KAYSERİ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ULUSLARARASI TİCARET VE LOJİSTİK ANABİLİM DALI

İLAÇ TEDARİK ZİNCİRİNDE YENİLİKÇİ BİR YAKLAŞIM: BLOK ZİNCİR TEMELLİ AĞ MİMARİSİ

DOKTORA TEZİ

HAKAN ARSLANHAN

DANIŞMAN
DOÇ. DR. YILMAZ DELİCE



2025

T.C.
KAYSERİ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ULUSLARARASI TİCARET VE LOJİSTİK ANABİLİM DALI

İLAÇ TEDARİK ZİNCİRİNDE YENİLİKÇİ BİR YAKLAŞIM: BLOK ZİNCİR TEMELLİ AĞ MİMARİSİ

(Doktora Tezi)

Hazırlayan
Hakan ARSLANHAN

Danışman
Doç. Dr. Yılmaz DELİCE

Jüri Üyeleri
1. Doç. Dr. Yılmaz DELİCE
2. Prof. Dr. Emel KIZILKAYA AYDOĞAN
3. Prof. Dr. Mehmet Duran TOKSARI
4. Prof. Dr. Tuncay ÇELİK
5. Prof. Dr. Neslihan DEMİREL

Ağustos 2025
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu tezin kendi çalışmam olduğunu, planlanmasından yazımına kadar hiçbir aşamasında etik dışı davranışımın olmadığını, tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları kaynaklar listesine aldığımı, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

Hakan ARSLANHAN

	TEZ İNTİHAL RAPORU TESLİM FORMU	Doküman No	FR-287
		İlk Yayın Tarihi	8/02/2022
		Revizyon Tarihi	-
		Revizyon No	0
		Sayfa No	1/1

T.C.
Kayseri Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürlüğü

Anabilim Dalı : Uluslararası Ticaret ve Lojistik
Program Adı : Doktora
Tez Başlığı : İlaç Tedarik Zincirinde Yenilikçi Bir Yaklaşım: Blok Zincir Temelli Ağ Mimarisi

Yukarıda bilgileri verilen tez çalışmasının a) Giriş, b) Ana bölümler ve c) Sonuç kısımlarından oluşan (Kapak, Önsöz, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) toplam 213 sayfalık kısmına ilişkin 19/08/2025 tarihinde ***Turnitin*** intihal programından aşağıda belirtilen filtreleme uygulanarak alınmış olan özgünlük raporuna göre tezin benzerlik oranı**: % 1'**dir.

Uygulanan filtrelemeler:

1- Giriş dahil
2- Ana Bölümler dahil
3- Sonuç dahil
4- Alıntılar dahil
5- Kapak hariç
6- Önsöz ve Teşekkür hariç
7- İçindekiler hariç
8- Kaynakça hariç
9- Özet hariç
10- Yedi (7) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Kayseri Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Önerisi Hazırlama, Tez Yazma ve Teslim Yönergesini inceledim ve bu yönergede belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini bilgilerinize arz ederim. …./…./……..

Danışman	Öğrenci
Doç. Dr. Yılmaz DELİCE	Hakan ARSLANHAN
İmza	İmza

KILAVUZA UYGUNLUK

"İlaç Tedarik Zincirinde Yenilikçi Bir Yaklaşım: Blok Zincir Temelli Ağ Mimarisi" başlıklı Doktora Tezi, Kayseri Üniversitesi Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan	**Tez Danışmanı**
Hakan ARSLANHAN	Doç. Dr. Yılmaz DELİCE

Uluslararası Ticaret ve Lojistik ABD Başkanı

Dr. Öğretim Üyesi Ayhan DURAK

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Doç. Dr. Yılmaz DELİCE danışmanlığında Hakan ARSLANHAN tarafından hazırlanan "İlaç Tedarik Zincirinde Yenilikçi Bir Yaklaşım: Blok Zincir Temelli Ağ Mimarisi" başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından Kayseri Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Uluslararası Ticaret ve Lojistik Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

15/08/2025

JÜRİ:

Danışman	**: Doç. Dr. Yılmaz DELİCE**	İmza
Üye	**: Prof. Dr. Emel KIZILKAYA AYDOĞAN**	İmza
Üye	**: Prof. Dr. Mehmet Duran TOKSARI**	İmza
Üye	**: Prof. Dr. Tuncay ÇELİK**	İmza
Üye	**: Prof. Dr. Neslihan DEMİREL**	İmza

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun ……...…… tarih ve …… sayılı kararı ile onaylanmıştır.

……. /……../ ……

Doç. Dr. Ahmet TERZİ

İmza

Enstitü Müdürü

ÖN SÖZ / TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim ve bu tezin hazırlanma süreci, sadece akademik bir yolculuk değil; aynı zamanda sabır, kararlılık ve birçok kişinin desteğiyle örülmüş bir hayat deneyimi olmuştur.

Bu zorlu süreçte, bilgi ve tecrübeleriyle yolumu aydınlatan, akademik gelişimime büyük katkılar sunan ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen çok kıymetli danışmanım Doç. Dr. Yılmaz DELİCE'ye en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Aynı zamanda tez izleme komitemde yer alan ve bu çalışmanın her aşamasında değerli katkılarıyla süreci zenginleştiren Prof. Dr. Emel KIZILKAYA AYDOĞAN ve Prof. Dr. Neslihan DEMİREL hocalarıma müteşekkirim.

Bu yolculuğun en büyük manevi yükünü omuzlayan, her zaman yanımda olan, sabrıyla, sevgisiyle ve sessizce verdiği destekle bu sürecin gerçek kahramanı olan eşim Ayşen'e en derin şükranlarımı sunuyorum. Varlığın, inancın ve koşulsuz desteğin olmasaydı bu yol bu kadar güçlü yürünemezdi.

Ayrıca hayatım boyunca bana güç veren, sevgisi ve duasıyla her zaman arkamda duran kıymetli anneme, gösterdiği sonsuz sabır, anlayış ve fedakârlık için kalbimin en derin köşesinden teşekkür ederim. Varlığıyla bana her zaman güç veren aileme de şükranlarımı sunuyorum.

Ve... bu tezi, henüz dünyaya gözlerini açmamış ama daha şimdiden kalbimde kocaman bir yer edinmiş olan kızım Arin'e ithaf ediyorum. Bir gün bu sayfalara baktığında; babanın, sen daha gelmeden nasıl hayaller kurduğunu, umutla dolu bir gelecek için nasıl emek verdiğini hissedebileceğini umuyorum. Yolun açık, kalbin cesur, yüreğin sevgiyle dolu olsun. Bu tez, sana yazılmış bir umut mektubudur.

