artırmaktadır.
- **Sistemik ve makro riskler:** düzenleyici değişiklikler, jeopolitik gerilimler, para birimi ve enerji şokları belirli aksam türlerine göre haritalandırılmış çok katmanlı dijital yanıtlar gerektirmektedir.

Dijital tedarik zincirleri iç içe geçmiş fiziksel, makroekonomik ve siber risklerle karşı karşıyadır, ancak dijitalleşme –yedeklilik, iş birliği ve yönetimle birleştiğinde– dayanıklılığı önemli ölçüde artırmaktadır. En büyük kazanımlar, özellikle analitik, dijital ikizler ve blok zinciri destekli iş birliği yoluyla daha iyi görünürlük, tahmin ve koordineli müdahaleden gelmektedir. Bununla birlikte, bu teknolojiler siber, maliyet ve karmaşıklık risklerini de beraberinde getirerek, sağlam ve uyarlanabilir dijital tedarik zincirleri oluşturmak için entegre, sistem genelinde risk yönetimi ve destekleyici politikalar hayati öneme sahip olmaktadır.

9. Sektörel Uygulamalar ve Vaka Analizleri

Son dönemde yapılan çeşitli vaka çalışmaları, firmaların dijital tedarik zincirlerini üretim sistemleriyle nasıl pratik bir şekilde birleştirdiğini, genellikle ERP, dijital ikizler ve veri odaklı planlama yoluyla gösteriyor.

9.1. ERP merkezli tedarik zinciri ve üretim entegrasyonu

ERP tabanlı “dijital mükemmellik” üzerine bir üretim vaka çalışması, malzeme yönetimi, üretim planlaması, depo operasyonları ve lojistik genelinde uçtan uca entegrasyonu açıklamaktadır. IoT, blok zinciri, AGV’ler ve dijital ikizlerle geliştirilen ERP altyapısı, depo ve nakliye verimliliğinin yanı sıra envanter doğruluğunu, üretim planlamasını ve tedarikçi ilişkileri yönetimini iyileştirmiştir (Pulluru, 2025).

Bildirilen sonuçlar arasında, ERP'nin üretim sahasındaki sensörler ve tedarik zinciri verileriyle sıkı bir şekilde entegre edilmesi durumunda stok taşıma maliyetlerinde büyük düşüşler, üretim darboğazlarında azalma ve üretim hattı verimliliğinde artış yer almaktadır (Pulluru, 2025).

Benzer şekilde, kümelenmiş bir tedarik zinciri örneği (PT XYZ), ERP ve bulut araçlarının coğrafi olarak dağılmış tesisler genelinde gerçek zamanlı envanter takibi ve tahmine dayalı analiz sağlayarak teslim sürelerini yaklaşık %30 ve işletme maliyetlerini yaklaşık %20 oranında azalttığını göstermektedir (Rahady, Tricahyono ve Dudija, 2025).

9.2. Planlama, üretim ve lojistiğin dijital ikiz entegrasyonu

Bir gıda işleme şirketinde, dijital ikiz, MILP ve ajan tabanlı simülasyon kullanarak tedarik, üretim ve dağıtım kararlarını (PPD'ler) entegre etmektedir. Bu, tedarik zinciri ve üretim sistemi genelinde birleşik bir planlama katmanı oluşturmaktadır (Maheshwari vd., 2023).

Entegre model, toplam işlem süresini, teslim süresini, kapasite kullanımını ve hizmet seviyesini (%94) iyileştirirken, birikmiş işleri azaltmakta ve ikmal ve planlama seçeneklerinin gerçek zamanlı simülasyonunu mümkün kılmaktadır (Maheshwari vd., 2023).

Ayrıca, petrol ve doğal gaz üreticisi bir firmanın iç tedarik zincirleri için çoklu tesis simülasyonuna dayalı dijital ikiz, üretim planlamasını tesisler arası iç lojistikle birleştirmektedir. Dijital ikiz olmayan bir temel senaryoyla karşılaştırıldığında, platform farklı planlama kurallarının ve iç tedarik konfigürasyonlarının “ne olurdu” analizini mümkün kılarak ortalama akış süresini, gecikmeleri ve geç siparişleri önemli ölçüde azaltmaktadır (Cimino vd., 2024).

9.3. Dijital odaklı yalın/çevik üretim-tedarik zinciri modelleri

Bir elektronik üreticisinde ERP, dijital Kanban ve değer akışı haritalamasının entegrasyonunu ele alan bir örnek olay çalışması yapılmıştır. ERP, paylaşılan veriler sağlarken, Kanban talep tabanlı stok yenilemeyi mümkün kılmakta ve VSM, tedarik zinciri ve üretim sahası genelinde uçtan uca malzeme ve bilgi akışlarını uyumlu hale getirmektedir (Osho, Omisola ve Shiyanbola, 2024).

Sonuçlar arasında daha kısa teslim süreleri, iyileştirilmiş envanter doğruluğu, daha iyi makine kullanımı ve daha yüksek yanıt verme hızı yer alırken, aynı zamanda değişim direnci ve üretim sahasında doğru, gerçek zamanlı veri yakalama ihtiyacı gibi zorlukları da ortaya koymaktadır (Osho, Omisola ve Shiyanbola, 2024).

9.4. Sektöre özgü dijital tedarik zinciri-üretim uyumu

Dijital tedarik zincirini uygulayan bir margarin üreticisi, operasyonel verimlilikte %17 artış, arıza sürelerinde %66,7 azalma ve üretim kapasitesinde %23'ün üzerinde artış kaydetmektedir ve bu da tedarik, üretim planlaması ve atık azaltımı arasında sıkı bir bağlantı kurulmasını sağlamaktadır (Nurdien, Kustiwan ve Supriyati, 2025).

Başka bir örnekte, parça bazlı üretim örneği, dijital ikiz teknolojisinin bileşen teslimatlarını ve nihai sevkiyatı üretimle nasıl senkronize ettiğini, depo süresini nasıl en aza indirdiğini ve çevik, düşük stoklu operasyonları nasıl desteklediğini göstermektedir (Resman, Debevec ve Herakovič, 2025).

10. Sonuç

Dijital Tedarik Zinciri Yönetimi (DTZY) ve bunun üretim sistemlerine entegrasyonu, kuruluşların değer yaratma süreçlerini tasarlama, koordine etme ve optimize etme biçiminde temel bir dönüşümü temsil etmektedir. Tedarik zincirleri giderek daha dijital, birbirine bağlı ve akıllı hale geldikçe, üretim sistemleri statik operasyonel birimlerden dinamik, duyarlı ve veri odaklı ekosistemlere dönüşmektedir.

Dijital teknolojilerin entegrasyonu, tedarik ağları genelinde şeffaflığı, izlenebilirliği ve işbirliğini artırırken, tahmine dayalı analitik, gerçek zamanlı kontrol ve otonom karar vermeyi mümkün kılmaktadır. Bu yetenekler, operasyonel verimliliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda tedarik zincirinin kesintilere ve belirsizliklere karşı dayanıklılığını da güçlendirmektedir. Jeopolitik istikrarsızlık, iklim riskleri ve hızlı teknolojik değişimlerin damgasını vurduğu bir çağda, dijital olarak entegre tedarik zincirleri, çeviklik ve uyarlanabilirlik sayesinde stratejik bir avantaj sağlamaktadır.

Bununla birlikte, dijital dönüşüm yalnızca teknolojik bir yükseltme değil, aynı zamanda organizasyonel yeniden yapılandırma, kültürel adaptasyon, yönetim uyumu ve stratejik yatırım gerektirmektedir. Firmalar, entegrasyonun faydalarını tam olarak gerçekleştirmek için dijital yetkinlikler geliştirmeli, siber güvenliğin sağlanmasını sağlamalı ve işlevler arası işbirliğini teşvik etmelidir.

Geleceğe bakıldığında, Endüstri 5.0, insan merkezli üretim sistemleri, yapay zekâ odaklı otonom tedarik ağları ve sürdürülebilir dijital ekosistemler gibi yeni paradigmlar, tedarik zinciri-üretim entegrasyonunu yeniden tanımlayacaktır. Gelecekteki araştırmalar, hibrit yönetim modellerini, yapay zekâ odaklı karar sistemlerinin etik etkilerini ve dijital altyapıların uzun vadeli sürdürülebilirlik etkisini incelemelidir.

Sonuç olarak, dijital tedarik zinciri yönetiminin üretim sistemlerine başarılı bir şekilde entegrasyonu, sadece operasyonel mükemmelliğe ilişkin değil, aynı zamanda dijital çağda gelişebilecek dayanıklı, akıllı ve sürdürülebilir değer ağları oluşturmakla ilgilidir.

Kaynakça

- Aamer, A., Eka Yani, L., & Alan Priyatna, I. (2020). Data analytics in the supply chain management: Review of machine learning applications in demand forecasting. *Operations and Supply Chain Management: An International Journal*, 14(1), 1-13. <https://doi.org/10.31387/oscm0440281>
- Abdul-Azeez, O., Ihechere, A. O., & Idemudia, C. (2024). Optimizing supply chain management: strategic business models and solutions using SAP S/4HANA. *Magna Scientia Advanced Research and Reviews*, 11(1), 339-351. <https://doi.org/10.30574/msarr.2024.11.1.0097>
- Adenekan, O. A., Solomon, N. O., Simpa, P., & Obasi, S. C. (2024). Enhancing manufacturing productivity: A review of AI-Driven supply chain management optimization and ERP systems integration. *International Journal of Management & Entrepreneurship Research*, 6(5), 1607-1624. <https://doi.org/10.51594/ijmer.v6i5.1126>.
- Ahmadi Digehsara, A., Ardestani-Jaafari, A., Roshanaei, V., & Mazahir, S. (2025). The Value of flexibility in robust supply chain network design. *Production and Operations Management*, 35(1), 223-241. <https://doi.org/10.1177/10591478251356753>
- Aljohani, A. (2023). Predictive analytics and machine learning for real-time supply chain risk mitigation and agility. *Sustainability*, 15(20), 15088. <https://doi.org/10.3390/su152015088>
- Alzoubi, H. M., Elrehail, H., Hanaysha, J. R., Al-Gasaymeh, A., & Al-Adaileh, R. (2022). The role of supply chain integration and agile practices in improving lead time during the COVID-19 crisis. *International Journal of Service Science, Management, Engineering, and Technology (IJSSMET)*, 13(1), 1-11. <https://doi.org/10.4018/ijssmet.290348>.
- Amiri, S. M. H., Islam, M. M., Hossen, M. S., & Hasan, S. M. (2025). Blockchain-enabled solutions for enhancing supply chain transparency and traceability. *International Journal of Science and Research Archive*, 16(1), 928-945. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2025.16.1.2102>
- Andronic, M., Lăzăroiu, G., Iatagan, M., Hurloiu, I., & Dijmărescu, I. (2021). Sustainable cyber-physical production systems in big data-driven smart urban economy: A systematic literature review. *Sustainability*, 13(2), 751. <https://doi.org/10.3390/su13020751>
- Ashfaq, M., & Nur, S. (2024). IoT Sensor networks-orchestrating connectivity, efficiency, and intelligence across diverse domains. *Int. J. Innov. Res. Comput. Sci. Technol*, 12(3), 154-161. <https://doi.org/10.55524/ijircst.2024.12.3.26>
- Aslan, E. (2013). Supply chain management–enterprise system integration and supply chain resource planning. *Journal of International Management Educational and Economics Perspectives*, 1(2), 17-24. <https://izlik.org/JA77PG32RG>

- Berneis, M., Bartsch, D., & Winkler, H. (2021). Applications of blockchain technology in logistics and supply chain management—insights from a systematic literature review. *Logistics*, 5(3), 43. <https://doi.org/10.3390/logistics5030043>
- Bvuchete, M., Grobbelaar, S. S., & Van Eeden, J. (2021). A network maturity mapping tool for demand-driven supply chain management: A case for the public healthcare sector. *Sustainability*, 13(21), 11988. <https://doi.org/10.3390/su132111988>
- Byreddy, M. (2025). Integrated cloud-based supply chain ecosystem: Connecting stakeholders through real-time data visibility and collaborative analytics. *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*, 15(2), 2460-2469. <https://doi.org/10.30574/wjaets.2025.15.2.0742>.
- Chi, M., Huang, R., & George, J. (2020). Collaboration in demand-driven supply chain: Based on a perspective of governance and IT-business strategic alignment. *Int. J. Inf. Manag.*, 52, 102062. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.102062>.
- Christian, L., Tarigan, Z., Siagian, H., Basana, S., & Jie, F. (2024). The influence of supply chain integration on firm performance through lean manufacturing, green supply chain management and risk management. *Uncertain Supply Chain Management*, 12, 2699-2712. <https://doi.org/10.5267/j.uscm.2024.5.002>.
- Cimino, A., Longo, F., Mirabelli, G., Solina, V., & Veltri, P. (2024). Enhancing internal supply chain management in manufacturing through a simulation-based digital twin platform. *Computers & Industrial Engineering*, 198, 110670. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110670>.
- Doğan, N. Ö., & Derici, S. (2025). Historical evolution of supply chain management in the VUCA age: Sustainable, LARG and digital supply chain managements. *Gaziantep Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 24(1), 273-293. <https://doi.org/10.21547/jss.1473810>
- Dong, S., Abbas, K., Li, M., & Kamruzzaman, J. (2023). Blockchain technology and application: an overview. *PeerJ Computer Science*, 9, e1705. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1705>.
- Elyasi, M., Altan, B., Ekici, A., Özener, O. Ö., Yanıkoğlu, İ., & Dolgui, A. (2024). Production planning with flexible manufacturing systems under demand uncertainty. *International Journal of Production Research*, 62(1-2), 157-170. <https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2288722>.
- Ezeamii, F., Idoko, I., & Ojochogwu, O. (2025). The Role of digital transformation and predictive analytics in modern supply chain management: A review of challenges, innovations, and future prospects. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 6(5), 15300-15312. <https://doi.org/10.55248/gengpi.6.0525.1973>.

- Fernández-Arribas, C. L., Ponte, B., & Fernández, I. (2024). Shaping closed-loop supply chain dynamics: Mitigating the bullwhip effect and improving customer satisfaction in production systems with material reuse. *Computers & Industrial Engineering*, 195, 110407. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110407>.
- Fowler, J., Kim, S., & Shunk, D. (2019). Design for customer responsiveness: Decision support system for push-pull supply chains with multiple demand fulfillment points. *Decis. Support Syst.*, 123, 113071. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2019.113071>.
- Gerrikagoitia, J. K., Unamuno, G., Urkia, E., & Serna, A. (2019). Digital manufacturing platforms in the industry 4.0 from private and public perspectives. *Applied Sciences*, 9(14), 2934. <https://doi.org/10.3390/app9142934>
- Ghadge, A., Weiß, M., Caldwell, N. D., & Wilding, R. (2020). Managing cyber risk in supply chains: a review and research agenda. *Supply Chain Management: An International Journal*, 25(2), 223-240. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3426030>
- Gopal, P. R. C., Rana, N. P., Krishna, T. V., & Ramkumar, M. (2024). Impact of big data analytics on supply chain performance: an analysis of influencing factors. *Annals of Operations Research*, 333(2), 769-797. <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04749-6>
- Guo, H., & Yu, X. (2022). A survey on blockchain technology and its security. *Blockchain: research and applications*, 3(2), 100067. <https://doi.org/10.1016/j.bcr.2022.100067>.
- Han, G., Pan, X., & Zhang, X. (2024). Big data-driven risk decision-making and safety management in agricultural supply chains. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 16(1), 121-138. <https://doi.org/10.15586/qas.v16i1.1445>
- Hautala-Kankaanpää, T. (2022). The impact of digitalization on firm performance: examining the role of digital culture and the effect of supply chain capability. *Business process management journal*, 28(8), 90-109. <https://doi.org/10.1108/BPMJ-03-2022-0122>
- Jasiński, P. (2024). The demand planning renaissance: A data-driven approach. *Journal of Supply Chain Management, Logistics and Procurement*, 7(1). <https://doi.org/10.69554/xmob6236>.
- John, M., & Kambona, E. (2025). Demand-Driven Supply Chains: A framework for Synchronizing Marketing Analytics with Logistics Operations. *International Journal of Innovative Research in Engineering & Multidisciplinary Physical Sciences*, 13(3). <https://doi.org/10.37082/ijirms.v13.i3.232583>.
- Jum'a, L., Zighan, S., & Alkalha, Z. (2025). Influence of supply chain digitalization on supply chain agility, resilience and performance: environmental

- dynamism as a moderator". *Journal of Manufacturing Technology Management*, 36(4), 798–819. <https://doi.org/10.1108/JMTM-08-2024-0423>
- Kamble, S. S., & Gunasekaran, A. (2020). Big data-driven supply chain performance measurement system: a review and framework for implementation. *International Journal of Production Research*, 58(1), 65–86. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1630770>
- Karamahmutoğlu, F. & Tüzemen, A. (2025). Tarımsal gıda sektöründe zaman pencereli araç rotalama problemi: Taşköprü sarımsağı üzerine matematiksel modelleme örneği. *Journal of Academic Opinion*, 5(2), 66-81. <https://academicopinion.org/index.php/pub/article/view/85>
- Kavzoğlu, T., & Şahin, E. K. (2012). Bulut bilişim teknolojisi ve bulut Cbs uygulamaları. *IV. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu*, 16-19.
- Khan, M. G., Huda, N. U., & Zaman, U. K. U. (2022). Smart warehouse management system: architecture, real-time implementation and prototype design. *Machines*, 10(2), 150. <https://doi.org/10.3390/machines10020150>
- Khan, Y., Su'ud, M. B. M., Alam, M. M., Ahmad, S. F., Ahmad, A. Y. B., & Khan, N. (2022). Application of internet of things (IoT) in sustainable supply chain management. *Sustainability*, 15(1), 694. <https://doi.org/10.3390/su15010694>
- Khan, M., & Sinha, A. (2022). Cloud computing leads towards sustainable supply chain management. *ECS Transactions*, 107(1). <https://doi.org/10.1149/10701.16573ecst>.
- Koot, M., Mes, M. R., & Iacob, M. E. (2021). A systematic literature review of supply chain decision making supported by the Internet of Things and Big Data Analytics. *Computers & industrial engineering*, 154, 107076. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.107076>
- Kotzab H. (1999). Improving supply chain performance by efficient consumer response? A critical comparison of existing ECR approaches. *Journal of Business & Industrial Marketing*, Vol. 14 No. 5-6 pp. 364–377. <https://doi.org/10.1108/08858629910290111>
- Kumar, N., Kumar, K., Aeron, A., & Verre, F. (2025). Blockchain technology in supply chain management: Innovations, applications, and challenges. *Telematics and Informatics Reports*, 18, 100204. <https://doi.org/10.1016/j.teler.2025.100204>
- Lee, C. K., Lv, Y., Ng, K. K., Ho, W., & Choy, K. L. (2018). Design and application of Internet of things-based warehouse management system for smart logistics. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2753–2768. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1394592>
- Maheshwari, P., Kamble, S., Belhadi, A., Venkatesh, M., & Abedin, M. Z. (2023). Digital twin-driven real-time planning, monitoring, and controlling in food supply chains. *Technological Forecasting and Social Change*, 195, 122799. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122799>.

