

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	

		<ul style="list-style-type: none"> • Malzeme İhtiyaç Planlaması (MRP) • Bilimsel kitaplar ve dergiler 	
1969–2000	Endüstri 3.0 (1969–2000’ler) <ul style="list-style-type: none"> • Mikroişlemciler • PLC (Programlanabilir Mantık Denetleyicisi) • Elektronik ve bilgi teknolojileri 	Lojistik 3.0 (1980–2010) <ul style="list-style-type: none"> • Lojistik yönetim sistemi • Kişisel bilgisayarlar • Lojistik planlama • Hızlı yanıt sistemi • Üçüncü parti lojistik • Lojistik–TZY ayrımı 	TZY 3.0 (1980’lerin başı) <ul style="list-style-type: none"> • 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–...) <ul style="list-style-type: none"> • Yüksek esnek kişiselleştirilmiş üretim • Dijitalleşme • Bulut bilişim • Nesnelerin interneti • Büyük veri • Makine öğrenmesi • Sensörler 	Lojistik 4.0 (2010–...) <ul style="list-style-type: none"> • 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–...) <ul style="list-style-type: none"> • 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 toplama 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 örneklerinde 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.

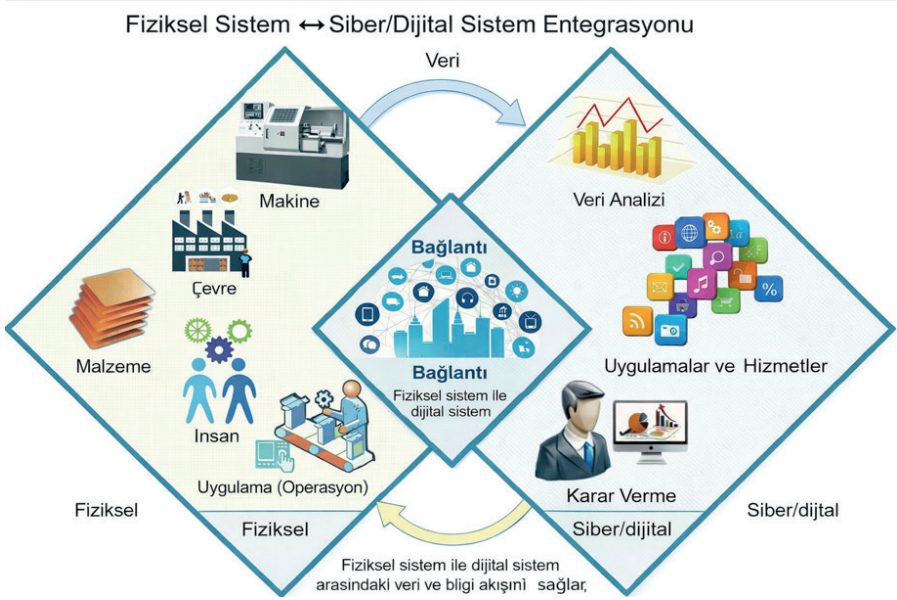
3. Dijital Tedarik Zinciri Mimarisi

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 (Andronic 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 (Gerrickagoitia vd., 2019).

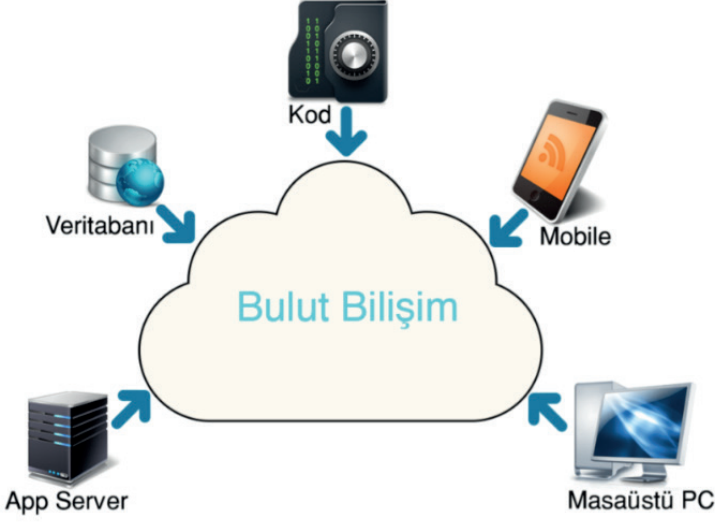
3.1.4. Dijital İkiz Platformları

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).

Düğümler, mutabakat algoritmaları aracılığıyla hangi blokların geçerli olduğu konusunda anlaşmaktadır (Yadav, Singh ve Kushwaha, 2023). Uzlaşma, katılımcılar birbirine güvenmeseler bile tek ve yetkili bir tarihsel kaydın 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 koşullarını 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 otomasyonu 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 fotovoltaik 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 Öngörüsül 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, kısıtları 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 değışkeni 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 aksama 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 Shiyabola, 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 Shiyabola, 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 uyurlanabilirlik 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., Yanikoğlu, 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. E., & 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., Fiel, 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., ElMoaqet, 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., Piteř, J., Adámek, M., Lazorík, P., & Hořovský, 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/accm.2025.070415>.