Hakan ARSLANHAN, Kayseri, 2025

İLAÇ TEDARİK ZİNCİRİNDE YENİLİKÇİ BİR YAKLAŞIM: BLOK ZİNCİR TEMELLİ AĞ MİMARİSİ

Hakan ARSLANHAN

Kayseri Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Doktora Tezi, Ağustos 2025
Danışman: Doç. Dr. Yılmaz DELİCE

ÖZET

Bu çalışma, ilaç tedarik zincirinde karşılaşılan soğuk zincir kırılması gibi kritik risklerin dijital olarak izlenebilmesi ve denetlenebilmesi amacıyla Hyperledger Fabric tabanlı blok zincir mimarisine dayalı bir model önermektedir. Mevcut sistemlerde gözlemlenen merkeziyetçilik, düşük şeffaflık ve sınırlı veri bütünlüğü gibi yapısal sorunlara karşılık, geliştirilen model; dağıtık defter teknolojisinin sunduğu değiştirilemezlik, rol bazlı erişim kontrolü ve zaman damgalı kayıt gibi özelliklerle alternatif bir çözüm sunmaktadır.

Model kapsamında üretici, dağıtıcı, eczane ve denetleyici kurum gibi temel aktörlerin sistemdeki işlemleri role özgü olarak tanımlanmış; taşıma sürecindeki sıcaklık verileri IoT sensörleri aracılığıyla otomatik olarak zincire kaydedilmiştir. Senaryo temelli uygulamada, sıcaklık sınırlarını aşan bir sevkiyat süreci simüle edilmiş ve eczane tarafından ürün reddi işlemi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Tüm işlemler hem Postman API çağrılarıyla hem de Hyperledger Explorer ve CouchDB arayüzleriyle görsel olarak doğrulanmıştır.

Tez kapsamında geliştirilen sistem, Türkiye'de hâlihazırda kullanılan İlaç Takip Sistemi (İTS) ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş; blok zincir tabanlı yapının özellikle şeffaflık, izlenebilirlik ve denetlenebilirlik açısından yapısal faydaları tartışılmıştır. Çalışma, kamu sağlığına yönelik dijital izlenebilirlik uygulamaları için sürdürülebilir ve güvenilir bir alternatif model önermektedir.

Anahtar Kelimeler: Blok Zincir Teknolojisi, İlaç Tedarik Zinciri, Soğuk Zincir Kırılması, Hyperledger Fabric, İzlenebilirlik.

AN INNOVATIVE APPROACH TO THE PHARMACEUTICAL SUPPLY CHAIN: BLOCKCHAIN-BASED NETWORK ARCHITECTURE

Hakan ARSLANHAN

Kayseri University Institute of Graduate Education
Doctoral Thesis, August 2025
Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Yılmaz DELİCE

ABSTRACT

This study proposes a model based on Hyperledger Fabric-based blockchain architecture to digitally monitor and control critical risks such as cold chain breakage in the pharmaceutical supply chain. In response to the structural problems such as centralization, low transparency and limited data integrity observed in existing systems, the developed model offers an alternative solution with features such as immutability, role-based access control and time-stamped recording offered by distributed ledger technology.

Within the scope of the model, the transactions of the main actors such as manufacturer, distributor, pharmacy and supervisory institution in the system are defined as role-specific; temperature data in the transportation process are automatically recorded in the chain through IoT sensors. In the scenario-based application, a shipment process that exceeded the temperature limits was simulated and a product rejection was successfully performed by the pharmacy. All operations were visually verified with both Postman API calls and Hyperledger Explorer and CouchDB interfaces.

The system developed within the scope of the thesis was evaluated in comparison with the existing Pharmaceutical Track and Trace System (ITS) in Turkey, and the structural benefits of the blockchain-based architecture, especially in terms of transparency, traceability, and auditability, were discussed. The study proposes a sustainable and reliable alternative model for digital traceability applications for public health.

Keywords: Blockchain, Pharmaceutical Supply Chain, Cold Chain Breach, Hyperledger Fabric, Traceability

İÇİNDEKİLER

İLAÇ TEDARİK ZİNCİRİNDE YENİLİKÇİ BİR YAKLAŞIM: BLOK ZİNCİR TEMELLİ AĞ MİMARİSİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK ..... **i**
TEZ İNTİHAL RAPORU TESLİM FORMU ..... **ii**
KILAVUZA UYGUNLUK ..... **iii**
KABUL VE ONAY TUTANAĞI ..... **iv**
ÖN SÖZ / TEŞEKKÜR ..... **v**
ÖZET ..... **vi**
ABSTACT ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **viii**
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ ..... **xiii**
TABLOLAR LİSTESİ ..... **xv**
ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **xvi**
GİRİŞ **1**

BİRİNCİ BÖLÜM
TEDARİK ZİNCİRİNİN KAVRAMSAL VE DÖNÜŞÜMSEL TEMELLERİ

1.1. Tedarik Zincirinin Temel Kavramsal Yapısı 5
1.2. Tedarik Zinciri Yönetiminin Dönüşüm Süreci 6
1.3. Tedarik Zincirinin Yapısal Özellikleri 7
1.4. Tedarik Zinciri Süreçleri 9
1.5. Modern Tedarik Zinciri Yönetiminin Önemi 10
1.6. Dijitalleşme ve Teknolojik Dönüşüm İhtiyacı 12
1.6.1. Dijital Tedarik Zinciri 13
1.6.2. Blok Zincir Teknolojisi 13
1.6.3. Yapay Zekâ ve Karar Destek Sistemleri 15
1.6.4. Nesnelerin İnterneti ve Gerçek Zamanlı İzlenebilirlik 16
1.6.5. Siber Güvenlik ve Veri Koruma Gerekliliği 17

İKİNCİ BÖLÜM
İLAÇ TEDARİK ZİNCİRİ

2.1. Tanım ve Sektörel Özellikler....20
2.2. Yapısal Özellikler ve Süreçler....22
2.3. Aktörler ve Kurumsal Roller....23
2.4. Yasal ve Düzenleyici Çerçeve....24
2.5. Karşılaşılan Temel Sorunlar ve Sistemsel Kırılganlıklar....26
2.6. Soğuk Zincir Lojistiği ve Kritik Önemi....28
2.6.1. Soğuk Zincir Süreçleri ve Kırılganlık Noktaları....30
2.6.2. Soğuk Zincir İzlenebilirliği İçin Dijital Altyapı Gereksinimi....31
2.7. İlaç Tedarik Zincirinde Risk Yönetimi, Kırılganlık, Dirençlilik ve Dayanıklılık 32