- Majda, B., & Imane, I. (2024). Demand-driven supply chain harmonizing digitalization, resilience, and sustainability : Exploring the synergy through a bibliometric literature review. *2024 IEEE 15th International Colloquium on Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA)*, 1-7. <https://doi.org/10.1109/logistiqua61063.2024.10571448>.
- Majid, M., Habib, S., Javed, A. R., Rizwan, M., Srivastava, G., Gadekallu, T. R., & Lin, J. C. W. (2022). Applications of wireless sensor networks and internet of things frameworks in the industry revolution 4.0: A systematic literature review. *Sensors*, 22(6), 2087. <https://doi.org/10.3390/s22062087>
- Malik, A. I., & Sarkar, B. (2020). Coordination supply chain management under flexible manufacturing, stochastic leadtime demand, and mixture of inventory. *Mathematics*, 8(6), 911. <https://doi.org/10.3390/math8060911>.
- Malik, A., & Kim, B. (2021). Coordination supply chain management under flexible cleaner production system and stochastic conditions. *Annals of Operations Research*, 349, 1109-1150. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-04303-w>.
- Mani, V., Delgado, C., Hazen, B. T., & Patel, P. (2017). Mitigating supply chain risk via sustainability using big data analytics: Evidence from the manufacturing supply chain. *Sustainability*, 9(4), 608. <https://doi.org/10.3390/su9040608>
- Masa'deh, R. E., Muheisen, I., Obeidat, B., & Bany Mohammad, A. (2022). The impact of supply chain integration on operational performance: An empirical study. *Sustainability*, 14(24), 16634. <https://doi.org/10.3390/su142416634>.
- Mayani, M. (2025). Blockchain technology: revolutionizing data security and decentralized applications. *International Scientific Journal of Engineering and Management*, 1(5). <https://doi.org/10.55041/isjem00116>.
- Milewski, D. (2025). The Combined decision problem: “Pull” vs. “Push” and the degree of centralization of warehousing in the field of physical distribution with a special focus on the polish market. *Applied Sciences*, 15(7), 3970. <https://doi.org/10.3390/app15073970>
- Mhaskey, S. V. (2024). SCM 4.0: Navigating the impact of Industry 4.0 on supply chain management through digitalization and technology integration. *Int. J. Comput. Eng. Res. Trends*, 11(10), 1-12. <https://doi.org/10.22362/ijcert/2024/v11/i10/v11i1001>
- Murni, C. K., Choiri, A. F., & Rahmawati, F. D. (2025). Product demand forecasting in e-commerce with big data analytics: Personalization, decision making and optimization. *Journal of Informatics Development*, 3(2), 1-6. <https://doi.org/10.30741/jid.v3i2.1548>
- Nayal, K., Raut, R., Queiroz, M., & Priyadarshinee, P. (2024). Digital supply chain capabilities: Mitigating disruptions and leveraging competitive advantage under COVID-19. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 71, 10441-10454. <https://doi.org/10.1109/tem.2023.3266151>.

- Nurdien, A., Kustiwan, S., & Supriyati, S. (2025). Analisis pengembangan digital supply chain (DSC) untuk pemenuhan target produksi pada perusahaan minyak shortening. *Jurnal Teknik Industri Terintegrasi*, 8(2), 1698-1706. <https://doi.org/10.31004/jutin.v8i2.43523>.
- Nwani, S. (2025). Evaluating the impact of Blockchain technology on supply chain transparency and traceability. *Gulf Journal of Advance Business Research*, 3(6), 1065-1093. <https://doi.org/10.51594/gjabr.v3i6.149>.
- Oluyisola, O. E., Bhalla, S., Sgarbossa, F., & Strandhagen, J. O. (2022). Designing and developing smart production planning and control systems in the industry 4.0 era: a methodology and case study. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 33(1), 311-332. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01808-w>
- Osho, G., Omisola, J., & Shiyabola, J. (2024). A Model for digitally-driven supply chain optimization: Integrating ERP, kanban, and value stream mapping for agile manufacturing systems. *International Journal of Future Engineering Innovations*, 1(1), 67-85. <https://doi.org/10.54660/ijfei.2024.1.1.67-85>.
- Pandey, S., Chaudhary, M., & Tóth, Z. (2025). An investigation on real-time insights: enhancing process control with IoT-enabled sensor networks. *Discover Internet of Things*, 5(1), 29. <https://doi.org/10.1007/s43926-025-00124-6>
- Park, A., & Li, H. (2021). The effect of blockchain technology on supply chain sustainability performances. *Sustainability*, 13(4), 1726. <https://doi.org/10.3390/su13041726>
- Park, M., Singh, N.P. (2023). Predicting supply chain risks through big data analytics: role of risk alert tool in mitigating business disruption. *Benchmarking: An International Journal*, 30(5), 1457-1484. <https://doi.org/10.1108/BIJ-03-2022-0169>
- Pauli, T., Fietl, E., & Matzner, M. (2021). Digital industrial platforms: T. Pauli et al. *Business & Information Systems Engineering*, 63(2), 181-190. <https://doi.org/10.1007/s12599-020-00681-w>
- Pethe, S., Sahu, A., Kodarlikar, S., & Vamshidhar, M. (2024, June). IoT research in supply chain management and logistics: Real-time asset tracking and inventory management. In *2024 International Conference on Innovations and Challenges in Emerging Technologies (ICICET)* (pp. 1-5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/icicet59348.2024.10616272>
- Pulluru, S. R. (2025). Transforming manufacturing supply chains through ERP implementation: A Case study in digital excellence. *European Journal of Computer Science and Information Technology*, 13(37), 11-24. <https://doi.org/10.37745/ejcsit.2013/voll3n371124>.
- Punia, S., & Shankar, S. (2022). Predictive analytics for demand forecasting: A deep learning-based decision support system. *Knowl. Based Syst.*, 258, 109956. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.109956>.

- Rahady, P., Tricahyono, D., & Dudija, N. (2025). Study of improving cluster supply chain capability at PT. XYZ through the implementation of digital connectivity. *Journal of Business and Management*, 3(4), 289-301. <https://doi.org/10.61978/commercium.v3i4>
- Reddy, K., Rao, A., Lanka, K., & Gopal, P. (2021). System dynamics modelling of fixed and dynamic Kanban controlled production systems: a supply chain perspective. *Journal of Modelling in Management*, 18(1), 17-35. <https://doi.org/10.1108/jm2-06-2020-0168>.
- Resman, M., Debevec, M., & Heraković, N. (2025). Using digital twin technology to improve the organization of the supply chain in piece type of production. *Systems*, 13(7), 505. <https://doi.org/10.3390/systems13070505>
- Ryalat, M., ElMoquet, H., & AlFaouri, M. (2023). Design of a smart factory based on cyber-physical systems and internet of things towards industry 4.0. *Applied Sciences*, 13(4), 2156. <https://doi.org/10.3390/app13042156>.
- Salah, A., Çağlar, D., & Zoubi, K. (2023). The impact of production and operations management practices in improving organizational performance: The mediating role of supply chain integration. *Sustainability*, 15(20), 15140. <https://doi.org/10.3390/su152015140>.
- Salamah, E., Alzubi, A., & Yinal, A. (2024). Unveiling the impact of digitalization on supply chain performance in the post-COVID-19 era: The mediating role of supply chain integration and efficiency. *Sustainability*, 16(1), 304. <https://doi.org/10.3390/su16010304>
- Shafi, I., Din, S., Farooq, S., Díez, I. D. L. T., Breñosa, J., Espinosa, J. C. M., & Ashraf, I. (2024). Design and development of patient health tracking, monitoring and big data storage using Internet of Things and real time cloud computing. *Plos one*, 19(3), e0298582. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0298582>
- Stefanovic, N., Radenkovic, M., Bogdanovic, Z., Plasic, J., & Gaborovic, A. (2025). Adaptive cloud-based big data analytics model for sustainable supply chain management. *Sustainability*, 17(1), 354. <https://doi.org/10.3390/su17010354>
- Stevens, C. P. (2003). Enterprise resource planning: A trio of resources. *Information Systems Management*, 20(3), 61–67. <https://doi.org/10.1201/1078/43205.20.3.20030601/43074.7>
- Tao, F., Qi, Q., Wang, L., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twins and cyber-physical systems toward smart manufacturing and industry 4.0: Correlation and comparison. *Engineering*, 5(4), 653-661. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121976>
- 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. <https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2316476>

- Tripathi, G., Ahad, M. A., & Casalino, G. (2023). A comprehensive review of blockchain technology: Underlying principles and historical background with future challenges. *Decision analytics journal*, 9, 100344. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100344>
- Uppalapati, P. (2025). Optimizing warehouse operations through real-time integration with internet of things devices. *European Modern Studies Journal*, 9(3). [https://doi.org/10.59573/emsj.9\(3\).2025.43](https://doi.org/10.59573/emsj.9(3).2025.43).
- Wu, H., Jiang, S., & Cao, J. (2022). High-efficiency blockchain-based supply chain traceability. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24(4), 3748-3758. <https://doi.org/10.1109/tits.2022.3205445>.
- Wu, X., & Xiao, L. (2025, March). Research on supply chain efficiency optimization in the automobile manufacturing industry based on pull supply chain management strategies. In *Proceedings of the 2025 6th International Conference on Computer Information and Big Data Applications* (pp. 578-582). <https://doi.org/10.1145/3746709.3746809>
- Xiong, X., Shao, L., & Tang, L. (2025). Supply chain production and procurement strategies for the mixed contract with time flexibility and options. *International Transactions in Operational Research*, 33(4). <https://doi.org/10.1111/itor.13618>.
- Xu, J., Liu, F., Luo, Y., & Xu, X. (2025). Stage-specific impacts of digital technologies on supply chain resilience: meta-analytic evidence for continuous process improvement. *Business Process Management Journal*. <https://doi.org/10.1108/bpmj-04-2025-0550>.
- Yadav, A., Singh, N., & Kushwaha, D. (2023). Evolution of blockchain and consensus mechanisms & its real-world applications. *Multimedia Tools and Applications*, 82, 1-46. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-14624-6>.
- Yang, J., Xie, H., Yu, G., & Liu, M. (2021). Achieving a just-in-time supply chain: The role of supply chain intelligence. *International Journal of Production Economics*, 231, 107878. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107878>.
- Yang, D., Li, R., & Liu, S. (2025). Exploring the influence of cloud computing on supply chain performance: The mediating role of supply chain governance. *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research*, 20(2), 70. <https://doi.org/10.3390/jtaer20020070>
- Yang, J., Zhang, X., Guo, X., Xiong, Q., Tamamine, T., & Lin, J. (2025). Digital transformation and enterprise performance: supply chain concentration and efficiency. *Management Decision*. <https://doi.org/10.1108/MD-11-2024-2548>
- Yenugula, M., Sahoo, S., & Goswami, S. (2023). Cloud computing in supply chain management: Exploring the relationship. *Management Science Letters*, 13(3), 193-210. <https://doi.org/10.5267/j.msl.2023.4.003>

- Yenuganti, N. (2025). Transforming supply chain efficiency: The integration of real-time inventory tracking and AI-powered demand forecasting. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, 11(2), 1355-1363. <https://doi.org/10.32628/cseit25112491>.
- Yoon, J., Alkhudary, R., Talluri, S., & Fénies, P. (2025). Risk management and macroeconomic disruptions in supply chains: The role of blockchain, digital twins, generative AI, and quantum computing. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 72, 2995-3009. <https://doi.org/10.1109/tem.2025.3585433>.
- Yue, X., Cai, H., Yan, H., Zou, C., & Zhou, K. (2015). Cloud-assisted industrial cyber-physical systems: An insight. *Microprocessors and Microsystems*, 39(8), 1262-1270.
- Zeng, F., Pang, C., & Tang, H. (2024). Sensors on internet of things systems for the sustainable development of smart cities: a systematic literature review. *Sensors*, 24(7), 2074. <https://doi.org/10.3390/s24072074>
- Židek, K., Pitel, J., Adámek, M., Lazorík, P., & Hošovský, A. (2020). Digital twin of experimental smart manufacturing assembly system for industry 4.0 concept. *Sustainability*, 12(9), 3658. <https://doi.org/10.3390/su12093658>
- Zhang, R., Xue, R., & Liu, L. (2019). Security and privacy on blockchain. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 52(3), 1-34. <https://doi.org/10.1145/3316481>
- Zhang, X., Liang, R., & Chen, Y. (2025). The impact of digital transformation of chain-leading enterprises on supply chain efficiency. *Supply Chain Management: An International Journal*, 30(3), 369-382. <https://doi.org/10.1108/scm-11-2024-0772>.
- Zhao, N., Hong, J., & Lau, K. H. (2023). Impact of supply chain digitalization on supply chain resilience and performance: A multi-mediation model. *International journal of production economics*, 259, 108817. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108817>.
- Zheng, P., Wang, H., Sang, Z., Zhong, R., Liu, Y., Liu, C., Mubarak, K., Yu, S., & Xu, X. (2018). Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 13, 137-150. <https://doi.org/10.1007/s11465-018-0499-5>.
- Zhen, Y., & Shang, L. (2025). The effect of enterprise digital transformation on supply chain efficiency and its transmission mechanism. *Scientific Reports*, 15(1), 38321. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-22223-8>
- Zuo, Y. (2025). The impact of supply chain digitalization on operational efficiency in small and medium enterprises. *Accounting and Corporate Management*, 7(4). <https://doi.org/10.23977/acccm.2025.070415>.

Tedarik Zincirinde Dijital Dönüşüm, Verimlilik, İzlenebilirlik, Güvenilirlik ve Sürdürülebilirlik

Hakan Ezici¹

Muhammed Parlak²

Özet

Tedarik zinciri yönetiminde teknoloji kullanımı, tedarik zincirinin organizasyonunu ve kapsamını destekleyen bir uygulama olarak ortaya çıkmıştır. Bu çalışma, modern tedarik zincirlerinin ihtiyaçlarını karşılamaya yönelik mevcut araçları ele alarak teknolojinin bu süreçlerin ayrılmaz bir parçası haline gelmesiyle tedarik zincirinin nasıl daha verimli ve başarılı işlediğini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Teknolojinin tedarik zinciri yönetimindeki rolü, lojistik ve müşteri hizmetlerinden depo yönetimine ve tedarikçi iş birliğine kadar çeşitli alanlarda maliyetleri düşürmeye ve performansı artırmaya yardımcı olur. Teknolojiyi tedarik yönetimi ve lojistik uygulama geliştirme süreçlerine entegre etmenin anahtarı, malların ve malzemelerin gerçek zamanlı takibini sağlayan gelişmiş görünürlük ve şeffaflıktır. İşletmelerin süreçlerinde değişiklik yapmalarına ve operasyonlarını optimize etmelerine olanak tanıyan bu gelişmiş bilgiler, potansiyel darboğazların ve verimsizliklerin önceden belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Tedarik Zinciri Yönetimi (TZY), güvenlik, gizlilik, izlenebilirlik, şeffaflık, veri doğruluğu, mahremiyet, verimlilik, hesap verebilirlik ve güvene odaklanır; bunların tümü dijital teknolojiler tarafından önemli ölçüde geliştirilmiştir. Artan küreselleşme ve rekabet, şirketleri dijitalleşmeyi benimsemeye yöneltmiş ve Nesnelerin İnterneti (IoT), yapay zekâ, blok zinciri, büyük veri analitiği ve robotik sistemler, tedarik zincirlerinin daha esnek ve verimli hale gelmesini sağlamıştır. Bu çalışma, literatür taramasıyla teknolojik dönüşümün sağlayabileceği faydaları vurgulamaktadır. Bulgular, dijital teknolojilerin sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi için stratejik bir zorunluluk haline geldiğini göstermektedir.

1 Dr.Öğr.Gör, İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, hakan.ezici@yeniuyuzil.edu.tr, 0000-0002-9402-792X

2 Öğr.Gör. İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, muhammed.parlak@yeniuyuzil.edu.tr, 0000-0002-6485-5556

1. Giriş

Üretim ve küresel ticaretin hızla dijitalleştiği günümüzde tedarik zinciri yönetimi, yalnızca fiziksel mal akışını değil; aynı zamanda bilgi ve veri akışını da kapsar hale gelmiştir (Ivanov, 2023). Artan rekabet, çeşitlenen müşteri talepleri ve sürdürülebilirlik baskıları, işletmeleri süreçlerini yeniden tasarlamaya zorlamaktadır. Bu bağlamda dijital teknolojilerin entegrasyonu; verimlilik, şeffaflık, izlenebilirlik ve çevresel performans açısından kritik bir rol üstlenmektedir (Kache ve Seuring, 2017).

Yapay zekâ (YZ) ve makine öğrenmesi (MÖ), tedarik zinciri yönetimini güçlendirmede etkili araçlar olarak öne çıkmaktadır. Bu ileri teknolojiler, işletmelerin tedarik zinciri süreçlerini planlama, yürütme ve yapılandırma biçimlerini köklü biçimde dönüştürmektedir. YZ ve MÖ'nün bu alandaki en önemli uygulamalarından biri, yüksek doğrulukta talep tahmini sunma kapasiteleridir (Banur vd. 2024).

Bu çalışma, yapay zekâ, blok zinciri, dijital ikizler ve Nesnelerin İnterneti (IoT) gibi ileri teknolojilerin operasyonel faaliyetleri ve sürdürülebilirlik uygulamalarını nasıl yeniden şekillendirdiğini ortaya koyarak tedarik zinciri yönetimindeki dijital dönüşüme ilişkin gelişmekte olan literatüre katkı sunmaktadır. Bu teknolojileri çoğunlukla birbirinden bağımsız ele alan önceki çerçevelerden farklı olarak, bu çalışmanın bulguları söz konusu teknolojilerin görünürlüğü artırma, verimsizlikleri azaltma ve çevresel hedefleri eş zamanlı olarak desteklemedeki bütünleşik rolünü gözler önüne sermektedir.

Bbu çalışma, teknoloji benimsenmesi ile sürdürülebilir lojistik arasındaki kavramsal bağı güçlendirmektedir. Tedarik zinciri sürdürülebilirliğinin yalnızca karbon metrikleri veya mevzuata uyum çerçevesinde değil; gerçek zamanlı veri entegrasyonu, sistem yanıt verilebilirliği ve dijital dayanıklılık perspektifinden de değerlendirilmesi gerektiği görüşünü pekiştirmektedir.

Öte yandan analiz, operasyonel mükemmellik ile çevresel sorumluluğun birbirini dışlayan hedefler olmadığını; aksine, stratejik teknoloji kullanımının birbirini tamamlayan sonuçları olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, dijitalleşme ile ekolojik sorumluluk arasındaki sinerjik potansiyeli çoğunlukla göz ardı eden geleneksel tedarik zinciri teorilerine yeni bir boyut katmaktadır.

Akademik literatürden elde edilen bulguları inceleyen bu çalışma, gelecekteki araştırmalar için bir çerçeve sunmayı amaçlamaktadır. Ele alınan araştırma soruları şunlardır:

Tedarik zinciri yönetiminde dijital teknolojilerin temel uygulama alanları nelerdir? Dijital teknolojiler, tedarik zinciri yönetiminde şeffaflık, güvenlik ve verimliliğin artırılmasında ne ölçüde etkilidir? Tedarik zinciri yönetiminde

dijital teknolojilerin uygulanması ile sürdürülebilirlik arasındaki ilişki nasıl tanımlanabilir?

2. Literatür İncelemesi

2.1 Dijital Dönüşüm ve Endüstri 4.0

Küreselleşen tedarik zinciri, üstesinden gelinmesi gereken birçok zorluğu beraberinde getirmiştir. İzlenebilirlik ve güvenilirlik, bunların en önemlileri arasındadır. Endüstri 4.0, tedarik zinciri ve lojistik alanlarında dijitalleşme süreçlerine öncülük etmiştir. Tedarik zinciri dijitalleşmesinde entegrasyonu sağlamanın en önemli desteği, bilgi teknolojilerinden gelmektedir. McKinsey & Company'ye göre, kuruluşlar yapay zekâyı tedarik zinciri yönetimine entegre ederek yıllık 1,3 ila 2 trilyon dolar arasında değer yaratabilir (www.mckinsey.com). PricewaterhouseCoopers (PwC) tahminlerine göre, yapay zekâ 2030 yılına kadar küresel ekonomiye 15,7 trilyon dolardan fazla katkıda bulunabilir (www.pwc.com). Yapay zekâ, büyük miktarda veriyi işlemede üstünlük göstererek talep tahminini önemli ölçüde iyileştirir. Gerçek zamanlı veri sağlayan sensörler gibi teknolojik kaynaklar, tedarik zinciri yönetimini daha verimli hale getirmektedir. Yeni nesil teknolojiler, siparişler, stok seviyeleri, ulaşım ağları, iş gücü kullanımı ve depo faaliyetleri gibi kritik operasyonel verilerin toplanmasını ve tüm tedarik zinciri paydaşlarının erişimine sunulmasını sağlar. Böylece şirketlerin tedarik zinciri süreçlerini uçtan uca izlemelerine olanak tanıyarak karar verme süreçlerinde daha fazla çeviklik ve doğruluk sağlar. Yapay zekâ, verileri analiz ederek daha doğru tahminler ve bilinçli kararlar alınmasını mümkün kılar. Teknoloji, tedarik zinciri yönetiminde çevikliği artırır. Bilgiye ve simülasyonlara daha iyi erişim sayesinde yöneticiler daha iyi içgörüler elde ederek sorunları çok daha hızlı çözmelerine veya yeni iş fırsatları yaratmalarına olanak tanır. Tedarik zinciri yönetiminde teknoloji kullanımı, kuruluşlara hassas, güncel verilere anında erişim imkânı sunarak yöneticilerin ve karar vericilerin güncel bilgilere dayanarak bilinçli kararlar almalarını ve potansiyel sorunları erken tespit etmelerini sağlar.

2.2. Tedarik Zincirinde Uygulama Alanları

Tedarik zinciri yönetiminde teknoloji kullanımı hızla dönüşüm geçirmektedir. Eskiden yalnızca evrak işleri ve hesap tablolarıyla sınırlı olan bu süreç, artık IoT teknolojilerini kapsamaktadır. Lojistik ve tedarik zincirlerindeki dijital dönüşümü daha iyi anlamak için, işletmeler tarafından kullanılan tedarik zinciri teknolojilerinin yaygın uygulamalarını incelemek çok önemlidir. Günümüzde birçok işletme, gerçek zamanlı veri toplama, otomasyon, yapay zekâ tabanlı tahmin sistemleri, IoT (Nesnelerin İnterneti) çözümleri ve bulut

tabanlı bütünleşmiş platformlar gibi teknolojileri tedarik zinciri süreçlerine entegre ediyor. Bu teknolojiler, sipariş takibi, envanter yönetimi, tedarikçi performansı, ulaşım rotası optimizasyonu ve iş gücü planlaması gibi temel lojistik faaliyetlerinin daha verimli, şeffaf ve çevik bir şekilde yürütülmesini sağlıyor. Özellikle gelişmiş tedarik zincirlerine sahip şirketler, bu sistemleri kullanarak tüm operasyonlarını uçtan uca izleyebilir, hataları erken tespit edebilir, kaynak kullanımını iyileştirebilir ve müşteri memnuniyetini artırabilir. Dijital teknolojilerin yaygın olarak benimsenmesi, rekabet avantajı elde etme, maliyetleri düşürme ve karbon ayak izini azaltma gibi stratejik hedefler doğrultusunda lojistik yönetimini yeniden şekillendirmektedir. Lojistik sektöründe kullanılan en son teknolojik gelişmelerden bazıları Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Tedarik Zinciri Yönetimini Etkileyen En Yeni Teknolojiler

2.2.1 Blok zinciri teknolojisi: Blok zinciri verileri depolayan ve kaydeden, merkezi olmayan, dağıtılmış, değiştirilemez bir defter teknolojisidir. Blok zincirleri, akıllı sözleşmeler, mülk kayıtları, sağlık hizmetleri, bankacılık, finans ve daha birçok sektörde kullanılmaktadır (Kolehmainen vd., 2010). Bir blok zincirindeki her blok, belirli veriler, bir zaman damgası ve önceki bloğa bir referans içerir ve böylece güvenli, kronolojik bir zincir oluşturur. En etkili katkıları arasında gelişmiş izlenebilirlik, iyileştirilmiş takip ve akıllı sözleşmelerin uygulanması yer almaktadır. Blok zinciri altyapısının temel bir unsuru olan akıllı sözleşmeler, önceden tanımlanmış kurallar ve koşullar tarafından yönetilen, kendi kendini yürüten anlaşmaların oluşturulmasına olanak tanır. Tedarik zincirinde iş akışlarının yürütülmesini otomatikleştirerek, akıllı sözleşmeler operasyonel verimliliği, hızı ve güvenliği artırır. Merkezi olmayan ve güven

gerektirmeyen bir ortamda çalışarak, aracı veya merkezi otoritelerin gerekliliğini ortadan kaldırır, böylece maliyetleri düşürür ve şeffaflığı artırır (Andrian vd., 2018).

İzlenebilirlik açısından bakıldığında, blok zinciri teknolojisi, bir ürünün ham maddesinden ürüne dönüşümüne, satış için sözleşmeli şirketlere teslimine, ürün satıldıktan sonraki tüm garanti süresinin takibine ve yapılan onarımların kaydedilmesine, ürün el değiştirdiğinde yeni sahibinin sisteme girilmesine ve son olarak kullanılamaz hale geldikten sonra geri dönüşümüne kadar tüm adımları izlemek için tedarik zincirlerinde kullanılabilir. Bu şekilde, blok zinciri teknolojisi güvenilir ve doğrulanmış bir lojistik sistemi ve tedarik zinciri bilgi alışverişi ağı sağlar (Takaoglu vd., 2019).

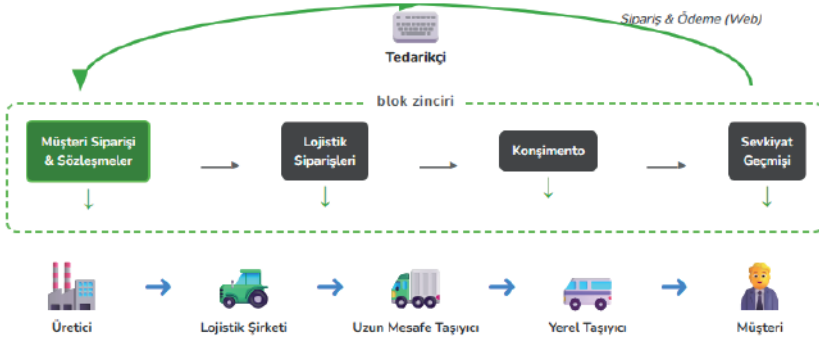
Bu ağ ayrıca, bitmiş ürünlerin tüm dağıtım aşamalarının izlenmesine de olanak tanır. Walmart, blok zinciri teknolojisini iki kez başarıyla test etti. Çin’de üretilen domuz eti ve Meksika’da yetiştirilen mangolar, üreticiden son tüketiciye kadar tüm yolculukları boyunca izleniyor. Bu izleme yeteneği, halk sağlığını tehdit eden geri çağırma durumlarında çok önemlidir (Sharma & Kumar, 2021).

Bir gıda ihlali durumunda, etkilenen ürün partilerini belirlemek kolaylaşacaktır. Yalnızca söz konusu ürünlerin imha edilmesi yeterli olacak; bu sayede tüm stokun yok edilmesi önlenerek, önemli maliyetlerden kaçınmayı sağlayacaktır. Böylece hem halk sağlığını korumak hem de bir şirketin marka imajına potansiyel zararı sınırlamak mümkün olacaktır.

Tüm ağ kullanıcıları, zincirde gerçekleşen tüm işlemleri eş zamanlı olarak görüntüleyebilir. Verilere erişim herkese açıktır. Dağıtılmış defterler aracılığıyla depolama, sistemdeki verilerin bozulmasını veya değiştirilmesini önler. Kayıtlar değiştirilemediği ve veriler birden fazla düğüm tarafından doğrulandığı için süreç kontrolü artar, bu da sisteme olan güveni artırır. Tüm geçmiş bilgiler geriye doğru izlenebildiği için tahmin kapasitesini artırabilir. Sistemdeki tüm bilgiler oybirliğiyle ve kontrollü bir şekilde kaydedildiği için veri doğruluğu ve kalitesi yüksektir. Sistemin kendisi yüksek düzeyde güvenlik sunduğu için, mevcut sistem içinde siber saldırılara karşı önlemler uygulama çabası azaltılabilir ve bu önlemlerin maliyetlerinden tasarruf sağlanabilir. İşlemler ve kontroller otomatikleştirildiği için insan hatası sayısı azalır. Dağıtık yapısı sayesinde veriler birden fazla düğümde saklanır ve bu bilgiler yalnızca ağ katılımcılarının mutabakat ve onayıyla değiştirilebilir.

Şekil 2’de görüldüğü gibi, blok zinciri uygulamaları, RFID, barkodlar, otomatik kimlik tarayıcıları ve benzeri yöntemler kullanılarak tüm tedarik zinciri yönetim sürecini her adımda eş zamanlı ve şeffaf bir şekilde izlemek

için kullanılabilir (Bakan ve Şekkeli, 2019). Gıda tedarik zincirine entegre edilecek olan blok zinciri teknolojisi, tüketicilerin güvenilir, şeffaf, izlenebilir ve yüksek kaliteli ürünler tüketmesini sağlayarak müşteri endişelerini ortadan kaldıracak bir sistemdir (Yıldızbaşı ve Üstünyer, 2019).



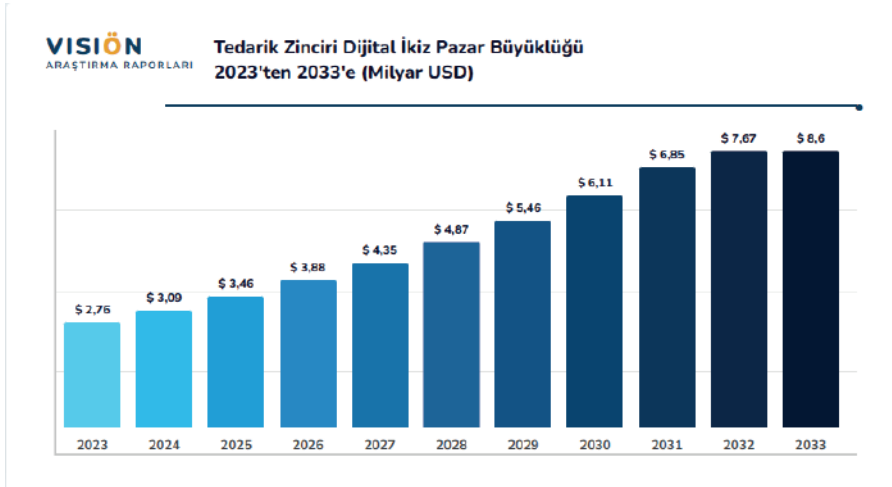
Şekil 2. Blok Zinciri İş Akışı

2.2.2 Dijital ikiz teknolojisi: Dijital ikiz, gerçek dünyadaki bir tedarik zincirini yansıtan, dinamiklerine dair içgörüler sağlayan ve sonuçları tahmin eden sanal bir simülasyondur. Gerçek dünyadaki bir sistemin, sürecin veya nesnenin sanal bir kopyasının veya ayna görüntüsünün oluşturulmasını sağlayarak inovasyon, verimlilik artışı ve karar verme fırsatları sunar (Menon vd., 2023). Bu nedenle, dijital ikizler ürün tasarımlarının, envanter yönetiminin, malzeme kullanımının, taşımacılığın ve teslim sürelerinin kolayca ve doğru bir şekilde ayarlanmasını ve optimize edilmesini sağlar (Lam vd., 2023). Operasyonlarda, lojistikte ve tedarik zinciri yönetiminde dijital ikiz uygulamaları, özellikle operasyonel izlenebilirlik, taşıma bakımı, uzaktan yardım, varlık görselleştirme ve tasarım özelleştirmesi için önemlidir. Moshood vd. (2021), tedarik zinciri görünürlüğünün çok önemli olduğunu ve küresel bir tedarik zinciri ağında tam görünürlüğü sağlamak ve sürdürmek için yeni geliştirilen dijital teknolojilerin kullanılması gerektiğini belirtmiştir (Moshood vd., 2021).