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
BLOK ZİNCİR TEKNOLOJİSİ: KAVRAMSAL VE KURAMSAL ARKA PLAN

3.1. Blok Zincir Teknolojisinin Tarihsel Gelişimi....36
3.2. Blok Zincir Teknolojisinin Tanımı ve Temel Kavramları....39
3.2.1. Dağıtık Defter Teknolojisi (Distributed Ledger Technology)....40
3.2.2. Blok Yapısı ve Hash Fonksiyonları....41
3.2.5. Akıllı Sözleşmeler (Smart Contracts)....46
3.2.6. İzinli ve İzinsiz Blok Zincirleri....47
3.2.7. Token Kavramı, Kripto Varlıklar....48
3.3. Blok Zincirin Sisteminin Yapısı ve Teknik Bileşenleri....50
3.3.1. Blok Yapısı ve Merkle Ağaçları....51
3.3.2. Dağıtık Yapı ve Veri Akışı....52
3.3.3. Ağda Uzlaşma ve Blok Onayı....53
3.3.4. Akıllı Sözleşmelerin İşleyişi....54
3.3.5. Sistem Katmanları....55
3.3.6. Güvenliğin Sağlanması ve Sistemsel Dayanıklılık....56
3.4. Blok Zincirin Temel Özellikleri ve Avantajları....57
3.4.1. Değiştirilemezlik....57
3.4.2. Şeffaflık ve İzlenebilirlik....57
3.4.3. Merkeziyetsizlik....58

3.4.4. Güvenlik 59
3.4.5. Otomasyon ve Verimlilik 59
3.4.6. Çok Aktörlü İş Birliği 59
3.4.7. Düşük Maliyet ve Hızlı İşlem Onayı 59
3.5. Blok Zincirin Diğer Teknolojilerle Entegrasyonu ve Gelecek Perspektifleri 60
3.6. Tedarik Zinciri Yönetiminde Blok Zincir Kullanımı ve Uygulama Alanları 65

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

HYPERLEDGER FABRİC: KURUMSAL BLOK ZİNCİR MİMARİSİ VE UYGULAMA POTANSİYELİ

4.1. Hyperledger Projesinin Genel Yapısı ve Kurumsal Konumlandırması 68
4.2. Alternatif Kurumsal Blok Zincir Platformları: Corda, Quorum ve Ripple 77
4.3. Hyperledger Fabric: Mimari Yapısı, Teknik Bileşenleri ve Kurumsal Uyum Kapasitesi 80
4.3.1. İşlem Modeli: Execute–Order–Validate Yaklaşımı 80
4.3.2. Ağ Yapısı (Network Structure) 82
4.3.3. Veri Yapısı (Data Structure) 83
4.3.4. Akıllı Sözleşme Yapısı (Chaincode) 85
4.3.5. Hyperledger Fabric'te Tamamlayıcı Teknik Yapılar (Ek Bileşenler) 86
4.3.6. Hyperledger Fabric'te İşlem Akışı (Transaction Flow) 88
4.3.7. Performans ve Kurumsal Uyum Analizi 89
4.3.8. Hyperledger Fabric'in Avantajları ve Sınırlılıkları 91

BEŞİNCİ BÖLÜM

İLAÇ TEDARİK ZİNCİRİNDE BLOK ZİNCİR UYGULAMALARI VE TÜRKİYE İÇİN HYPERLEDGER FABRİC TABANLI BİR YAKLAŞIM ÖNERİSİ

5.1. Hyperledger Fabric'in İlaç Tedarik Zincirinde Kullanım Potansiyeli 95
5.2. İlaç Tedarik Zincirinde Blok Zincir Temelli Küresel Uygulama Örnekleri 96
5.2.1. İlk Dönem Uygulamalar (2016–2021) 97
5.2.2. Genişleyen Projeler ve Yeni Başlatılan Uygulamalar (2022–2025) 109
5.2.3. Küresel Uygulama Örneklerinin Toplu Değerlendirmesi 112
5.3. Türkiye'deki İlaç Takip Sistemi (İTS) ile Blok Zincir Tabanlı Yapıların Karşılaştırılması ve Uygulama Gerekliliği 115

5.3.1. Türkiye'de İlaç Takip Sistemi: Genel Yapı ve İşleyiş 115
5.3.2. İTS'nin Sınırlılıkları ve Güncel Dijital Riskler 118
5.3.3. Blok Zincir ile Yapısal Yeniden Tasarım: Hyperledger Fabric Perspektifi . 121
5.3.4. Türkiye İçin Hyperledger Fabric Tabanlı Modelin Uygulanabilirliği ve Stratejik Gerekçeler 122
5.3.5. İTS ve Hyperledger Fabric Sisteminin Karşılaştırmalı Analizi 124

ALTINCI BÖLÜM
BLOK ZİNCİR TABANLI TEDARİK ZİNCİRİ UYGULAMALARINA YÖNELİK LİTERATÜR ANALİZİ

6.1. Literatürün Derlenme Süreci ve Kapsamı 128
6.2. İlaç Tedarik Zincirine Yönelik Yapılan Çalışmalar 129
6.3. Diğer Sektörlere Yönelik Yapılan Çalışmalar 140
6.4. Literatürde Sektörler Arası Karşılaştırmalı Değerlendirme 152

YEDİNCİ BÖLÜM
HYPERLEDGER FABRIC TABANLI BİR BLOK ZİNCİR MODELİ: SOĞUK ZİNCİR KIRILMASI SENARYOSUNA DAYALI UYGULAMA ÖRNEĞİ

7.1. Uygulama Senaryosunun Tanımı ve Gerekçesi 158
7.2. Hyperledger Fabric Mimarisine Dayalı Sistem Tasarımı 159
7.2.1. Ağ Mimarisi ve Organizasyonlar 159
7.2.2. Kanal Yapısı ve Veri Paylaşımı 160
7.2.3. Chaincode Yapısı 161
7.2.4. Kimlik ve Yetki Yönetimi 163
7.3. Teknik Kurulum ve Yapılandırma Süreci 164
7.3.1. Geliştirme Ortamı ve Sistem Gereksinimleri 164
7.3.2. Ağ Kurulumu ve Blok Zincir Yapılandırması 165
7.3.3. Kanal Yapılandırması ve Chaincode Dağıtımı 168
7.3.3.1. Kanal Tanımları ve İşlevleri 168
7.3.3.2. Kanal Oluşturma Süreci 168
7.3.3.3. Chaincode Yapısı ve Fonksiyonel Tasarım 169
7.3.3.4. Chaincode Dağıtımı ve Onay Süreci 170
7.3.3.5. Chaincode Test Ortamında Doğrulama 171

7.3.4. Uygulama Arayüzü ve Gateway Katmanı 172
7.3.5. Uçtan Uca İşlem Akışı ve Senaryo Uygulaması 174
7.3.5.1. Senaryo Kurgusu ve İşlem Adımlarıyla Süreç İlerlemesi 175
7.3.5.2. Teknik Doğrulama ve Sistem Çıktıları 182
7.4. Modelin Uygulanabilirliği ve Stratejik Katkılar 202
7.4.1. Teknik Düzeyde Sağlanan Katkılar 203
7.4.2. İTS ile Kavramsal ve Uygulamalı Farklılıklar 204
7.4.3. Kurumsal ve Yönetişimsel Katkılar 206
7.4.4. Sınırlılıklar ve Geliştirilebilir Alanlar 207
SONUÇ VE DEĞERLENDİRME 210
KAYNAKÇA 214
TEZ İNTİHAL RAPORU 245
ÖZGEÇMİŞ 248

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Kısaltmalar

AI	: Artificial Intelligence (Yapay Zekâ)
API	: Application Programming Interface (Uygulama Programlama Arayüzü)
AR	: Augmented Reality (Artırılmış Gerçeklik)
VR	: Virtual Reality (Sanal Gerçeklik)
CA	: Certificate Authority (Sertifika Otoritesi)
CPS	: Cyber-Physical Systems (Siber-Fiziksel Sistemler)
CRM	: Customer Relationship Management (Müşteri İlişkileri Yönetimi)
CCC	: Cross Chain Communication (Zincirler Arası İletişim)
DID	: Decentralized Identifier (Merkeziyetsiz Tanımlayıcı)
DLT	: Distributed Ledger Technology (Dağıtık Defter Teknolojisi)
DSCSA	: Drug Supply Chain Security Act (İlaç Tedarik Zinciri Güvenlik Yasası – ABD)
EMA	: European Medicines Agency (Avrupa İlaç Ajansı)
EOL	: End-of-Life (Kullanım Ömrü Sonu)
ERP	: Enterprise Resource Planning (Kurumsal Kaynak Planlaması)
EVM	: Ethereum Virtual Machine (Ethereum Sanal Makinesi)
FDA	: Food and Drug Administration (Amerikan Gıda ve İlaç Dairesi)
FMD	: Falsified Medicines Directive (Sahte İlaçlarla Mücadele Yönergesi – AB)
GDP	: Good Distribution Practices (İyi Dağıtım Uygulamaları)
GMP	: Good Manufacturing Practices (İyi Üretim Uygulamaları)
GTIN	: Global Trade Item Number (Küresel Ticari Ürün Numarası)
HKIMR	: Hong Kong Institute for Monetary and Financial Research (Hong Kong Parasal ve Finansal Araştırmalar Enstitüsü)

ILP	: Interledger Protocol (Zinciler Arası Protokol)
IMI	: Internal Market Information System (AB İç Pazar Bilgi Sistemi)
İTS	: İlaç Takip Sistemi
İTZ	: İlaç Tedarik Zinciri
JSON	: JavaScript Object Notation (JavaScript Nesne Gösterimi)
KYC	: Know Your Customer (Müşterini Tanı)
MSP	: Membership Service Provider (Üyelik Hizmeti Sağlayıcı)
PBFT	: Practical Byzantine Fault Tolerance (Pratik Bizans Hata Toleransı)
PoS	: Proof of Stake (Hisse Kanıtı)
PoW	: Proof of Work (İş Kanıtı)
RAFT	: Reliable, Replicated and Fault-Tolerant (Güvenilir, Kopyalanabilir ve Hata Toleranslı – Konsensüs Algoritması)
SCRM	: Supply Chain Risk Management (Tedarik Zinciri Risk Yönetimi)
SDK	: Software Development Kit (Yazılım Geliştirme Kiti)
SN	: Serial Number (Seri Numarası)
TLS	: Transport Layer Security (Taşıma Katmanı Güvenliği)
TİTCK	: Türkiye İlaç ve Tıbbi Cihaz Kurumu
TPS	: Transactions Per Second (Saniyedeki İşlem Sayısı)
UTC	: Coordinated Universal Time (Eşgüdümlü Evrensel Zaman)
VM	: Virtual Machine (Sanal Makine)
WHO	: World Health Organization (Dünya Sağlık Örgütü)
YAC	: Yet Another Consensus (Alternatif Konsensüs Algoritması)
ZKP	: Zero-Knowledge Proof (Sıfır Bilgili İspat)

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Tedarik zinciri yönetiminde kırılganlık, dirençlilik ve dayanıklılık kavramlarının karşılaştırılması 33
Tablo 3.1. Blok zincir teknolojisinin kavramsal gelişimi ve sektörel uygulamalara evrimi 38
Tablo 3.2. Blok zincir teknolojisinin temel kavramları ve sistem içindeki işlevleri 50
Tablo 3.3. Blok zincir teknolojisinin temel özellikleri ve sağladığı sistemsel avantajlar 60
Tablo 3.4. Blok zincir ile farklı teknolojilerin entegrayon alanları ve sağladığı avantajlar 64
Tablo 3.5. Küresel tedarik zinciri uygulamalarında blok zincir projeleri ve sektörel etkileri 66
Tablo 4.1. Hyperledger projeleri: teknik özellikleri ve uygulama alanları 75
Tablo 4.2. Blok zincir platformlarının teknik ve yönetsel kriterler açısından karşılaştırması 79
Tablo 4.3. Hyperledger fabric'in kurumsal uyum boyutunda sağladığı özellikler ... 91
Tablo 4.4. Hyperledger fabric'in kurumsal avantajları ve sınırlılıkları 93
Tablo 5.1. Hyperledger fabric'in ilaç tedarik zincirine katkı sağladığı fonksiyonel alanlar 96
Tablo 5.2. Blok zincir temelli ilaç tedarik zinciri uygulamaları: küresel proje örnekleri 98
Tablo 5.3. 2022-2025 dönemi genişletilmiş veya yeni başlatılan blok zincir projeleri 111
Tablo 5.4. İTS sisteminde tedarik zinciri aktörleri tarafından gerçekleştirilen veri giriş süreçleri 116
Tablo 5.5. İTS sorgulama ekranında sunulan ve sunulmayan bilgi türleri 117
Tablo 5.6. İTS ve hyperledger fabric tabanlı sistemlerin karşılaştırması 125
Tablo 6.1. İlaç tedarik zincirinde öne çıkan blok zincir çalışmaları 131
Tablo 6.2. Diğer sektörlerde öne çıkan blok zincir çalışmaları 142
Tablo 6.3. Blok zincir tabanlı sistemlerde kullanılan teknoloji ve katmanlar 154
Tablo 7.1. Organizasyon bazında yetkili işlem alanları 164
Tablo 7.2. Kurulumda kullanılan sistem bileşenleri ve açıklamaları 165
Tablo 7.3. Chaincode fonksiyonları ve görevleri 170