Abideen ve Mohamad (2021), üretim ve tedarik zinciri sistemlerindeki çeşitli operasyonları değerlendirmek ve bunların organizasyonel performans ve büyüme üzerindeki etkilerini incelemek için dijital ikiz (DT) yaklaşımını kullanmıştır. Dijital ikizler, kalıpları tespit ederek ve süreç değişikliklerinin etkilerini simüle ederek verimliliği artırır. Örneğin, DT modelleri, değişiklikler uygulanmadan önce sonuçları tahmin edebilir, potansiyel faydaları değerlendirebilir ve yatırım getirisini tahmin edebilir. Organizasyonlar, üretim

seviyeleri, envanter stratejileri ve teslimat yöntemleriyle ilgili farklı senaryoları simüle ederek küresel operasyonları yeniden tasarlamak için dijital ikizleri kullanabilir. Tedarik zinciri süreçlerine uçtan uca, veri odaklı bir bakış açısı sunarak, dijital ikizler minimum insan müdahalesiyle darboğazları belirlemeye ve çözmeye yardımcı olur. Örneğin, bir sevkiyatın dijital ikizi, taşıma ve teslimat sırasında performansı izlemek ve sorunları tespit etmek için sensör verilerini kullanır. Bu yaklaşım, daha hızlı sorun çözümü ve daha duyarlı tedarik zinciri yönetimi sağlar. Ayrıca, dijital ikizler, talep ve arz değişimlerinin fiziksel altyapıyı nasıl etkilediğini analiz ederek lojistik ve tesis yönetimini optimize eder. Gerçek zamanlı verilerden yararlanarak, taşıma planlamasını ve kaynak tahsisini iyileştirir ve sonuç olarak operasyonel verimliliği artırır.

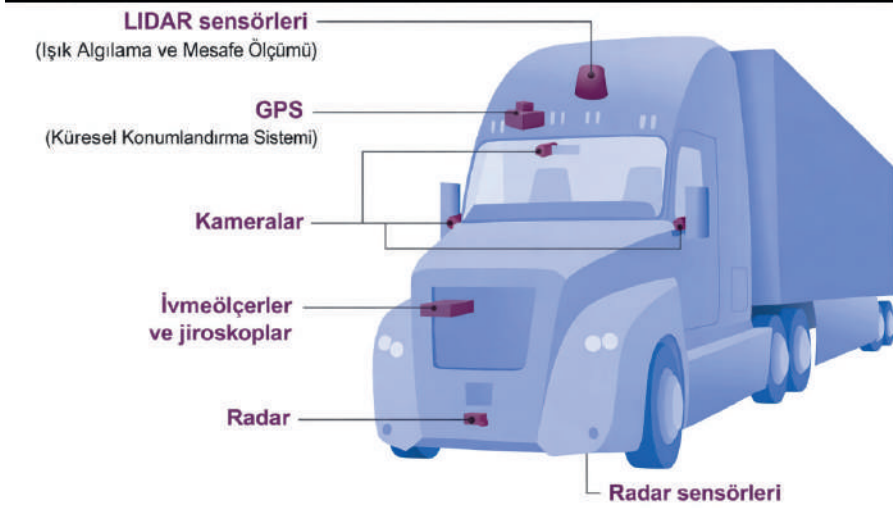
Tedarik zinciri dijital ikiz pazarının üstel büyümesi, genişlemesini yönlendiren birkaç önemli faktöre bağlanabilir. Birincisi, IoT cihazları ve yapay zekâ gibi gelişmiş teknolojilerin artan entegrasyonu, tedarik zinciri operasyonlarının doğruluğunu ve verimliliğini artıran gelişmiş dijital ikiz modellerinin geliştirilmesini hızlandırmıştır. İkincisi, tahmine dayalı analitik ve gerçek zamanlı veri içgörülerine yönelik artan talep, işletmeleri dijital ikizleri benimsemeye teşvik ederek, pazar trendlerini tahmin etmelerini, envanter yönetimini optimize etmelerini ve üretim süreçlerini kolaylaştırmalarını sağlamıştır. Şekil 3, küresel tedarik zinciri dijital ikiz pazar büyüklüğünün 2033 yılına kadar yaklaşık 8,6 milyar ABD dolarına ulaşmasının ve 2024 ile 2033 yılları arasında %12,03'lük bir yıllık bileşik büyüme oranıyla (CAGR) büyümesinin beklendiğini göstermektedir (visionresearchreports.com).



Şekil 3. Tedarik Zinciri Dijital İkiz Pazarının Büyüklüğü 2023-2033

Dijital ikiz (DT) uygulamaları trafik sıklığının azalmasıyla artan verimlilik, kontrollü alanlar için uyarılar, sıcaklık izleme, tam trafik görünürlüğü ve gerçek zamanlı operasyonel verilerin projeksiyonu tedarik zincirlerinin dijitalleşmesini hızlandırmış ve fiziksel sistemler ile dijital ağların entegrasyonunu sağlamıştır. Nesnelerin İnterneti (IoT), siber-fiziksel sistemler ve yapay zekâ destekli otomasyon çözümleri, envanter ve üretim süreçlerinin gerçek zamanlı yönetimini mümkün kılmaktadır (Tjahjono vd., 2017). Bu dönüşüm, işletmelerin karar alma süreçlerinde veri tabanlı stratejiler geliştirmelerine ve talep tahminlerinin doğruluğunu artırmalarına olanak tanır. Potansiyel faydalarına rağmen, işletmeler arasında Tedarik Zinciri Dijital İkizlerinin yetenekleri ve avantajları konusunda farkındalık eksikliği bulunmaktadır. Bu teknolojinin pratik uygulamaları ve uzun vadeli faydaları hakkında eğitim, şüpheciliğin üstesinden gelmek ve benimsenmesini teşvik etmek için hayati önem taşımaktadır.

2.2.3 Tamamen otonom taşıma araçları: Otonom taşıma araçları dağıtım sürecinde sıklıkla darboğaz oluşturan son kilometre teslimatının uzun süredir devam eden zorluğuna dönüştürücü bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır (zhenhub.com). Ürünler son tüketiciye ulaşsa bile, gecikmeler sık sık yaşanmaktadır. Otonom araçlar (AV'ler), güvenliği, operasyonel verimliliği ve çevresel sürdürülebilirliği artırarak lojistik ve taşımacılık yönetimini yeniden şekillendirir. Otonom kamyonlardan ve dronlardan kendi kendine yönelen gemilere kadar uzanan bu teknolojiler, malların nasıl taşındığını yeniden tanımlayarak daha akıcı ve uygun maliyetli bir gelecek sunar. AV'ler, sensörler, kameralar, radar ve yapay zekâ gibi gelişmiş teknolojilerle donatılmış olup, çevrelerini yorumlamalarına, gerçek zamanlı kararlar almalarına ve karmaşık ortamlarda yüksek hassasiyetle gezinmelerine olanak tanır. Rotaları optimize etme, çarpışmaları önleme ve günün her saati kesintisiz çalışma yetenekleri (Şekil 4'te gösterildiği gibi), teslimat verimliliğinin artmasına ve maliyetlerin düşürülmesine önemli ölçüde katkıda bulunur.



Kaynak: GAO (Government Accountability Office) teknoloji geliştiricileri ile yapılan görüşmelerin analizine dayanmaktadır | GAO-19-161

Şekil 4. Ticari Kamyonlar için Otomatik Araç Teknolojilerine Örnekler. Amerika Birleşik Devletleri Hükümet Hesap Verebilirlik Ofisi

Otonom araçların faydaları şunlardır:

1. Artan Güvenlik: Otonom araçlar, trafik kazalarının önemli bir bölümünden sorumlu olan insan hatasını ortadan kaldırarak yollardaki kazaları ve ölümleri azaltabilir.

2. Azalan Maliyetler: Otonom araçlar 7/24 kesintisiz çalışabilir, bu da birden fazla sürücüye olan ihtiyacı azaltır ve verimliliği artırır.

3. Geliştirilmiş Verimlilik: Otonom araçlar, trafik sıkışıklığını önlemek ve teslimat sürelerini kısaltmak için rotaları optimize edebilir. Son kilometre teslimatlarında, kamyonların yoğun kentsel alanlarda dolaşma ihtiyacını azaltabilirler.

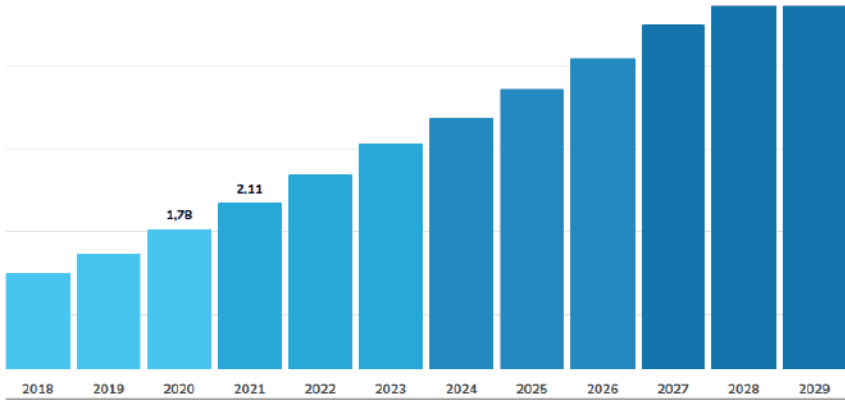
4. Geliştirilmiş Sürdürülebilirlik: Otonom araçlar, yakıt tüketimini ve emisyonları (sektörün karbon ayak izi olarak bilinir) azaltmak için rotaları optimize edebilir.

Sonuç olarak, lojistik ve taşımacılık yönetiminde otonom araçların geleceği umut vericidir ve güvenlik, verimlilik ve sürdürülebilirlik açısından önemli faydalar sunmaktadır. Üstesinden gelinmesi gereken zorluklar olsa da dönüşüm potansiyeli çok yüksektir.

2.2.4 Robotik, modern depolar; Otomatik depo araçları, otomatik istifleyiciler, forkliftler, palet istifleyiciler ve küçük yük taşıma robotları, depolarda kullanılan otonom araçlara örnek teşkil eder. Bu araçlar, makine öğrenimi ve derin öğrenme kullanarak seçilen yolları takip etmeyi ve ilgili depolama faaliyetlerini gerçekleştirmeyi öğrenirler.

Lojistik tesisleri ve depolar, güvenlik ve haritalama zorluklarını basitleştiren otonom araçlardan büyük ölçüde faydalanır. Bununla birlikte, bu tam olarak forkliftlerin, çekicilerin, toplayıcıların ve diğer lojistik araçlarının işi olduğundan, mekanik işlemler için daha gelişmiş kontrol yetenekleri gereklidir. Bu otonom araçların, uygun kontrol seviyesine ulaşmak için uzaktan operatörlere güvenmeleri gerekecektir. Bu kullanım durumu, çalışanlar için tehlikeleri azaltır. Eklenen güvenlik, fiziksel engelli kişiler için benzersiz istihdam fırsatları da yaratır.

Asya Pasifik Lojistik Robotları Pazar Büyüklüğü, 2018-2029 (Milyar USD)

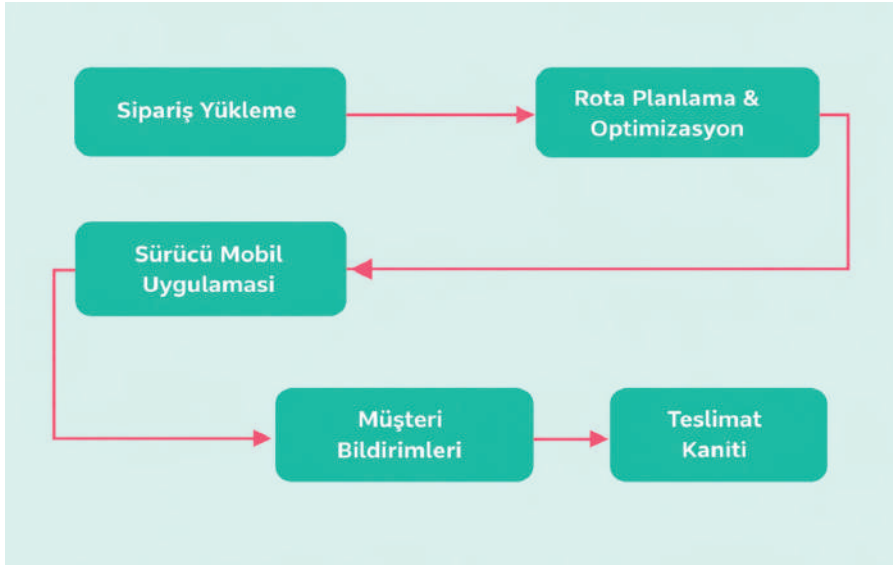


Şekil 5. Asya Pasifik lojistik robotları pazar büyüklüğü.

Şekil 5'te gösterildiği gibi, küresel lojistik robot pazarı 2021 yılında 6,17 milyar ABD doları değerindeydi ve tahmin dönemi boyunca %16,7'lik bileşik yıllık büyüme oranı (CAGR) ile 2029 yılına kadar 21,01 milyar ABD dolarına ulaşması bekleniyor. Sadece 2022 yılında pazar 7,11 milyar ABD dolarına ulaştı. Asya-Pasifik bölgesi, 2021 yılında %34,19'luk payla küresel pazara liderlik etti ve değerler 2020'deki 1,78 milyar ABD dolarından 2021'de 2,11 milyar ABD dolarına yükseldi. Bu arada, özellikle e-ticaret sektörünün hızlı genişlemesiyle önemli bir büyüme göstermesi beklenmektedir (www.fortunebusinessinsights.com).

2.2.5 Akıllı yük ve rota planlama algoritmaları; Teslimatlar için en verimli, maliyet etkin ve güvenli rotaları belirler. Bu özellik, teslimat sürelerini hızlandırmakla kalmaz, aynı zamanda lojistik ve tedarik zinciri operasyonlarının genel verimliliğini de artırır. Boş kilometreler, kamyonların yük taşımadan kat ettiği mesafeyi ifade eder ve bu da işletme maliyetlerini, yakıt israfını artırır, filo verimliliğini düşürür ve çevreye zarar verir. Boş kilometrelerin azaltılması, kaynak kullanımını iyileştirir ve operasyonları maliyet etkin hale getirir. Dağıtım operasyonlarında, teslimat hacimleri, filo boyutu ve operasyonel verimlilik arasında denge kurmak özellikle zordur.

Algoritmalar, teslimat lojistiğini optimize etmek ve müşteri iletişimini iyileştirmek için güvenilir, mobil öncelikli bir rota planlayıcısı isteyen işletmeler veya araç sahipleri için mükemmeldir. Şekil 6, teslimat optimizasyon iş akışını göstermektedir.



Şekil 6. Teslimat Optimizasyon İş Akışı

Yük planlaması veya optimizasyonu, araç kapasitesi, kargo hacmi, boyutlar, teslimat rotaları ve diğer faktörleri analiz ederek aşağıdaki faydaları elde etmek için otomasyonu kullanan çok adımlı bir yaklaşımdır. Şekil 7, fayda süreçlerini göstermektedir:



Şekil 7. Akıllı yük ve rota planlama algoritmaları süreçleri.

Daha Düşük Yakıt Maliyetleri- Yakıt fiyatları, kamyon bakımı, sürücü ücretleri, geçiş ücretleri ve kamyon ömrü gibi faktörleri hesaba katarak karlılığı etkileyen önemli bir maliyet faktörüdür. Verimli rota belirleme, yakıt tasarruflu sürüş ve yeterli bakım gibi önlemlerin uygulanması, mil başına maliyeti düşürür ve her yolculuğun kâr marjını artırır.

Hızlı Teslimat- Zamanında teslimat, özellikle zamana duyarlı gönderiler için müşteri memnuniyeti ve sadakati açısından hayati önem taşır. Planlanmamış gecikmeler, taşıyıcı için cezalara ve daha yüksek stok tutma maliyetlerine yol açar ve taşıyıcının itibarını zedeleyerek genel karlılığı olumsuz etkileyebilir.

Müşteri Memnuniyeti- Teslimat zamanlaması, müşteri memnuniyetinin en kritik belirleyicisidir. Sipariş edilen ürünlerin eksiksiz ve vaat edilen zaman dilimi içinde teslim edilmesi, müşteri güvenini artırır. Müşterilere siparişin serbest bırakılması, paketlenmesi, sevkiyatı ve teslimat tarihi hakkında sürekli bilgi sağlamak memnuniyeti artırır. Bu durum, müşteri sadakati ve tekrar satın almalar açısından avantajlar yaratır. Tedarik zincirinin CRM ile entegre edilmesi, müşteri şikayetlerinin ilgili mercilere yönlendirilmesini sağlar. Son kilometre teslimatı (müşterinin kapısına ulaşma süreci) en maliyetli ve sorunlara en yatkın olanıdır.

Bu aşamayı optimize etmek için:

- Yerel depolar ve mikro dağıtım merkezleri

- Coğrafi rota planlaması
- Gerçek zamanlı teslimat haritaları kullanılmalıdır.

Yönetim Maliyetleri- ERP, MRP, WMS ve TMS gibi bütünleşmiş bilgi sistemleri, veri girişi, raporlama, sipariş işleme ve fatura takibini otomatikleştirir. Bu, personel gereksinimlerini ve yönetim maliyetlerini azaltır. Tedarikçiler, üretim, lojistik ve müşteriler arasındaki koordinasyon tek bir platform üzerinden sağlanabilir. Gerçek zamanlı gösterge panelleri, e-posta, telefon ve manuel formlar gibi eski yöntemlerin yerini alarak zaman ve iş gücü maliyetlerini azaltır.

2.2.6 Giyilebilir Teknolojiler: Ürün depolama ve dağıtımı sırasında paketlerin tanımlanması, işlenmesi ve elleçlenmesinde doğruluk ihtiyacı son derece önemlidir ve giyilebilir teknolojiler bir çözümdür. Zaman kaybını ortadan kaldırarak çalışan verimliliğini artırır ve hızlı tempolu bir çalışma ortamında stresi azaltır. Bilgisayar/giyilebilir cihaz her zaman kişinin üzerinde olduğundan, çalışanlar barkodları tarayabilir, veri girebilir, bilgi arayabilir, parçaları bulabilir, anlık uyarılar alabilir, yeni bilgilere ulaşabilir ve ellerini serbest bırakarak daha verimli çalışabilirler. Giyilebilir teknolojiler yalnızca insan kaynaklı hataları en aza indirmekle kalmaz, aynı zamanda ürünle ilgili hataları tespit ederek kaliteyi de artırır (Aktaş, 2022).

Akıllı gözlükler ve akıllı saatler, kurumsal ortamlarda en yaygın olarak kullanılan giyilebilir teknolojiler arasındadır. Diğer örnekler arasında giyilebilir tarayıcılar, ses toplayıcılar, akıllı kasklar, kafa bantları, akıllı güvenlik yelekleri ve vücut kameraları yer almaktadır. Depo operasyonlarında, envanter yönetim süreçlerini geliştirmek için giyilebilir teknolojiler giderek daha fazla kullanılmaktadır. Genellikle bileğe, bele veya parmağa takılan bu eller serbest cihazlar, Bluetooth aracılığıyla bağlanır ve dokuz metreye kadar mesafeden kritik verileri iletebilir.

Giyilebilir tarayıcılar, daha düşük toplam sahip olma maliyeti ve azaltılmış cihaz arıza süresi gibi avantajlar sunar. Hafif ve dayanıklı tasarımları, çalışanların toplama ve sıralama gibi görevler için her iki elini de serbest bırakmalarını sağlayarak sayım hatalarını en aza indirir, operasyonel verimliliği artırır ve hem işçilik hem de ekipman maliyetlerini düşürür. Ayrıca, bu cihazlar gerçek zamanlı duruş izleme ve hareket geri bildirimi sağlayarak iş yeri güvenliğini artırır ve çalışanları olaylar meydana gelmeden önce potansiyel olarak güvenli olmayan eylemler konusunda uyararak yaralanmaları önlemeye yardımcı olur.

Lojistik uygulamalarına bir örnek olarak, DHL'nin Hollanda'da piyasaya sürdüğü akıllı gözlükler, iki vardiyada aynı anda dört çalışan tarafından kullanılıyor. Lensler, toplanacak ürün, depodaki konumu ve toplama sepetindeki doğru konumu hakkında bilgi gösterir. Elleçlenen ürünler, eller serbest erişim

sağlayan halka şeklinde bir tarayıcı ile kaydedilir. Ayrıca, sesle etkinleştirme ve depo içindeki optimum rotaların önerilmesi gibi diğer özellikler, operasyonel verimliliği artırır, toplama doğruluğunu iyileştirir ve hataları ve tarama süresini azaltır (www.dhl.com). Depo operatörleri, özellikle sipariş toplama olmak üzere, günlük depo operasyonlarının verimliliğini ve üretkenliğini artırmak için çözümler aramaktadır. Depolar da dahil olmak üzere birçok üretim ve lojistik sistemi hala manuel iş gücüne dayanmaktadır ve sonuç olarak, insan mevcudiyeti ve üretkenliği performans ve maliyetler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Sesle yönlendirilen toplamanın en önemli avantajlarından biri, toplama hatalarının azaltılmasıdır. Toplayıcılar gözlerini eyleme odaklayabilir ve elleri serbest kalır, bu da verimliliği artırır. Toplayıcılar tek bir ürüne odaklanabilir. Sesle yönlendirilen toplama teknolojisini kullanmak, depo operatörlerine daha fazla toplama odağı, daha fazla hassasiyet ve daha kolay takip avantajı sunar. Bu teknolojiyi kullanmak sadece iadeleri azaltmakla kalmaz, aynı zamanda genel lojistik maliyetlerini de düşürür.

Giyilebilir cihazların lojistik sektöründe uygulanmasının sağladığı artan güvenlik, artan üretkenlik ve artan çalışan güveni gibi önemli faydalar, giyilebilir cihazların yaygınlaşmasına yardımcı olmaktadır.

2.3 Teknoloji ve Sürdürülebilirlik

Bilgi teknolojileri ve dijital sistemler, karbon ayak izini azaltmada, enerji tasarrufunda ve kaynak kullanımını optimize etmede doğrudan rol oynamaktadır.

Dijital teknolojiler sadece ekonomik performansı değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliği de desteklemektedir. Gerçek zamanlı izleme sistemleri, karbon ayak izini ölçmemize, enerji tüketimini optimize etmemize ve atıkları azaltmamıza olanak tanır. Blok zinciri tabanlı sistemler, tedarik zincirinin tüm halkalarında şeffaflık sağlayarak etik üretim ve yeşil lojistik uygulamalarını güçlendirir (Saber vd., 2019). Teknolojik uygulamaların sürdürülebilirliğe katkıları Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Teknoloji-Sürdürülebilirlik İlişkisi

Teknoloji	Sürdürülebilirlik Katkısı
ERP – MRP Sistemleri	Kaynak verimliliği, üretim planlamasında atık azaltımı
IoT ve Sensör Teknolojileri	Enerji ve kaynak tasarrufu, çevre dostu operasyonlar
Blok Zinciri (Blockchain)	Şeffaf ve etik tedarik zinciri
Yapay Zekâ ve Tahminleme	Talep planlaması, stok optimizasyonu
Gelişmiş Lojistik Yazılımları	Karbon emisyonu azaltımı, daha az yakıt kullanımı
Dijital İzlenebilirlik Çözümleri	Geri dönüşüm ve yeniden kullanım oranlarının artırılması

Dijitalleşme, tedarik zinciri süreçlerine ilişkin sürdürülebilirlik verilerinin kamuoyuyla paylaşılmasını da kolaylaştırmaktadır. Şirketler, bu verileri sürdürülebilirlik raporlarında şeffaf bir şekilde paylaşarak yatırımcı güvenini artırarak, marka itibarını güçlendirir. Bu durum, markaya olan tüketici sadakatini artırır ve işletmelerin küresel pazarlarda daha güçlü bir konum elde etmesine katkıda bulunmaktadır. Bu da gelişmiş dijital teknolojilerin yeşil tedarik zinciri yönetiminde katalizör bir rol oynadığını gösteriyor (Zhao vd., 2021).

3. Bulgular ve Tartışma

Yapılan araştırma, dijital teknolojilerin tedarik zincirlerinde çok boyutlu faydalar sunduğunu göstermektedir:

- **Artan Verimlilik:** Yapay zekâ destekli planlama sistemleriyle üretim döngüsü sürelerinde önemli bir azalma gözlemlenmiştir (Taifa & Vhora, 2019).
- **Maliyet Azaltma:** IoT tabanlı izleme sistemleri sayesinde stok fazlalıkları ortalama %20-30 oranında azaltılmaktadır (Ugbebor vd., 2024).
- **Şeffaflık:** Blok zinciri sistemleri, özellikle gıda ve ilaç sektörlerinde izlenebilirlik standartlarını güçlendirmektedir (Gerdan vd., 2020).
- **Sürdürülebilirlik:** Dijital enerji yönetim sistemleri karbon emisyonlarını %10-25 oranında azaltabilir (Sapci & Considine, 2014).

Bununla birlikte, teknolojik dönüşümün önünde bazı engeller de bulunmaktadır. Yüksek kurulum maliyetleri, veri güvenliği endişeleri ve nitelikli işgücü eksikliği, dijitalleşmenin yaygın olarak benimsenmesini sınırlamaktadır.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma tedarik zinciri yönetiminde dijitalleşmenin özellikle yapay zekâ (YZ) ve Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojilerinin dönüştürücü potansiyelini araştırmıştır. Bulgular, tahmine dayalı analiz, otomatik planlama sistemleri ve gerçek zamanlı izleme gibi YZ odaklı araçların, üretim döngüsü sürelerini kısaltmaya, stok fazlalığını en aza indirmeye ve müşteri memnuniyetini artırmaya önemli ölçüde katkıda bulunduğunu ortaya koymaktadır. Bu teknolojiler yalnızca operasyonel verimliliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda daha geniş çevresel ve sosyal sürdürülebilirlik hedeflerini de destekler.

McKinsey & Company ve PricewaterhouseCoopers (PwC) gibi büyük danışmanlık firmaları, YZ'nin iş operasyonlarına entegrasyonunun 2030 yılına kadar trilyonlarca dolar ekonomik değer yaratabileceğini öngörmektedir. Bu bağlamda akıllı, veri odaklı tedarik zincirlerine geçiş sadece rekabet avantajı değil, stratejik bir zorunluluktur.

Dijital Teknolojilerin Stratejik Entegrasyonu: Firmalar, dijital dönüşümü yalnızca teknolojik bir yükseltme olarak değil, kurumsal vizyonu ortaya çıkan dijital yetkinliklerle uyumlu hale getiren stratejik bir değişim olarak benimsemelidir.

Yapay Zekâ Tabanlı Karar Destek Sistemleri: Talep tahmini, envanter optimizasyonu ve lojistik planlama gibi alanlarda yapay zekanın benimsenmesi, tedarik zinciri genelinde daha hızlı, daha doğru ve daha uygun maliyetli kararlar alınmasını kolaylaştırabilir.

Veri Entegrasyonu ve İş Birliği Platformları: Bulut tabanlı platformlar aracılığıyla paydaşlar arasında sorunsuz entegrasyon, şeffaflığı artıracak, karar alma süreçlerini hızlandıracak ve tedarik zinciri genelinde koordinasyonu iyileştirecektir.

İş Gücü Becerilerinin Geliştirilmesi ve Dijital Okuryazarlık: Dijital dönüşümün başarısı sadece teknolojiye değil, insanlara da bağlıdır. Veri analitiği, dijital araçlar ve yazılım uygulamaları konusunda sürekli eğitim, iş gücünün uyum sağlaması için çok önemlidir.

Sürdürülebilirlik Odaklı Dijital Politikalar: Kuruluşlar, dijital dönüşüm girişimlerini sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu hale getirmeli ve çevresel etki, enerji verimliliği ve atık yönetiminin teknolojik yükseltmelerin merkezinde yer almasını sağlamalıdır.

KOBİ'ler için Destek Mekanizmaları: Daha büyük şirketlerin kaynaklarından yoksun olabilecek küçük ve orta ölçekli işletmeler (KOBİ'ler), devlet teşvikleri, uygun fiyatlı finansman ve dijital dönüşüm rehberlik programları aracılığıyla desteklenmelidir.

Kaynaklar

- Abideen, A., ve Mohamad, F. B. (2021). Improving the performance of a Malaysian pharmaceutical warehouse supply chain by integrating value stream mapping and discrete event simulation. *Journal of Modelling in Management*, 16(1), 70–102.
- Aktaş, İ. (2022). Giyilebilir Teknolojilerin Lojistik Faaliyetlerde Kullanımının ve Etkilerinin Değerlendirilmesi. *Beykoz Akademi Dergisi*, 10(2), 258-273. <https://doi.org/10.14514/beykozad.1177256>
- Andrian, HR. Kurniawan, NB., and Suhardi, S. (2018). “Blockchain technology and implementation: a systematic literature review,” in 2018 international conference on information technology systems and innovation (ICITSI). IEEE, 2018, pp. 370–374.
- Bakan, İ., & Şekkelî, Z. H. (2019). Blok zincir teknolojisi ve tedarik zinciri yönetimindeki uygulamaları. *OPUS International Journal of Society Researches*, 11(18), 2847-2877.
- Mohan Banur, O., Patle, B. K., & Pawar, S. (2024). Integration of robotics and automation in supply chain: a comprehensive review. *Robotic Systems and Applications*, 4(1), 1-19.1
- Gerdan, D., Koç, C., & Vatandaş, M. (2020). Use of Blockchain Technology in Traceability of Food Products. *Journal of Agricultural Machinery Science*, 16(2), 8-14.
- Ivanov, D. (2023). *Digital supply chain twin: A framework for resilience*. *International Journal of Production Research*, 61(3), 707–723.
- Kache, F., & Seuring, S. (2017). *Challenges and opportunities of digital information at the intersection of big data analytics and supply chain management*. *International Journal of Operations & Production Management*, 37(1), 10–36.
- Kolehmainen, T., Laatikainen, G., Kultanen, J., Kazan, E., & Abrahamsson, P. (2020, November). Using blockchain in digitalizing enterprise legacy systems: An experience report. In *International Conference on Software Business* (pp. 70-85). Cham: Springer International Publishing.
- Menon, D., Anand, B., & Chowdhary, C. L. (2023). Digital twin: Exploring the intersection of virtual and physical worlds. *IEEE Access*, 11(June), 75152– 75172.
- Moshood, T. D., Nawanir, G., & Sorooshian, S. (2021). Digital twins driven supply chain visibility within logistics: A new paradigm for future logistics. *Applied System Innovation*, 4(29), 1–24.
- 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.

- Sapci, O., & Considine, T. (2014). *The link between environmental policy and energy efficiency: Empirical evidence*. Energy Policy, 73, 249–263.
- Sharma, M. & Kumar, P. (2021). Adoption of Blockchain Technology: A Case Study of Walmart. In R. Bansal, P. Malyadri, A. Singh, & A. Pervez (Eds.), *Blockchain Technology and Applications for Digital Marketing* (pp. 210-225). IGI Global Scientific Publishing. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-8081-3.ch013>
- Taifa, I., & Vhora, T. (2019). Cycle time reduction for productivity improvement in the manufacturing industry. *Journal of Industrial Engineering and Management Studies*, 6(2), 147-164.
- Takaoglu, M., Özer, Ç. ve Parlak, M. (2019). Blokzinciri Teknolojisi ve Türkiye'deki Muhtemel Uygulanma Alanları. *International Eastern Anatolia Science Engineering and Design Journal*. 1(2): 265-273.
- Ugbebor, E., Adeteye, M. & Ugbebor, J. (2024). Automated Inventory Management Systems with IoT Integration to Optimize Stock Levels and Reduce Carrying Costs for SMEs: A Comprehensive Review. November Journal of Artificial Intelligence General science (JAIGS) ISSN 3006-4023 6(1):306-340
- Yıldızbaşı, A. ve Üstünyer, P. (2019). Tarımsal Gıda Tedarik Zincirinde Blokzincir Tasarımı: Türkiye'de Hal Yasası Örneği. *Bartın Faculty of Forestry Journal*. 21(21): 460.
- Tjahjono, B., Esplugues, C., Ares, E., & Pelaez, G. (2017). *What does Industry 4.0 mean to supply chain?* Procedia Manufacturing, 13, 1175–1182.
- <https://zhenhub.com/blog/otonom-araclar/> ZhenHub. (nd). The Impact of Autonomous Vehicles in Logistics, (ET. 07 October)
- <https://www.visionresearchreports.com/supply-chain-digital-twin-market/40859> (ET. 05 October)
- <https://www.gao.gov/assets/gao-19-161.pdf> (ET 10 October)
- <https://www.fortunebusinessinsights.com/logistics-robots-market-102923> (ET 25 September)
- [https://www.dhl.com/global-en/delivered/innovation/dhl-successfully-tests-augmented-\(reality-application-in-warehouse\)](https://www.dhl.com/global-en/delivered/innovation/dhl-successfully-tests-augmented-(reality-application-in-warehouse)). (ET. 25 September).
- <https://www.pwc.com/gx/en/issues/analytics/assets/pwc-ai-analysis-sizing-the-prize-report.pdf> (ET. 01 October).

Sürdürülebilir Üretim Perspektifinden E-Lojistik: Dijital Entegrasyonun Çevresel ve Operasyonel Yansımaları

Mert Anıl Sarıcan¹

Özet

Dijital teknolojilerde yaşanan gelişmeler ile artan çevresel baskılar üretim ve tedarik zinciri sistemlerinin yönetiminde yeni yaklaşımların geliştirilmesini gerekli kalmaktadır. Üretim faaliyetlerinin sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda yeniden değerlendirilmesi, tedarik zinciri boyunca yürütülen lojistik süreçlerin daha etkin ve çevresel etkiler dikkate alınarak yönetilmesini gündeme getirmektedir. Bu bağlamda lojistik faaliyetlerin dijital altyapılar aracılığıyla planlanmasını ve yönetilmesini ifade eden e-lojistik uygulamaları üretim ve lojistik süreçleri arasında veri temelli bir koordinasyon oluşturabilmektedir. Literatürde e-lojistik araştırmalarının ağırlıklı olarak operasyonel performans ve tedarik zinciri etkinliği üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Buna karşılık e-lojistik yetenekleri ile sürdürülebilir üretim performansı arasındaki ilişkinin kuramsal açıdan bütüncül biçimde ele alındığı çalışmalar sınırlı kalmaktadır. Bu çalışma e-lojistik uygulamalarını sürdürülebilir üretim perspektifinden ele almakta ve dijital lojistik entegrasyonunun üretim sistemleri üzerindeki rolünü kuramsal olarak değerlendirmektedir. Yapılan değerlendirmeler e-lojistik uygulamalarının bilgi görünürlüğünü artırarak üretim planlamasını desteklediğini, kaynak kullanımının daha etkin yönetilmesine katkı sağladığını ve üretim sistemlerinin çevikliğini güçlendirebildiğini göstermektedir. Bu yönüyle çalışma e-lojistik ile sürdürülebilir üretim araştırmalarını ortak bir çerçevede ele alarak dijital lojistik entegrasyonunun sürdürülebilir üretim performansı üzerindeki rolüne ilişkin kavramsal bir katkı sunmaktadır.