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Blok zincir yapısı 42
Şekil 3.2. Merkle ağacı yapısı. 51
Şekil 3.3. Merkezi, merkezi olmayan ve dağıtık ağ yapılarının karşılaştırılması 58
Şekil 5.1. İTS üzerinden ilaç sorgulama portalı (its.gov.tr /its/ilac_sorgula) 117
Şekil 5.2. İTS'nin blok zincir ile yeniden yapılandırılması 126
Şekil 7.1. Hyperledger fabric tabanlı ilaç tedarik zinciri ağ mimarisi..... 167
Şekil 7.2. Ürün kaydı ve parti oluşturma süreci 175
Şekil 7.3. IoT sensör verisi ve soğuk zincir ihlali kaydı 177
Şekil 7.4. Eczane teslim kontrolü 179
Şekil 7.5. Genel senaryo özeti 181
Şekil 7.6. Üretici kimliğiyle sisteme giriş ve yetkilendirme token'ının oluşumu 183
Şekil 7.7. Üretici rolüyle yeni bir ilacın blok zincir ağına kayıt süreci..... 184
Şekil 7.8. Üretici tarafından yeni bir parti bilgisinin sisteme kaydedilmesi 185
Şekil 7.9. İlaç partisine ait taşıma koşullarının tanımlandığı sevkiyat oluşturma işlemi 187
Şekil 7.10. IoT tabanlı sıcaklık sensörünün blok zincir tabanlı sevkiyat sürecine entegrasyonu..... 188
Şekil 7.11. IoT sensöründen alınan sıcaklık verisinin sisteme eklenmesi ve blok zincir üzerinde kaydedilmesi..... 189
Şekil 7.12. Sıcaklık ihlali olaylarının blok zincir üzerinden sorgulanması ve ilgili sensör kayıtlarının listelenmesi 190
Şekil 7.13. Sıcaklık ihlali nedeniyle eczane tarafından sevkiyatın reddedilmesi ve blok zincir üzerindeki güncelleme 192
Şekil 7.14. Hyperledger fabric ağında world state verilerine erişim için couchdb arayüzü giriş sayfası..... 193
Şekil 7.15. Blok zincire kayıtlı ürün verisinin couchdb world state üzerindeki json temsili 194
Şekil 7.16. Eczane tarafından gerçekleştirilen sevkiyat reddinin couchdb world state üzerindeki kalıcı kaydı 195
Şekil 7.17. Hyperledger explorer arayüzüne external ıp üzerinden erişim ve yetkili giriş ekranı..... 197

Şekil 7.18. Hyperledger explorer üzerinden ağa ait blok, işlem, düğüm ve zincir kodu bilgilerinin görselleştirildiği genel durum paneli 198
Şekil 7.19. Hyperledger explorer üzerinden erişilen 55 numaralı blok içeriği ve kriptografik özellikleri..... 199
Şekil 7.20. Hyperledger explorer üzerinden parti oluşturma işlemine ait blok zinciri kayıtlarının detaylı görünümü 200
Şekil 7.21. Hyperledger explorer üzerinden eczane tarafından gerçekleştirilen ürün reddine ait blok zinciri kaydının görselleştirilmesi 201

GİRİŞ

Dijitalleşme, küresel ekonomi ve kamu yönetiminde köklü dönüşümler yaratmakta; süreçlerin veriye dayalı, şeffaf ve denetlenebilir biçimde yeniden tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır. Özellikle çok aktörlü ve güven temelli işleyen tedarik zinciri yapılarında, geleneksel sistemlerin sınırlılıkları belirginleşmiş; bu sorunları aşmak için geliştirilen teknolojiler stratejik bir dönüşüm aracı hâline gelmiştir. Bu dönüşümün merkezinde yer alan blok zincir teknolojisi, merkezi sistemlerdeki bilgi asimetrisi, veri manipülasyonu ve denetim eksikliği gibi sorunlara karşı güvenli ve alternatif bir sistem mimarisi sunmaktadır.

Tedarik zinciri yönetimi, geleneksel olarak fiziksel mal hareketlerinin optimizasyonu olarak görülse de günümüz koşullarında bu süreç dijital izlenebilirlik, çeviklik, sürdürülebilirlik ve yönetişim başlıklarını da kapsayan bir yapıya dönüşmüştür. Tedarik zincirinde yer alan her aktörün yalnızca kendi işlemlerini değil, zincirin tamamındaki süreçleri şeffaf bir şekilde izleyebilmesi ve sorumluluğunu dijital olarak kanıtlayabilmesi gerekmektedir. Bu durum, özellikle kamu sağlığıyla doğrudan ilişkili olan ilaç tedarik zinciri gibi hassas alanlarda daha da büyük önem taşımaktadır. Ürünlerin yalnızca zamanında ve doğru yere teslim edilmesi değil, aynı zamanda uygun koşullarda saklanıp taşındığının da kayıt altına alınması zorunlu hale gelmiştir.

İlaç sektöründe, tedarik zinciri süreçleri yalnızca lojistik faaliyetlerden ibaret değildir; aynı zamanda ürün güvenliğini sağlamak, sahtecilikle mücadele etmek ve hasta sağlığını korumak gibi yüksek sorumluluklar içermektedir. Bu nedenle izlenebilirlik sistemlerinin yalnızca ürün hareketini değil; aynı zamanda bu hareket sırasında yaşanan çevresel değişimleri, aktör bazlı müdahaleleri ve yönetsel süreçleri de kapsaması gerekmektedir. Özellikle soğuk zincir olarak adlandırılan, sıcaklık kontrollü ürünlerin taşınması süreci, taşıma koşullarındaki en küçük bir sapmanın bile ürünün etkisini kaybetmesine neden olabileceği son derece kritik bir alandır. Aşılar, insülinler, biyoteknolojik ürünler gibi

sağlık açısından hayati öneme sahip ilaçlar, üretimden hastaya ulaşana dek sürekli olarak belirli sıcaklık aralığında korunmak zorundadır.

Türkiye'de bu süreci dijital olarak yöneten en önemli sistem, Sağlık Bakanlığı tarafından geliştirilen İlaç Takip Sistemi (İTS)'dir. İTS, ürünlerin üretimden itibaren barkodlama yöntemiyle izlenmesini sağlayarak sahte ilaçla mücadelede önemli bir dijital dönüşüm adımı olmuştur. Ancak İTS'nin yapısal olarak merkezi bir mimariye dayanıyor oluşu, sistemin belirli konularda yetersiz kalmasına yol açabilmektedir. Bunların başında, taşıma koşullarına dair niteliksel verilerin sistemsel olarak işlenememesi gelmektedir. Örneğin, ürünler fiziksel olarak soğuk zincir sürecine tabi olsa da İTS yalnızca barkod bazlı bildirimleri esas almakta; sıcaklık verileri, nem değişimi ya da çevresel ihlal kayıtlarını sistem düzeyinde işlememektedir. Bu durum, geriye dönük denetimde zincirin hangi halkasında hata oluştuğunun saptanmasını güçleştirmekte; kamusal hesap verebilirliği ve hasta güvenliğini zayıflatma olasılığı barındırmaktadır.