1 Öğretim Görevlisi Doktor, İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Lojistik Bölümü, mertanil.sarican@yeniuyuzyl.edu.tr, ORCID: 0000-0002-3696-6574

1. Giriş

Küresel ölçekte artan enerji tüketimi, yükselen karbon emisyonları ve doğal kaynakların hızla azalması sürdürülebilir üretim sistemlerinin yeniden değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Sürdürülebilir üretim faaliyetleri fabrikalarda gerçekleşen operasyonlarla sınırlı olmayıp tedarik, dağıtım ve lojistik süreçlerini de içeren geniş bir değer zincirinin parçası olarak işlev görmektedir. Bu nedenle üretim sistemlerinin çevresel performansı, üretim süreçleri ve tedarik zinciri boyunca yürütülen lojistik faaliyetlerle yakından ilişkilidir. Özellikle taşıma, depolama ve dağıtım faaliyetleri enerji tüketimi ve emisyon üretimi bakımından tedarik zincirinin en yoğun süreçleri arasında yer almaktadır. Bu durum sürdürülebilir üretim hedeflerinin gerçekleştirilmesinde lojistik süreçlerin etkin ve çevresel etkileri dikkate alınarak yönetilmesini önemli bir gereklilik hâline getirmektedir.

Son yıllarda dijital teknolojilerde yaşanan gelişmeler üretim ve lojistik sistemlerinin yapısında önemli dönüşümler yaratmıştır. Endüstri 4.0 kapsamında gelişen bilgi ve iletişim teknolojileri, veri temelli karar mekanizmaları ve dijital platformlar tedarik zinciri süreçlerinde daha yüksek düzeyde entegrasyon ve görünürlük sağlamaktadır (Lasi vd., 2014: 239; Stock ve Seliger, 2016: 537; Ivanov vd., 2016: 387). Dijital dönüşümün lojistik yönetimindeki yansımalarından biri de e-lojistik kavramının ortaya çıkmasıdır. E-lojistik, lojistik faaliyetlerin bilgi teknolojileri ve dijital platformlar aracılığıyla planlanması ve yönetilmesini ifade etmektedir. Lojistik faaliyetlerde; Sipariş yönetimi, depo operasyonları, taşıma planlama ve envanter kontrolü gibi süreçlerin dijital sistemler üzerinden yürütülmesi operasyonel verimliliği artırabilmektedir (Marchet vd., 2009; Gunasekaran vd., 2017; Queiroz vd., 2022). Bunun yanında rota optimizasyonu, gerçek zamanlı veri yönetimi ve gelişmiş planlama araçları lojistik faaliyetlerin çevresel etkilerinin azaltılmasına da katkıda bulunabilmektedir (Evangelista, 2014: 63-65; Wichaisri ve Sopadang, 2018: 1-3).

Akademik literatür incelendiğinde e-lojistik araştırmalarının ağırlıklı olarak operasyonel verimlilik, hizmet kalitesi ve tedarik zinciri performansı üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir (Cho vd., 2008; Marchet vd., 2009; Nguyen, 2013; Gunasekaran vd., 2017). Sürdürülebilir üretim araştırmaları ise çevresel performans ve emisyon azaltımı konularını ön plana çıkarmaktadır (Srivastava, 2007; Wichaisri ve Sopadang, 2013; McKinnon, 2015; Grzybowska vd., 2019). Bununla birlikte e-lojistik yetenekleri ile sürdürülebilir üretim performansı arasındaki ilişkinin kuramsal bir çerçevede bütüncül biçimde ele alındığı çalışmalar oldukça sınırlı kalmaktadır.

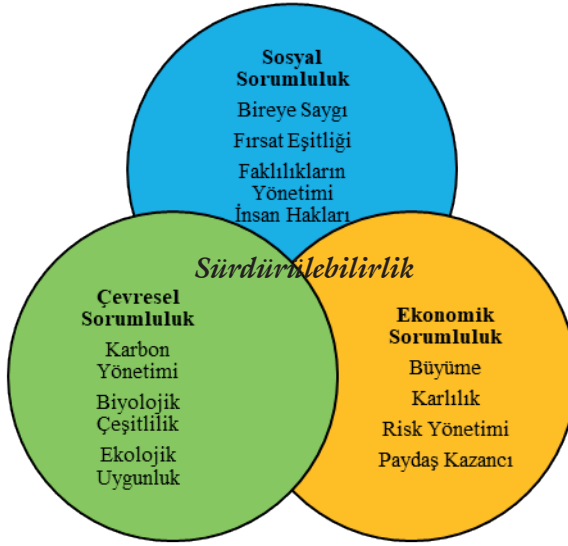
Bu çalışma, literatürde sınırlı biçimde ele alınan e-lojistik ile sürdürülebilir üretim performansı arasındaki ilişkiyi incelemektedir. Çalışma özellikle e-lojistik yeteneklerinin sürdürülebilir üretim performansını hangi teorik mekanizmalar aracılığıyla etkilediğini ve bu etkinin farklı bağlamsal koşullar altında nasıl değiştiğini açıklamayı amaçlamaktadır. Çalışmanın geri kalan kısmı şu şekilde düzenlenmiştir. İkinci bölümde sürdürülebilirlik, sürdürülebilir üretim, sürdürülebilir lojistik ve e-lojistik kavramlarına ilişkin kuramsal çerçeve ele alınmaktadır. Üçüncü bölümde e-lojistik uygulamalarının sürdürülebilir üretim üzerindeki etkileri operasyonel verimlilik, çevresel performans ve üretim çevikliği boyutları çerçevesinde incelenmektedir. Dördüncü bölümde elde edilen kuramsal değerlendirmeler tartışılmakta ve yönetsel çıkarımlar sunulmaktadır. Son bölümde ise genel değerlendirmeler yapılarak sonuçlar ve gelecekteki araştırmalara yönelik öneriler ele alınmaktadır.

2. Kavramsal Çerçeve

2.1. Sürdürülebilirlik ve Sürdürülebilir Üretim Kavramı

Sürdürülebilirlik kavramı, ekonomik kalkınmanın çevresel ve toplumsal boyutlar dikkate alınarak gerçekleştirilmesini ifade eden bir yaklaşım olarak tanımlanmaktadır. Kavram ilk kez Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu tarafından yayımlanan Brundtland Raporu'nda, gelecek kuşakların kendi ihtiyaçlarını karşılama olanaklarını tehlikeye atmadan mevcut kuşakların ihtiyaçlarının karşılanması olarak açıklanmıştır (WCED, 1987). Bu yaklaşım ekonomik büyüme ile çevresel koruma ve toplumsal refah arasındaki dengenin sağlanmasını amaçlayan bütüncül bir kalkınma anlayışına dayanmaktadır.

Sanayi faaliyetlerinin çevresel ve toplumsal etkilerine ilişkin farkındalığın artmasıyla birlikte sürdürülebilirlik kavramı işletme ve üretim sistemleri bağlamında da giderek daha fazla önem kazanmaya başlamıştır. Uzun yıllar boyunca işletme faaliyetleri ağırlıklı olarak maliyet minimizasyonu ve operasyonel verimlilik gibi ekonomik performans göstergeleri çerçevesinde değerlendirilmiştir. Ancak doğal kaynakların sınırlı yapısı, iklim değişikliğine ilişkin küresel kaygılar ve çevresel düzenlemelerin yaygınlaşması işletme faaliyetlerinin daha geniş bir perspektiften ele alınmasını gerekli hâle getirmiştir (Sarkis, 2001: 668-669; Seuring ve Müller, 2008: 1700-1702). Elkington (1997) tarafından geliştirilen Üçlü Kar Hanesi (Triple Bottom Line-TBL) yaklaşım işletme performansının finansal göstergeler, çevresel ve toplumsal etkiler dikkate alınarak değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Üçlü kar hanesi yaklaşımının temel boyutları Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Üçlü Kar Hanesi Yaklaşımı

Kaynak: Elkington, 1997

Şekil 1’de görüldüğü üzere üçlü kar hanesi yaklaşımı ekonomik, çevresel ve toplumsal boyutların birlikte ele alınmasını gerektiren bütüncül bir yönetim anlayışına dayanmaktadır. İşletmelerin sürdürülebilirlik performansının değerlendirilmesinde bu üç boyutun dengeli biçimde ele alınması önem taşımaktadır. Bu yaklaşım ekonomik çıktılarına odaklanan geleneksel işletme anlayışının ötesine geçerek işletme faaliyetlerinin çevresel ve toplumsal etkilerinin de değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Sürdürülebilirlik yaklaşımının üretim sistemlerine yansımaları sürdürülebilir üretim kavramı ile açıklanmaktadır. Sürdürülebilir üretim, üretim süreçlerinin ekonomik verimliliği korurken çevresel etkilerin azaltılmasını ve toplumsal sorumlulukların dikkate alınmasını amaçlayan bir üretim yaklaşımı olarak tanımlanmaktadır (Jayal vd., 2010: 144-145). Bu yaklaşım üretim faaliyetlerinin planlanması ve yürütülmesi sırasında enerji ve hammadde kullanımının azaltılması, atık oluşumunun sınırlandırılması ve çevresel etkilerin azaltılması gibi hedefleri ön plana çıkarmaktadır (Grzybowska vd., 2019: 1-3).

Sürdürülebilir üretim yaklaşımı üretim faaliyetlerinin çevresel etkilerinin azaltılmasının yanı sıra çalışan sağlığı ve güvenliği ve paydaşlara yönelik sorumlulukların üretim süreçlerine entegre edilmesini de içermektedir (Kleindorfer vd., 2005: 482-484). Bu nedenle sürdürülebilir üretim

sistemleri ekonomik performans, çevresel sorumluluk ve sosyal refah arasında dengeli bir ilişki kurmayı amaçlayan bütüncül bir üretim yaklaşımı olarak değerlendirilmektedir. Bu kapsamda Huang (2017) tarafından önerilen sürdürülebilir üretim performans göstergeleri Tablo 1’de sunulmaktadır.

Tablo 1. Sürdürülebilir Üretim Performans Göstergeleri

Alt Boyutlar	Kümeler	Alt Kümeler
Ekonomik	İlk Yatırım	İlk Yatırım Maliyetleri Yüzdesi
	Direkt/Endirekt Maliyetler	Direkt Maliyetler
		Endirekt Maliyetler
	Faydalar ve Kayıplar	Faydalar
		Kayıplar
Çevresel	Malzeme Kullanımı ve Verimliliği	Malzeme Kullanımı
		Materyal Kullanımı
	Enerji Kullanımı ve Verimliliği	Enerji kullanımı
		Enerji Verimliliği
	Diğer Kaynakların Kullanımı	Su İçeriği
		Su Verimliliği
	Atıklar ve Emisyonlar	Atıklar
		Emisyonlar
Toplumsal	Ürün Kalitesi ve Dayanıklılığı	Ürün Kalitesi
		Ürün Dayanıklılığı
	Fonksiyonellik	Ürün Fonksiyonelliği Yüzdesi
	Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi	Geri Kazanılan Ürün Yaşam Döngüsü Yüzdesi
	Ürün Güvenliği ve Sağlığı	Ürün Güvenliği
		Ürün Sağlığı
	Ürünün Toplumsal Etki Düzenlemeleri	Müşteri Zararları
		Müşteri Zararlarının Yüzdesi

Kaynak: Huang, 2017: 130-131

Tablo 1’de görüldüğü üzere üretim sistemlerinin sürdürülebilirliği üretim süreçleri ile sınırlı bir alan değildir. Hammadde temininden nihai ürünün müşteriye ulaştırılmasına kadar uzanan tedarik zinciri faaliyetleri üretim sistemlerinin toplam çevresel performansı üzerinde önemli etkiler yaratmaktadır. Bu nedenle sürdürülebilir üretim yaklaşımı giderek daha fazla

tedarik zinciri yönetimi ve lojistik faaliyetler ile birlikte ele alınmaktadır (Carter ve Rogers, 2008: 365-368; Seuring ve Müller, 2008: 1701-1703).

2.2. Sürdürülebilir Lojistik ve Tedarik Zinciri Yönetimi

Üretim ve tüketim faaliyetlerinin küresel ölçekte genişlemesi tedarik zinciri süreçlerinin çevresel sonuçlarının daha fazla tartışılmasına neden olmuştur. Lojistik faaliyetler enerji kullanımı ve emisyon üretimi nedeniyle sürdürülebilirlik tartışmalarının önemli bir parçası hâline gelmiştir. Taşımacılık, depolama ve dağıtım faaliyetleri lojistik süreçlerin çevresel etkilerinin en yoğun biçimde ortaya çıktığı alanlar arasında yer almaktadır. Fosil yakıt kullanımına dayalı taşımacılık sistemleri karbon emisyonlarının önemli kaynaklarından biri olarak değerlendirilmektedir. Depolama faaliyetlerinde kullanılan enerji miktarı, ambalaj kullanımı ve dağıtım süreçlerinde ortaya çıkan emisyonlar tedarik zinciri faaliyetlerinin çevresel yükünü artıran unsurlar arasında gösterilmektedir (McKinnon, 2015: 26-29). Bu gelişmeler sürdürülebilir lojistik yaklaşımının akademik literatürde daha fazla önem kazanmasına yol açmıştır. Sürdürülebilir lojistik yaklaşımı lojistik faaliyetlerin ekonomik performansın yanı sıra çevresel sorumluluk ve sosyal etkiler dikkate alınarak yönetilmesini ifade etmektedir (Evangelista, 2014: 63-64). Kaynak kullanımının optimize edilmesi, enerji tüketiminin azaltılması ve operasyonların çevresel etkilerinin sınırlandırılması sürdürülebilir lojistik uygulamalarının temel amaçları arasında yer almaktadır.

Sürdürülebilir lojistik uygulamaları çevresel etkilerin azaltılmasının yanında işletmelerin operasyonel performansının geliştirilmesine de katkı sağlayabilmektedir. Taşıma planlaması, rota optimizasyonu ve depo yönetimi gibi faaliyetlerin sistemli biçimde yürütülmesi maliyetlerin düşürülmesine ve operasyonların daha verimli yönetilmesine yardımcı olmaktadır (Derse, 2022: 19-21). Benzer biçimde planlama ve koordinasyonun iyileştirilmesi enerji kullanımı ile emisyonların azaltılması açısından da önemli fırsatlar sunmaktadır (Evangelista, 2014: 64-65; McKinnon, 2015: 34-38). Bu nedenle sürdürülebilir lojistik yaklaşımı üretim ve tedarik zinciri yönetimi literatüründe giderek daha fazla ilgi gören araştırma alanlarından biri hâline gelmiştir (Wichaisri ve Sopadang, 2018: 3-4).

2.3. Dijitalleşme ve Lojistik Sistemler

Bilgi ve iletişim teknolojilerindeki gelişmeler üretim ve tedarik zinciri sistemlerinin yapısında önemli değişimler yaratmıştır. Dijital dönüşüm olarak adlandırılan bu süreç işletmelerin operasyonel faaliyetlerini veri temelli yönetim anlayışı doğrultusunda yeniden düzenlemelerine imkân tanımaktadır. Endüstri 4.0 kapsamında ortaya çıkan nesnelerin interneti, büyük veri analitiği, bulut bilişim ve siber-fiziksel sistemler üretim ve tedarik zinciri süreçlerinde daha

yüksek düzeyde entegrasyon ile bilgi görünürlüğü sağlamaktadır (Lasi vd., 2014: 240-241; Stock ve Seliger, 2016: 536-538). Böyle bir teknolojik altyapı üretim ve lojistik faaliyetlerinin planlanması, izlenmesi ve koordinasyonunun daha etkin biçimde yürütülmesini mümkün kılmaktadır (Waller ve Fawcett, 2013: 78-80).

Veri temelli yönetim anlayışının tedarik zinciri süreçlerinde yaygınlaşması lojistik faaliyetlerin planlanma biçiminde de önemli değişimler yaratmıştır. Sensör teknolojileri, nesnelerin interneti ve büyük veri analitiği gibi uygulamalar operasyonların daha yakından izlenmesine olanak tanımaktadır. Tedarik zinciri boyunca gerçekleşen faaliyetlerin gerçek zamanlı olarak takip edilebilmesi operasyonel görünürlüğü artırmakta ve karar süreçlerinin daha hızlı gerçekleştirilmesini sağlamaktadır (Ivanov vd., 2016: 386-388).

Tedarik zinciri aktörleri arasında kurulan dijital veri ağları üreticiler, tedarikçiler ve lojistik hizmet sağlayıcılar arasındaki koordinasyonu güçlendirmektedir. Sipariş yönetimi, envanter kontrolü ve taşıma planlama gibi süreçlerin dijital sistemler aracılığıyla yürütülmesi faaliyetlerin daha entegre biçimde yönetilmesine olanak tanımaktadır. Böyle bir yapı lojistik planlamada daha esnek ve dinamik yaklaşımların uygulanmasını mümkün hâle getirmektedir (Wamba vd., 2017: 356-358).

Dijital teknolojiler lojistik süreçlerin çevresel etkilerinin azaltılması açısından da önemli fırsatlar sunmaktadır. Rota optimizasyonu uygulamaları taşıma faaliyetlerinin daha verimli planlanmasını sağlayarak yakıt tüketiminin azaltılmasına katkı sağlayabilmektedir. Depo yönetim sistemleri depo operasyonlarında enerji kullanımının daha etkin biçimde planlanmasına yardımcı olmaktadır. Kaynak kullanımının dikkatli yönetilmesi sürdürülebilir lojistik uygulamalarının geliştirilmesini desteklemektedir (Tekin, 2014: 66-69).