Blok zincir teknolojisi, bu tür merkezi yapıların eksik bıraktığı şeffaflık, güvenlik ve izlenebilirlik gereksinimlerini teknik olarak karşılayabilen bir altyapı sunmaktadır. Özellikle Hyperledger Fabric gibi kurumsal düzeyde ölçeklenebilen, izinli ve modüler yapısıyla öne çıkan platformlar, sağlık ve ilaç sektörü gibi yüksek regülasyon gerektiren alanlarda kullanım potansiyeline sahiptir. Bu teknoloji sayesinde, sistemdeki her bir işlem, zaman damgasıyla birlikte değiştirilemez şekilde bloklara yazılır ve yalnızca yetkili aktörler tarafından çağrılabilir. Böylece zincirdeki her hareket hem teknik hem yönetişimsel olarak doğrulanabilir hale gelir. İzinli yapı, her organizasyonun yalnızca kendi yetki alanında işlem gerçekleştirebilmesini sağlarken; ağ üzerindeki tüm aktörlerin aynı kayıt defterini paylaşması, bilgi bütünlüğünü ve sistem güvenini üst düzeye taşır.

Bu tez çalışmasının temel amacı, Türkiye'de halihazırda kullanılmakta olan İTS sisteminin sahip olduğu yapısal sınırlılıkları aşabilecek, dağıtık defter teknolojisi temelli bir ilaç tedarik zinciri modeli geliştirmektir. Bu model, üretici, dağıtıcı, eczane ve denetleyici kurum gibi temel aktörlerin rol bazlı biçimde sisteme entegre edildiği; her aktörün yalnızca kendi sorumluluk alanına özgü işlem gerçekleştirebildiği, sıcaklık verilerinin IoT cihazları aracılığıyla otomatik olarak zincire işlendiği bir mimariyi esas almaktadır. Geliştirilen sistem, Hyperledger Fabric platformu üzerinde kurgulanmış; REST API katmanı ve web arayüzleri ile desteklenerek kullanıma hazır hale getirilmiştir.

Bu modelin en önemli yeniliği, sistemin yalnızca veri güvenliğini değil, aynı zamanda yönetişimsel sorumlulukları da teknik olarak yönetebilir hâle getirmesidir. Örneğin, ürün taşıma sürecinde sıcaklık sınırları aşıldığında, sistem otomatik olarak bir ihlal bildirimi üretmekte; bu bildirim zincire kaydedilerek hem eczanenin ürün değerlendirme kararını desteklemekte hem de denetleyici kurumun izleme kapasitesini artırmaktadır. Sistemde, denetleyici kurum yalnızca salt-okunur (read-only) yetkiyle tüm işlemleri gözlemleyebilmekte; bu sayede sistemsel manipülasyon riski en aza indirilmektedir.

Tezin yöntemsel yaklaşımı üç temel bileşenden oluşmaktadır. İlk bileşen, kavramsal ve kuramsal literatür taramasıdır. Bu kapsamda, tedarik zinciri yönetimi, ilaç lojistiği, blok zincir teknolojisi ve Hyperledger Fabric mimarisi detaylı şekilde incelenmiş; bu yapıların entegrasyon potansiyelleri değerlendirilmiştir. İkinci bileşen, mevcut sistemlerin eleştirel analizi ve karşılaştırmalı değerlendirmesidir. Bu bağlamda, Türkiye'de halihazırda kullanılan İTS yapısal, işlevsel ve teknik açıdan mercek altına alınmış; İTS'nin sınırlılıkları dağıtık defter teknolojisi ilkeleri doğrultusunda analiz edilmiştir. Ayrıca, küresel ölçekte blok zincir tabanlı izlenebilirlik sistemlerine ilişkin uygulama örnekleri incelenmiş ve bu sistemlerin Türkiye özelinde nasıl uyarlanabileceğine dair karşılaştırmalı çözümlemeler yapılmıştır. Üçüncü ve nihai bileşen ise senaryo temelli uygulama modelidir. Bu bölümde geliştirilen blok zincir tabanlı prototip sistem; Hyperledger Fabric altyapısı üzerinde yapılandırılmış, kurumsal roller çerçevesinde uçtan uca izlenebilirlik sağlayacak şekilde test edilmiş ve sistem çıktıları teknik düzeyde doğrulanmıştır.

Tez aynı zamanda literatüre çok boyutlu katkı sağlamaktadır. Öncelikle, Türkiye özelinde blok zincir teknolojisinin sağlık sektörüne entegrasyonuna dair az sayıda örnek çalışmadan biri olarak hem sektörel hem teknolojik bir boşluğu doldurmaktadır. İkinci olarak, merkezi bir sistem olan İTS'nin yapısal analizini yaparak, blok zincirin merkeziyetsiz sistem mimarileriyle nasıl örtüştüğünü ampirik bir model üzerinden göstermektedir. Üçüncü olarak, IoT entegrasyonu ve otomatik ihlal tespiti gibi yenilikçi yaklaşımlarla, sadece veri kaydı değil, veri akışının doğruluğu ve müdahale edilemezliği gibi konulara da çözüm önermektedir. Ayrıca geliştirilen sistemin teknik yeterliliği, rol bazlı erişim denetimi, kimlik doğrulama süreçleri ve uçtan uca şeffaflık mekanizmaları ile desteklenmiş; akademik açıdan örnek alınabilecek bir modelleme yapısı ortaya konmuştur.

Geliştirilen model, yalnızca teknik bir uygulama olmanın ötesinde; yönetişim, veri güvenliği ve şeffaflık gibi kamu politikaları açısından da çok boyutlu bir çözüm önerisi sunmaktadır. Bu yönüyle model, merkezi sistemlerin yapısal sınırlılıklarını aşarak, kamusal hizmetlerin dijitalleşmesinde blok zincir teknolojisinin uygulanabilirliğini somut biçimde ortaya koymaktadır. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde, söz konusu sistemin kuramsal temelleri, teknik bileşenleri ve uygulama çıktıları bütüncül biçimde ele alınmaktadır.

BİRİNCİ BÖLÜM

TEDARİK ZİNCİRİNİN KAVRAMSAL VE DÖNÜŞÜMSEL TEMELLERİ

Bu bölümde, tedarik zincirinin temel kavramları, yapısal özellikleri ve süreçleri kapsamlı biçimde ele alınmakta; dijitalleşme ile dönüşen tedarik zinciri anlayışı kuramsal bir perspektifle analiz edilmektedir. Tedarik zinciri yönetiminin evrimi, temel bileşenleri, rekabet avantajı yaratmadaki stratejik rolü ve dijital teknolojilerle olan etkileşimi açıklanarak, takip eden bölümlerde detaylandırılacak olan blok zincir temelli uygulamalara teorik bir zemin oluşturulmaktadır. Bu çerçevede, önce klasik tedarik zinciri yapısı ve süreçleri incelenecek; ardından dijitalleşmenin etkisiyle ortaya çıkan yeni nesil tedarik zinciri dinamikleri değerlendirilecektir.

1.1. Tedarik Zincirinin Temel Kavramsal Yapısı

Tedarik zinciri, günümüz işletmeciliğinde yalnızca operasyonel bir araç değil; rekabet gücünü belirleyen, stratejik bir işlev haline gelmiştir. Geleneksel anlamda tedarik zinciri, hammadde tedarikinden nihai ürünün müşteriye ulaşmasına kadar olan süreci ifade ederken; bu yapı artık çok daha karmaşık, çok aktörlü ve dijitalleşmiş bir hâl almıştır (Oğuz ve Perçin, 2022). Modern tedarik zinciri sadece fiziksel malzeme akışını değil, aynı zamanda bilgi, finansal kaynak ve müşteri değerinin koordinasyonunu da içeren bütünleşik bir sistem olarak tanımlanmaktadır (Chopra ve Meindl, 2019).

En yalın hâliyle tedarik zinciri; hammadde sağlayıcısından başlayarak üretici, distribütör, perakendeci ve nihai tüketiciye kadar uzanan, bu aktörler arasında ürün, hizmet ve bilgi akışını yöneten bir ağ yapısıdır. Bu yaklaşım, tedarik zincirini yalnızca lojistik bir altyapı olarak değil, aynı zamanda değer üretimi ve rekabet üstünlüğü yaratımı açısından kritik bir sistem olarak ele alır. Zira her aşama, maliyet, kalite, hız ve müşteri deneyimi üzerinde doğrudan etki sahibidir (Erdal, 2018).

Tedarik zinciri yönetimi (TZY), ise sistemin yalnızca yönetimini değil; planlama, yürütme, kontrol ve sürekli iyileştirme süreçlerini de kapsamaktadır. Bu kapsam, kaynakların yönetimiyle sınırlı kalmayıp; aktörler arası iş birliği, entegrasyon, risk yönetimi ve performans ölçümünün yönetimini de içermektedir (Min vd., 2019).

Aşağıda yer alan kavramlar, TZY'nin temel yapı taşlarını oluşturmaktadır:

- Malzeme Akışı: Hammadde, yarı mamul ve nihai ürünlerin fiziksel hareketini ifade eder.
- Bilgi Akışı: Talep, sipariş, stok gibi operasyonel bilgilerin sistemde paylaşımıdır.
- Finansal Akış: Ödeme süreçleri, fiyatlandırma ve maliyet yönetimi dahil tüm finans hareketlerini kapsar.
- Değer Zinciri Perspektifi: Tedarik zinciri yalnızca maliyet değil, aynı zamanda müşteri odaklı değer yaratma süreci olarak görülmelidir.
- Entegrasyon: Tedarikçi, üretici, lojistik sağlayıcı ve müşteri arasındaki süreçlerin uyumlu çalışmasıdır.

Bu temel yapı taşlarının etkin yönetimi, günümüz rekabet koşullarında yalnızca büyük üretim firmaları için değil; küçük ve orta ölçekli işletmeler (KOBİ), kamu kurumları ve hizmet sektörü için de kritik bir hâle gelmiş, rekabetçi kalabilmenin zorunlu bir parçasına dönüşmüştür. Çünkü artık rekabet firmalar arasında değil, tedarik zincirleri arasında gerçekleşmektedir. Bu bağlamda başarılı bir tedarik zinciri; maliyet avantajı sağlamanın yanında hız, kalite, esneklik, müşteri memnuniyeti ve sürdürülebilirlik gibi stratejik hedefleri gerçekleştirebilen, bütünleşik ve etkin yönetilen bir sistem olarak değerlendirilmelidir. (LeMay vd., 2017).

1.2. Tedarik Zinciri Yönetiminin Dönüşüm Süreci

TZY kavramı, özellikle son yıllarda hem akademik literatürde hem de uygulama alanında stratejik önem kazanmış; birçok araştırmacı, akademisyen ve üst düzey yönetici tarafından detaylı biçimde ele alınmıştır.

TZY, başlangıçta yalnızca tedarikçiler ile müşteriler arasındaki malzeme akışlarının planlanması ve kontrolü olarak tanımlanmış; bu yönüyle daha çok lojistik fonksiyonlarıyla ilişkilendirilmiştir (Ellram, 1991). Ancak zaman içinde bu yaklaşım, daha bütüncül ve stratejik bir anlayışa evrilmiştir. Nitekim Christopher'a (2005) göre

TZY, en az maliyetle en yüksek müşteri değerine ulaşmayı hedefleyen, tedarikçi-müşteri arasındaki tüm üst akış ve alt akış ilişkilerinin yönetimini kapsayan bir sistemdir.

Literatürde TZY'ye dair farklı yorumlar bulunmaktadır. Bazı yazarlar kavramı, tedarikçi ağı yönetimi veya gelişmiş satın alma fonksiyonu olarak değerlendirirken (Lamming, 1996); bazıları entegre lojistik yönetimi yaklaşımıyla ele alarak zincir genelinde stok minimizasyonuna odaklanmıştır (van Hoek, 1998; Naylor vd., 1999).

Ancak günümüzde yaygın görüş, TZY'nin lojistik kavramının ötesine geçtiği ve stratejik bir dönüşüm süreci içerdiği yönündedir. TZY bilgi sistemlerinin entegrasyonu, planlama ve kontrol mekanizmalarının koordinasyonu gibi, geleneksel lojistik kapsamında açıkça yer almayan birçok işlevi içeren çok boyutlu bir yönetim anlayışına dönüşmüştür (Lummus vd., 2001). Bu bağlamda TZY hem lojistik hem de satın alma perspektiflerini bir araya getiren ve işletmelerin tüm operasyonel süreçlerinde değer üretmeyi hedefleyen bir yönetim felsefesi hâlini almıştır.

Mentzer vd. (2001), TZY'nin bu dönüşümünü üç temel özellik üzerinden açıklamaktadır:

1. Tedarik zincirini uçtan uca bütün olarak ele alan sistem yaklaşımı,
2. Şirket içi ve şirketler arası yetenekleri birleştiren iş birliği temelli stratejik yönelim,
3. Zincirin her aşamasında kişiselleştirilmiş ve yüksek değer sunmaya odaklanan müşteri merkezli yapı.

Bu özellikleriyle TZY, günümüz rekabet ortamında işletmelerin yalnızca kendi performanslarını değil; tedarikçileri ve müşterileriyle birlikte oluşturdukları tüm sistemin verimliliğini, esnekliğini ve müşteri değerini maksimize etmeyi hedefleyen dönüştürücü bir yönetim pratiği hâline gelmiştir.