Bilgi teknolojilerinin lojistik süreçlerde yaygınlaşması tedarik zinciri faaliyetlerinin daha entegre ve görünür biçimde yönetilmesini mümkün hâle getirmiştir (Topal, 2013: 1-2). Dijital platformlar aracılığıyla yürütülen planlama ve izleme faaliyetleri operasyonel koordinasyonu güçlendirmekte ve tedarik zinciri aktörleri arasındaki bilgi akışını hızlandırmaktadır. Böyle bir dönüşüm lojistik faaliyetlerin dijital altyapılar aracılığıyla yürütülmesini ifade eden e-lojistik uygulamalarının ortaya çıkmasına zemin hazırlamıştır (Gunasekaran vd., 2017: 16-18). Bu nedenle dijitalleşme süreci e-lojistik kavramının gelişimini açıklayan temel unsurlardan biri olarak değerlendirilmektedir.

2.4. E-Lojistik Kavramı

Lojistik faaliyetlerin dijital altyapılar aracılığıyla yönetilmesi son yıllarda tedarik zinciri yönetiminde önemli bir dönüşüm yaratmıştır. E-lojistik kavramı

lojistik süreçlerin bilgi ve iletişim teknolojileri aracılığıyla planlanmasını ve koordine edilmesini ifade etmektedir. Dijital platformlar üzerinden gerçekleştirilen veri paylaşımı tedarik zinciri süreçlerinde daha yüksek düzeyde entegrasyon ve görünürlük sağlamaktadır (Marchet vd., 2009: 785-788).

Geleneksel lojistik faaliyetlerine ilişkin verilerin dijital sistemler aracılığıyla yönetilmesi, operasyonel süreçlerin daha etkin biçimde planlanmasını mümkün hâle getirmektedir. Sipariş yönetimi, envanter kontrolü, depo operasyonları ve taşıma planlama gibi faaliyetler dijital bilgi sistemleri aracılığıyla yürütülebilmektedir. Gerçek zamanlı veri izleme uygulamaları lojistik faaliyetlerin planlanmasında daha doğru kararların alınmasına olanak tanımakta ve operasyonel belirsizliklerin azaltılmasına katkı sağlamaktadır (Gunasekaran vd., 2017: 16-18). Geleneksel lojistik uygulamaları ile e-lojistik yaklaşımı arasındaki temel farklılıklar Tablo 2’de sunulmaktadır.

Tablo 2. Geleneksel Lojistik ile E-Lojistik Karşılaştırılması

Karşılaştırma Boyutu	Geleneksel Lojistik	E-Lojistik
Sipariş işleme	Manuel Süreçler	Elektronik sipariş sistemleri
Bilgi akışı	Sınırlı veri Paylaşımı	Gerçek zamanlı veri paylaşımı
Stok yönetimi	Periyodik kontrol	Dijital ve anlık stok takibi
Talep yönetimi	Tahmine dayalı planlama	Veri temelli talep tahmini
Süreç entegrasyonu	Düşük entegrasyon	Sistemler arası entegrasyon
Teslimat süresi	Daha uzun sürede teslimat	Daha kısa sürede teslimat
Görünürlük	Sınırlı	Yüksek

Kaynak: Bayles ve Bhatia, 2000: 3

Tablo 2 incelendiğinde geleneksel lojistik ile e-lojistik yaklaşımı arasındaki farkların özellikle bilgi akışı, süreç entegrasyonu ve operasyonel görünürlük alanlarında belirginleştiği görülmektedir. Geleneksel lojistik sistemlerinde bilgi paylaşımı çoğu zaman sınırlı ve manuel süreçlere dayanırken e-lojistik uygulamalarında dijital platformlar aracılığıyla gerçek zamanlı veri paylaşımı mümkün hâle gelmektedir. Gerçek zamanlı veri akışı lojistik faaliyetlerin planlanmasında daha hızlı ve daha doğru kararların alınmasını kolaylaştırmakta ve tedarik zinciri süreçlerinde koordinasyonun güçlenmesine katkı sağlamaktadır (Bayles ve Bhatia, 2000: 3).

Bilgi ve iletişim teknolojilerindeki gelişmeler lojistik faaliyetlerin dijital platformlar üzerinden yürütülmesini mümkün kılarak e-lojistik sistemlerinin kapsamını genişletmiştir. Elektronik veri değişimi, depo yönetim sistemleri

ve taşıma yönetim sistemleri lojistik faaliyetlerin dijital altyapı üzerinden yönetilmesini sağlayan temel teknolojiler arasında yer almaktadır. Bunun yanında nesnelerin interneti, büyük veri analitiği ve bulut bilişim uygulamaları lojistik süreçlerde veri akışının hızlanmasına ve operasyonel planlama süreçlerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (Queiroz vd., 2022: 1160-1162).

Dijital platformlar üzerinden gerçekleştirilen veri paylaşımı taşıma planlaması, rota optimizasyonu ve envanter yönetimi gibi lojistik faaliyetlerin daha etkin biçimde yürütülmesine imkân tanımaktadır. Lojistik süreçlerin daha esnek ve hızlı biçimde yönetilebilmesi operasyonel maliyetlerin azaltılmasına ve hizmet seviyesinin geliştirilmesine katkı sağlayabilmektedir (Karagöz, 2012: 57). Dijital teknolojilerin lojistik süreçlere entegrasyonu sürdürülebilir lojistik uygulamalarının gelişimini de desteklemektedir. Rota optimizasyonu uygulamaları taşıma faaliyetlerinde yakıt tüketiminin azaltılmasına yardımcı olurken depo yönetim sistemleri depo operasyonlarında enerji kullanımının daha verimli planlanmasına olanak tanımaktadır. Veri temelli planlama yaklaşımları kaynak kullanımının daha dengeli yönetilmesine katkı sağlayarak lojistik faaliyetlerin çevresel etkilerinin azaltılmasına yardımcı olabilmektedir (Wichaisri ve Sopadang, 2018: 12). Tedarik zinciri yönetiminde dijitalleşmenin yaygınlaşması e-lojistik uygulamalarının önemini artırmakta; dijital bilgi sistemleri aracılığıyla yürütülen lojistik faaliyetler operasyonel süreçlerin daha etkin biçimde planlanmasını mümkün kılmakta ve tedarik zinciri aktörleri arasındaki koordinasyonun güçlenmesine katkı sağlamaktadır (Nguyen, 2013: 306).

2.5. Sürdürülebilir Üretim ve E-Lojistik Entegrasyonu

Üretim sistemlerinin sürdürülebilirliği tedarik zinciri boyunca gerçekleşen faaliyetlerin bütüncül biçimde yönetilmesini gerektirmektedir. Hammadde temini, üretim süreçleri, depolama faaliyetleri ve dağıtım operasyonları üretim sistemlerinin toplam çevresel performansını doğrudan etkilemektedir. Özellikle lojistik faaliyetler enerji tüketimi ve emisyon üretimi açısından üretim sistemlerinin çevresel etkisini belirleyen temel unsurlar arasında yer almaktadır. Bu nedenle sürdürülebilir üretim hedeflerine ulaşılabilmesi lojistik süreçlerin verimlilik ve çevresel etkiler dikkate alınarak yönetilmesini gerekli kılmaktadır (Evangelista, 2014: 68-69; McKinnon, 2015: 34-38).

Dijital teknolojilerin tedarik zinciri süreçlerine entegrasyonu lojistik faaliyetlerin planlanması ve yönetiminde yeni olanaklar ortaya çıkarmaktadır (Shashi vd., 2020: 1218-1220). Veri temelli yönetim yaklaşımları operasyonel görünürlüğü artırmakta ve tedarik zinciri aktörleri arasındaki koordinasyonu güçlendirmektedir. Gerçek zamanlı veri paylaşımı sayesinde sipariş yönetimi,

envanter kontrolü ve taşıma planlama süreçleri daha sistemli biçimde yürütülebilmektedir (Ivanov vd., 2016: 387-389; Wamba vd., 2017: 357-359).

Söz konusu dijital dönüşüm lojistik faaliyetlerin dijital platformlar aracılığıyla yürütülmesini ifade eden e-lojistik uygulamalarının yaygınlaşmasına zemin hazırlamıştır. Dijital lojistik sistemleri aracılığıyla elde edilen veriler operasyonel planlamayı kolaylaştırmakta ve üretim planlama faaliyetleri ile lojistik operasyonlar arasındaki uyumu güçlendirmektedir. Böyle bir entegrasyon planlama doğruluğunu artırmakta, kaynak kullanımının daha etkin biçimde yönetilmesine imkân tanımakta ve üretim sistemlerinin çevresel ile operasyonel performansının geliştirilmesini desteklemektedir. Bu çerçevede e-lojistik uygulamaları üretim ve lojistik süreçleri arasında veri temelli entegrasyonun sürdürülebilir üretim performansı üzerindeki rolünü açıklayan önemli bir dijital altyapı olarak değerlendirilmektedir.

3. E-Lojistiğin Sürdürülebilir Üretim Üzerindeki Etkileri

Dijital teknolojilerin lojistik süreçlerde daha yaygın kullanılmaya başlaması üretim ve lojistik faaliyetleri arasındaki ilişkiyi de önemli ölçüde değiştirmektedir. E-lojistik uygulamaları sayesinde tedarik zinciri boyunca bilgi akışı hızlanmakta ve üretim ile lojistik süreçleri arasındaki koordinasyon daha güçlü hâle gelmektedir. Dijital veri paylaşımı üretim planlarının daha doğru hazırlanmasına, kaynakların daha verimli kullanılmasına ve operasyonel süreçlerin daha esnek biçimde yönetilmesine yardımcı olabilmektedir (Ivanov vd., 2016: 387; Gunasekaran vd., 2017: 17-19; Wamba vd., 2017: 362-364). Bu nedenle e-lojistik uygulamaları üretim sistemlerinin işleyişini farklı yönlerden etkileyebilmektedir. Bu bölümde söz konusu etkiler operasyonel verimlilik, çevresel performans ve üretim çevikliği başlıkları altında incelenmektedir.

3.1. Operasyonel Verimlilik ve Üretim Performansı

Küresel ölçekte rekabetin giderek yoğunlaşması işletmeleri üretim süreçlerini daha etkin ve verimli biçimde yönetmeye zorlamaktadır. Artan rekabet baskısı üretim planlarının daha doğru hazırlanmasını, kaynakların daha dikkatli kullanılmasını ve üretim ile lojistik faaliyetleri arasındaki uyumun güçlendirilmesini gerekli hâle getirmektedir. Ancak tedarik zinciri süreçlerinde yaşanan bilgi gecikmeleri ve koordinasyon sorunları üretim sistemlerinde planlama hatalarına ve verimlilik kayıplarına yol açabilmektedir. Dijital teknolojilerin lojistik süreçlere entegrasyonu üretim ve lojistik faaliyetleri arasındaki bilgi akışını güçlendirerek bu tür sorunların azaltılmasına yardımcı olabilmektedir (Marujo vd., 2023: 4-5). Bu çerçevede e-lojistik uygulamalarının üretim sistemlerinde operasyonel verimlilik ve üretim performansı ile ilişkili başlıca etkileri aşağıda özetlenmektedir.

- *Üretim ve lojistik süreçleri arasındaki koordinasyonun geliştirilmesi:* Dijital teknolojilerin lojistik faaliyetlere entegrasyonu üretim ve lojistik süreçleri arasındaki bilgi akışını hızlandırmakta ve tedarik zinciri aktörleri arasındaki koordinasyonu güçlendirmektedir. Sipariş bilgileri, envanter seviyeleri ve taşıma planlarının dijital sistemler üzerinden paylaşılması üretim planlama süreçlerinin daha uyumlu biçimde yürütülmesine olanak tanımaktadır. Bu sayede planlama hataları ve bilgi gecikmeleri azaltılmakta, üretim faaliyetleri ile lojistik operasyonlar arasında daha yüksek düzeyde bir senkronizasyon sağlanabilmektedir (Ivanov vd., 2016: 387-389; Wamba vd., 2017: 362-364).
- *Planlama doğruluğunun ve karar alma süreçlerinin iyileştirilmesi:* Gerçek zamanlı veri akışı üretim planlaması süreçlerinde daha doğru ve zamanında kararların alınmasına katkı sağlamaktadır. Lojistik faaliyetlere ilişkin verilerin dijital platformlar aracılığıyla izlenebilmesi üretim planlarının daha sağlıklı biçimde oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Özellikle envanter hareketlerinin gerçek zamanlı olarak takip edilmesi üretim ve dağıtım süreçleri arasındaki operasyonel uyumu güçlendirmekte ve süreçlerde ortaya çıkabilecek aksaklıkların azaltılmasına yardımcı olmaktadır (Gunasekaran vd., 2017: 27-29).
- *Kaynak kullanımının ve stok yönetiminin iyileştirilmesi:* Dijital veri analitiği ve planlama araçlarının kullanılması üretim sistemlerinde talep tahminlerinin daha doğru biçimde yapılmasına olanak tanımaktadır. Talep ve envanter verilerinin dijital platformlar üzerinden paylaşılması stok yönetiminin daha etkin biçimde yürütülmesine katkı sağlamakta, aşırı stok oluşumunun azaltılmasına ve üretim kaynaklarının daha verimli kullanılmasına yardımcı olmaktadır. Bu durum üretim sistemlerinde maliyetlerin düşürülmesi ve kaynak kullanımının optimize edilmesi açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Türkmen ve Sarıcan, 2016: 293).
- *Üretim sistemlerinde esneklik ve operasyonel çevikliğin geliştirilmesi:* E-lojistik uygulamaları tedarik zinciri boyunca kurulan dijital veri ağları sayesinde üretim sistemlerinin değişen talep koşullarına daha hızlı uyum sağlayabilmesine olanak tanımaktadır. Dijital veri paylaşımı üretim ve dağıtım süreçlerinde daha hızlı karar alınmasını desteklemekte, üretim sistemlerinin esnekliğini artırmakta ve operasyonel çevikliğin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır (Queiroz vd., 2022: 1161).

Genel bir değerlendirme yapıldığında e-lojistik uygulamalarının üretim ve lojistik süreçleri arasındaki bilgi akışını güçlendirerek üretim planlama faaliyetlerinin daha etkin biçimde yürütülmesine katkı sağladığı görülmektedir.

Dijital veri paylaşımının artması üretim planlarının lojistik faaliyetlerle daha uyumlu biçimde yürütülmesine olanak tanımakta ve üretim sistemlerinde operasyonel verimliliğin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

3.2. Çevresel Performans ve Kaynak Verimliliği

Çevresel sorunların giderek daha görünür hâle gelmesi üretim faaliyetlerinin çevresel etkilerinin daha dikkatli biçimde ele alınmasını gerekli kılmıştır. Enerji tüketimi, hammadde kullanımı ve lojistik faaliyetler üretim sistemlerinin çevresel performansını doğrudan etkileyen başlıca unsurlar arasında yer almaktadır. Özellikle taşıma, depolama ve dağıtım gibi lojistik faaliyetler enerji kullanımı ve karbon emisyonları açısından önemli bir paya sahiptir. Bu nedenle lojistik süreçlerin daha etkin planlanması ve kaynak kullanımının daha verimli yönetilmesi sürdürülebilir üretim hedefleri açısından önem taşımaktadır (Grant vd., 2017: 158-160). Dijital teknolojilerin lojistik süreçlere entegrasyonu ise veri temelli planlama ve izleme imkânları sunarak bu faaliyetlerin çevresel etkilerinin daha etkin biçimde yönetilmesine yardımcı olabilmektedir (McKinnon, 2015: 27-29; Kumar, 2022: 142-143). Bu çerçevede e-lojistik uygulamalarının üretim sistemlerinde çevresel performans ve kaynak verimliliği üzerindeki başlıca etkileri aşağıda özetlenmektedir.

- *Taşıma faaliyetlerinde enerji tüketimi ve emisyonların azaltılması:* Tedarik zinciri süreçlerinde gerçekleştirilen taşıma, depolama ve dağıtım faaliyetleri enerji tüketimi ve karbon emisyonları açısından önemli bir çevresel etkiye sahiptir. Dijital teknolojilerin lojistik faaliyetlere entegrasyonu taşıma planlarının veri temelli yaklaşımlar aracılığıyla daha etkin biçimde oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Dijital platformlar üzerinden yürütülen rota optimizasyonu uygulamaları daha kısa ve verimli taşıma rotalarının belirlenmesini sağlayarak yakıt tüketiminin azaltılmasına ve karbon emisyonlarının düşürülmesine katkı sağlayabilmektedir (Evangelista, 2014: 68-70).
- *Depolama faaliyetlerinde enerji kullanımının optimize edilmesi:* Depo yönetim sistemleri ve dijital lojistik platformları depo operasyonlarının daha etkin biçimde planlanmasına yardımcı olmaktadır. Envanter hareketlerinin dijital sistemler aracılığıyla izlenebilmesi depo içi süreçlerin daha verimli biçimde yürütülmesini desteklemekte ve depo operasyonlarında kullanılan enerji kaynaklarının daha etkin biçimde yönetilmesine olanak tanımaktadır. Bu durum lojistik faaliyetlerin çevresel etkilerinin sınırlandırılmasına katkı sağlayabilmektedir. (Wichaisri ve Sopadang, 2013: 1018).

- *Kaynak kullanımının veri temelli planlama ile iyileştirilmesi:* Lojistik süreçlerde veri görünürlüğünün artması tedarik zinciri boyunca gerçekleştirilen faaliyetlerin daha etkin biçimde yönetilmesine olanak tanımaktadır. Talep ve envanter verilerinin dijital platformlar aracılığıyla paylaşılması üretim planlarının daha doğru biçimde oluşturulmasını desteklemekte ve üretim sistemlerinde aşırı stok oluşumunun azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Böylece üretim ve lojistik faaliyetlerinde kullanılan kaynakların daha verimli biçimde değerlendirilmesi mümkün hâle gelmektedir (Wichaisri ve Sopadang, 2018: 2).
- *Çevresel performansın bütüncül biçimde geliştirilmesi:* Kaynak kullanımının daha etkin biçimde yönetilmesi üretim sistemlerinin çevresel performansının geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Enerji tüketiminin azaltılması, taşıma faaliyetlerinde yakıt kullanımının optimize edilmesi ve lojistik operasyonlarda ortaya çıkan emisyonların sınırlandırılması sürdürülebilir üretim hedeflerinin temel bileşenleri arasında yer almaktadır (Brandenburg vd., 2014: 305-308). Dijital lojistik sistemleri aracılığıyla yürütülen veri temelli planlama uygulamaları üretim ve lojistik süreçlerinde çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlayabilmektedir.

Genel bir değerlendirme yapıldığında e-lojistik uygulamalarının lojistik faaliyetlerin çevresel etkilerinin daha etkin biçimde yönetilmesine katkı sağladığı görülmektedir. Dijital teknolojiler aracılığıyla gerçekleştirilen veri temelli planlama uygulamaları taşıma ve depolama faaliyetlerinde enerji kullanımının daha verimli yönetilmesine olanak tanımakta ve karbon emisyonlarının azaltılmasını desteklemektedir. Tedarik zinciri boyunca veri görünürlüğünün artması kaynak kullanımının daha etkin biçimde planlanmasına yardımcı olmakta ve üretim sistemlerinde aşırı stok oluşumunun azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Bu çerçevede e-lojistik uygulamaları sürdürülebilir üretim sistemlerinde çevresel performansın geliştirilmesi ve kaynak verimliliğinin artırılması açısından önemli bir araç olarak değerlendirilebilmektedir.

3.3. Üretim Çevikliği ve Tedarik Zinciri Dayanıklılığı

Küresel tedarik zincirlerinde yaşanan kesintiler üretim sistemlerinin çevikliği ve dayanıklılığı konularını üretim yönetimi literatürünün önemli araştırma alanlarından biri hâline getirmiştir (Dubey vd., 2021: 4-6). Pandemi süreci, jeopolitik gelişmeler ve tedarik zinciri aksaklıkları üretim faaliyetlerinin yalnızca verimlilik odaklı yönetilmesinin yeterli olmadığını göstermiştir. Tedarik zinciri süreçlerinde ortaya çıkan belirsizlikler üretim sistemlerinin değişen koşullara hızlı uyum sağlayabilmesini gerektirmektedir (Queiroz vd., 2022: 1159).

Bu kapsamda e-lojistik uygulamalarının üretim çevikliği ve tedarik zinciri dayanıklılığı üzerindeki başlıca etkileri aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- *Üretim çevikliğinin geliştirilmesi:* Üretim çevikliği değişen talep koşullarına ve tedarik zinciri aksaklıklarına hızlı uyum sağlayabilme kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Çevik üretim sistemleri üretim planlarının hızlı biçimde yeniden düzenlenebilmesini, kaynakların esnek biçimde tahsis edilmesini ve üretim süreçlerinin değişen pazar koşullarına uyum sağlayabilmesini mümkün kılmaktadır. Tedarik zinciri aktörleri arasında kurulan güçlü bilgi akışı üretim çevikliğinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Christopher, 2016: 19-22).
- *Tedarik zinciri dayanıklılığının güçlendirilmesi:* Tedarik zinciri dayanıklılığı üretim ve lojistik sistemlerinin beklenmeyen kesintiler karşısında faaliyetlerini sürdürebilme ve kısa sürede toparlanabilme kapasitesi ile ilişkilendirilmektedir. Ancak tedarik zinciri süreçlerinde bilgi görünürlüğünün sınırlı olması üretim sistemlerinde belirsizliklerin artmasına ve planlama süreçlerinin zorlaşmasına yol açabilmektedir. Tedarik zinciri aktörleri arasında veri paylaşımının yetersiz olması üretim planlarının etkin biçimde oluşturulmasını güçleştirmektedir (Ivanov vd., 2016: 388-389).
- *Dijital veri görünürlüğünün artırılması:* Dijital teknolojilerin tedarik zinciri süreçlerine entegrasyonu üretim ve lojistik faaliyetlere ilişkin verilerin gerçek zamanlı olarak izlenebilmesine olanak tanımaktadır. Veri temelli izleme sistemleri tedarik zinciri süreçlerinde yaşanan aksaklıkların daha hızlı tespit edilmesini sağlamak ve üretim planlarının daha hızlı güncellenmesine yardımcı olmaktadır (Duran, 2022: 56-59). Bu durum operasyonel süreçlerde daha hızlı karar alınmasına ve üretim sistemlerinin değişen koşullara daha hızlı uyum sağlayabilmesine katkı sağlamaktadır (Wamba vd., 2017: 363-364).
- *Üretim ve lojistik süreçleri arasında dijital koordinasyonun geliştirilmesi:* Dijital lojistik sistemleri aracılığıyla gerçekleştirilen veri paylaşımı üretim ve lojistik süreçleri arasındaki koordinasyonu güçlendirmektedir. Tedarik zinciri boyunca paylaşılan dijital veriler üretim planlarının lojistik faaliyetlerle daha uyumlu biçimde yürütülmesine olanak tanımakta ve üretim sistemlerinin talep değişimlerine veya tedarik zinciri kesintilerine daha hızlı uyum sağlayabilmesine yardımcı olmaktadır (Gunasekaran vd., 2017: 356-358; Hofmann ve Rüsch, 2017: 25-27).

Genel bir değerlendirme yapıldığında e-lojistik uygulamalarının üretim ve lojistik süreçleri arasındaki bilgi akışını güçlendirerek üretim sistemlerinin

çevikliğini ve tedarik zinciri dayanıklılığını geliştirmeye katkı sağladığı görülmektedir. Dijital veri paylaşımının artması üretim planlama süreçlerinin lojistik faaliyetlerle daha uyumlu biçimde yürütülmesine olanak tanımakta ve üretim sistemlerinin değişen talep koşullarına daha hızlı uyum sağlayabilmesini desteklemektedir.

4. Tartışma ve Yönetimsel Çıkarımlar

Bu çalışma kapsamında geliştirilen kuramsal değerlendirmeler e-lojistik uygulamalarının üretim ve lojistik faaliyetleri arasındaki etkileşimi güçlendirebileceğini göstermektedir. Dijital lojistik altyapıları aracılığıyla gerçekleştirilen veri paylaşımı üretim planlama süreçleri ile lojistik operasyonlar arasında daha güçlü bir uyum kurulmasına katkı sağlayabilmektedir. Böyle bir veri temelli koordinasyon üretim sistemlerinde planlama hatalarının azaltılmasına ve operasyonel süreçlerin daha etkin biçimde yönetilmesine olanak tanımaktadır.

E-lojistik uygulamalarının üretim sistemleri üzerindeki etkileri yalnızca operasyonel süreçlerle sınırlı değildir. Dijital veri temelli planlama yaklaşımları üretim ve lojistik faaliyetlerinde kaynak kullanımının daha dengeli biçimde yönetilmesine katkı sağlayabilmektedir. Bunun yanında tedarik zinciri süreçlerinde bilgi görünürlüğünün artması üretim sistemlerinin değişen talep koşullarına daha hızlı uyum sağlayabilmesine olanak tanımakta ve üretim sistemlerinin esnekliğini güçlendirmektedir. Bu yönüyle e-lojistik uygulamaları yalnızca lojistik performansı artıran bir araç olarak değil aynı zamanda üretim sistemlerinin sürdürülebilirlik kapasitesini destekleyen stratejik bir dijital yetenek olarak değerlendirilebilir.

Yönetimsel açıdan değerlendirildiğinde işletmelerin dijital lojistik altyapılarını üretim planlama süreçleri ile entegre etmeleri tedarik zinciri faaliyetleri arasında daha güçlü bir koordinasyon oluşturabilir. Özellikle sipariş yönetimi sistemleri, taşıma yönetim sistemleri ve depo yönetim sistemlerinin üretim planlama faaliyetleri ile birlikte ele alınması üretim ve lojistik operasyonlarının daha uyumlu biçimde yönetilmesine katkı sağlayabilir.

5. Sonuç

Dijitalleşme ve sürdürülebilirlik günümüzde üretim sistemlerinin dönüşümünü şekillendiren iki önemli eğilim olarak öne çıkmaktadır. Artan çevresel baskılar, sınırlı doğal kaynaklar ve küresel rekabet koşulları işletmelerin üretim faaliyetlerini yalnızca verimlilik açısından değil aynı zamanda çevresel sorumluluk perspektifinden de yeniden değerlendirmelerini gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda üretim sistemlerinin sürdürülebilirliği, üretim süreçlerinin yanı

sıra tedarik zinciri boyunca yürütülen lojistik faaliyetlerin yönetim biçimi ile de yakından ilişkilidir.

Bu çalışma e-lojistik uygulamalarını sürdürülebilir üretim perspektifinden ele alarak dijital lojistik entegrasyonunun üretim sistemleri üzerindeki rolünü kuramsal bir çerçevede incelemiştir. Literatürde e-lojistik araştırmalarının çoğunlukla operasyonel performans ve tedarik zinciri etkinliği üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Buna karşılık e-lojistik yeteneklerinin sürdürülebilir üretim performansı ile ilişkisini bütüncül biçimde ele alan çalışmalar sınırlı kalmaktadır. Bu çalışma dijital lojistik entegrasyonunun üretim ve lojistik faaliyetleri arasındaki etkileşimi güçlendirebileceğini ve sürdürülebilir üretim kapasitesinin geliştirilmesine katkı sağlayabileceğini göstererek literatürde genellikle ayrı ele alınan e-lojistik ve sürdürülebilir üretim araştırmaları arasında kavramsal bir ilişki kurulmasına katkı sunmaktadır.

Gelecekte gerçekleştirilecek ampirik araştırmaların e-lojistik yetenekleri ile sürdürülebilir üretim performansı arasındaki ilişkileri nicel yöntemler aracılığıyla incelemesi literatür açısından önemli katkılar sağlayabilir. Özellikle farklı sektörlerde faaliyet gösteren işletmelerde dijital lojistik uygulamalarının üretim performansı ve çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı biçimde analiz edilmesi araştırma alanının gelişimine katkı sağlayacaktır.

6. Kaynakça

- Bayles, D. L., Bhatia, H. (2000). *E-Commerce Logistics & Fulfillment: Delivering the Goods*. Prentice Hall PTR.
- 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.
- 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.
- Shashi, Centobelli, P., Cerchione, R., Ertz, M. (2020). Managing Supply Chain Resilience to Pursue Business and Environmental Strategies. *Business Strategy and the Environment*, 29(3), 1215-1246.
- Christopher, M. (2016). *Logistics and Supply Chain Management* (5th ed.). Pearson Education.
- Derse, O. (2022). Detection of Sustainable Logistics Sub-Components and, Determination of Impact Levels of Sustainable Logistics Components with Dematel Method. *Toros Üniversitesi İİSBF Sosyal Bilimler Dergisi*, Cilt: IX (Special Issue 2nd International Symposium of Sustainable Logistics “Circular Economy”), s. 18-25.
- Dubey, R., Gunasekaran, A., Bryde, D., Dwivedi, Y. K., Papadopoulos, T. (2021). Big Data Analytics and Artificial Intelligence Pathway to Operational Performance Under the Effects of Entrepreneurial Orientation and Environmental Dynamism. *Annals of Operations Research*, 304, 1-26.
- Duran, G. (2022). *Lojistik Sektörü ve E-Lojistik Uygulamalarının Rekabet Gücü Yönüyle Değerlendirilmesi: Antalya Serbest Bölgesi İşletmeleri Örneği*, (Basilmamış Doktora Tezi), Süleyman Demirel Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Isparta.
- Elkington, J. (1997). *Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business*. Capstone Publishing.
- Evangelista, P. (2014). Environmental Sustainability Practices in the Transport and Logistics Service Industry: An Exploratory Case Study Investigation. *Research in Transportation Business & Management*, 12, 63-72.
- Grant, D. B., Wong, C. Y., Trautrim, A. (2017). *Sustainable Logistics and Supply Chain Management: Principles and Practices for Sustainable Operations and Management*. Kogan Page Publishers.
- Grzybowska, K., Awasthi, A., Sawhney, R. (2019). *Sustainable Logistics and Production in Industry 4.0*. Springer Nature: Cham, Switzerland.
- Gunasekaran, A., Subramanian, N., Papadopoulos, T. (2017). Information Technology for Competitive Advantage Within Logistics and Supply Chains: A

- review. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 99, 14-33.
- Hofmann, E., Rüsch, M. (2017). Industry 4.0 And the Current Status as well as Future Prospects on Logistics. *Computers in Industry*, 89, 23-34.
- Huang, A. (2017). A Framework and Metrics for Sustainable Manufacturing Performance Evaluation at the Production Line, Plant and Enterprise Levels.
- Ivanov, D., Dolgui, A., Sokolov, B., Werner, F., Ivanova, M. (2016). A Dynamic Model and an Algorithm for Short-Term Supply Chain Scheduling in the Smart Factory Industry 4.0. *International Journal of Production Research*, 54(2), 386-402.
- Jayal, A. D., Badurdeen, F., Dillon Jr, O. W., Jawahir, I. S. (2010). Sustainable Manufacturing: Modeling And Optimization Challenges at the Product, Process and System Levels. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2(3), 144-152.
- Joong-Kun Cho, J., Ozment, J., Sink, H. (2008). Logistics Capability, Logistics Outsourcing and Firm Performance in an E-Commerce Market. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 38(5), 336-359.
- Karagöz, B. (2012). *E-Lojistik Uygulamaları*, Bursa: Ekin Yayınevi.
- Kleindorfer, P. R., Singhal, K., Van Wassenhove, L. N. (2005). Sustainable Operations Management. *Production and Operations Management*, 14(4), 482-492.
- Kumar, K. M. (2022). The Influence of Sustainable Logistic Practices and Supplier Support on Logistics Transport Performance: An Empirical Review on Malaysian Logistics Service Providers. *Journal of Entrepreneurship, Business and Economics*, 10(1), 141-177.
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 6(4), 239-242.
- Marchet, G., Perego, A., Perotti, S. (2009). An Exploratory Study of ICT Adoption in the Logistics Industry. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 39(9), 785-812.
- Marujo, L. G., de Abreu, V. H. S., da Costa, M. G., Rodrigues, L. M., D'Agosto, M. D. A. (2023). Best Practices to Support the Transition towards Sustainable Logistics from the Perspective of Brazilian Carriers. *Sustainability*, Cilt: XV/18-13434, s. 1-12.
- McKinnon, A. (2015). *Green Logistics: Improving the Environmental Sustainability of Logistics* (3rd ed.). Kogan Page.
- Nguyen, H. O. (2013). Critical Factors in E-Business Adoption: Evidence from Australian Transport and Logistics Companies. *International Journal of Production Economics*, 146(1), 300-312.

- Queiroz, M. M., Ivanov, D., Dolgui, A., Fosso Wamba, S. (2022). Impacts of Epidemic Outbreaks on Supply Chains: Mapping A Research Agenda Amid the COVID-19 Pandemic Through a Structured Literature Review. *Annals of Operations Research*, 319(1), 1159-1196.
- Sarkis, J. (2001). Manufacturing's Role in Corporate Environmental Sustainability. *International Journal of Operations & Production Management*, 21(5-6), 666-686.
- 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.
- Srivastava, S. K. (2007). Green Supply-Chain Management: A State-of-the-Art Literature Review. *International Journal of Management Reviews*, 9(1), 53-80.
- Stock, T., Seliger, G. (2016). Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 40, 536-541.
- Tekin, E. (2014). *E-Lojistik ve İlaç Dağıtımında E-Lojistik Uygulamaları*, (Basılmamış Yüksek Lisans Tezi), Selçuk Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Konya.
- Topal, Y. K., (2013). *Lojistik Yönetiminde E-Lojistik Kullanımının Önemi, Değişen Pazar Şartlarında E-Lojistik Kullanan İşletmeler Üzerine Bir İnceleme*, (Basılmamış Yüksek Lisans Tezi), Deniz Harp Okulu, Deniz Bilimleri ve Mühendisliği Enstitüsü, İstanbul.
- Türkmen, M. A., Sarıcan, M. A. (2016). E-Lojistikte Kritik Faktörlerin Belirlenmesi: Türkiye'deki E-Lojistik Uygulamaları. *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (26), 278-298.
- Waller, M. A., Fawcett, S. E. (2013). Data Science, Predictive Analytics, and Big Data: A Revolution That Will Transform Supply Chain Design and Management. *Journal of Business Logistics*, 34(2), 77-84.
- Wamba, S. E., Gunasekaran, A., Akter, S., Ren, S. J. F., Dubey, R., Childe, S. J. (2017). Big Data Analytics and Firm Performance: Effects of Dynamic Capabilities. *Journal of Business Research*, 70, 356-365.
- Wichaisri, S., Sopadang, A. (2013). Sustainable Logistics System: A Framework and Case Study. In 2013 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (s. 1017-1021). IEEE.
- Wichaisri, S., Sopadang, A. (2018). Trends and Future Directions in Sustainable Development. *Sustainable Development*, 26(1), 1-17.

Dijital Çağda Üretim Yönetimi: Dönüşüm, Entegrasyon ve Sürdürülebilirlik

Editör:

Zafer DURAN