1.3. Tedarik Zincirinin Yapısal Özellikleri

Tedarik zinciri, bir ürün veya hizmetin nihai müşteriye ulaşmasını sağlayan tüm adımları ve bu adımlarda yer alan organizasyonları içeren karmaşık bir yapıdır. Genel olarak bu yapı; hammadde tedarikçileri, üreticiler, distribütörler, perakendeciler ve müşteriler arasında kurulan, değer yaratan süreç ve faaliyetlerle birbirine bağlanmış bir organizasyon ağı şeklinde tanımlanır (Christopher, 2016; Mentzer vd., 2001).

Bu ağ içerisinde malzeme ve ürünler genellikle yukarı akıştan aşağı akışa doğru hareket ederken; bilgi ve geri bildirim akışları her iki yönde de gerçekleşmekte, finansal akışlar

ise genellikle son müşteriden tedarikçilere doğru ilerlemektedir (Chopra ve Meindl, 2016). Dolayısıyla tedarik zinciri, tek bir işletmenin kontrolünde olmayan, birçok bağımsız paydaşın eşgüdümünü gerektiren dinamik bir sistem olarak yapılandırılır.

Tedarik zincirlerinin yapısal özellikleri genellikle iki temel boyut üzerinden incelenir: zincirin uzunluğu ve zincirin genişliği.

- Zincirin uzunluğu, hammadde kaynağından son kullanıcıya kadar olan süreçte kaç ara kademe bulunduğunu, yani tedarik zincirinin kaç aşamadan oluştuğunu ifade eder.
- Zincirin genişliği ise her bir aşamada yer alan aktör sayısını, yani aynı seviyede birden fazla tedarikçi veya dağıtıcı bulunup bulunmadığını belirtir.

Örneğin bir üreticinin birden fazla tedarikçiye sahip olması veya birden fazla dağıtım kanalı kullanması, zincirin yatay genişliğini artıran faktörlerdir. Bu iki boyut birlikte ele alındığında, tedarik zincirinin dikeyde (uzunluk) ve yatayda (genişlik) olmak üzere çok boyutlu bir ağ yapısı sergilediği görülür (Lambert ve Cooper, 2000).

Bununla birlikte, tedarik zincirleri çoğu zaman lineer yapılar değil; dallanmış, çok merkezli ve esnek ağlar olarak şekillenmektedir. Örneğin bir tedarikçi birden fazla üreticiye hizmet verebilir veya bir distribütör farklı bölgelerdeki perakendecilere aynı anda ürün sağlayabilir. Bu durum, geleneksel "zincir" anlayışının yerine "tedarik ağı" kavramının kullanılmasını gündeme getirmiştir.

Modern literatür, tedarik zincirlerini zaman içinde değişebilen, birbirine bağlanmış alt ağlardan oluşan esnek yapılar olarak değerlendirmektedir (Jodlbauer vd., 2023). Zincir boyunca yer alan her bir seviyenin karmaşıklığı arttıkça, yönetim zorlukları, koordinasyon ihtiyacı ve karar alma süreçlerindeki belirsizlikler de artmaktadır (Bozarth vd., 2009).

Öte yandan tedarik zincirindeki aktörlerin zincir içindeki konumları da yapının özelliklerini doğrudan etkiler. Bir firmanın tedarik zincirinin başına (örneğin hammadde sağlayıcı) veya sonuna (örneğin perakendeci) yakın olması, bilgi, risk ve değer transferi açısından farklı sorumluluklar ve avantajlar doğurur.

Yapının karmaşıklığı yalnızca seviye sayısı ile değil, aynı zamanda etkileşim düzeyi ile de tanımlanır. Bazı aktörler, birçok farklı zincirin parçası olarak birden fazla yönlü bağlantı kurar ve bu da bilgi, malzeme ve finans akışının izlenmesini ve yönetimini daha zor hâle getirir (Pennekamp vd., 2023). Örneğin bir global tedarikçi, farklı üreticilerle

aynı anda çalışabilir ve bu üreticilerin tümü farklı pazarlar için farklı zincirler oluşturabilir. Nitekim modern tedarik zinciri anlayışında, işletmeler yalnızca kendi iç süreçlerini değil; tüm ağın işleyişini, görünürlüğünü ve entegrasyon düzeyini dikkate almak zorundadır. Çünkü zincirin bir halkasında yaşanan kopukluk, tüm sistemin performansını olumsuz etkileyebilir.

Tedarik zincirinin yapısal özelliklerini tanımlarken yalnızca seviye sayısı ve akış yönleri değil, bu zinciri oluşturan temel aktörlerin işlevsel rolleri de dikkate alınmalıdır. Zincirin genel yapısı; tedarikçiler, üreticiler, lojistik sağlayıcılar, dağıtımcılar, perakendeciler ve müşteriler gibi aktörlerin yer aldığı çok aktörlü bir sistemden oluşur.

Her bir aktör, zincirin belirli bir aşamasında farklı işlevleri yerine getirir. Örneğin tedarikçiler girdileri sağlar, üreticiler bunları işleyerek nihai ürüne dönüştürür, lojistik firmaları ürünlerin fiziksel hareketini yönetir ve perakendeciler müşteriyle doğrudan etkileşim kurarak satış sonrası hizmetleri üstlenir. Nihai tüketiciler ise yalnızca ürünün son alıcısı değil; geri bildirim, sadakat ve talep yönlendirme gibi etkileriyle zincirin dinamiğini belirleyen stratejik bir paydaştır.

Tedarik zinciri performansı, yalnızca bu aktörlerin işlevleriyle değil, aralarındaki ilişkilerin yapılandırılma biçimiyle de doğrudan ilişkilidir. Bu ilişkiler; komuta temelli, sözleşmeye dayalı veya karşılıklı fayda esaslı iş birlikleri biçiminde gelişebilir. Etkili bir iş birliği yapısı; tedarik güvenliği, teslimat hızı, maliyet düşüşü ve müşteri memnuniyeti gibi sonuçlara olumlu katkı sağlar. Aksi durumda, bilgi paylaşımındaki eksiklikler veya güven sorunları zincirin tüm işleyişini sekteye uğratabilir.

Genel olarak, tedarik zinciri sadece fiziksel mal akışını yöneten bir yapı değil; içinde farklı rolleri olan çok sayıda aktörün koordinasyon, bilgi alışverişi ve değer üretimi üzerinden bir araya geldiği dinamik bir ağ sistemidir. Zincirin yapısal özelliklerini ve aktörlerini doğru tanımlamak hem operasyonel hem stratejik düzeyde etkin bir tedarik zinciri yönetimi için ön koşuldur (Kim vd., 2010).

1.4. Tedarik Zinciri Süreçleri

Tedarik zinciri yönetiminin başarısı, zinciri oluşturan temel süreçlerin etkin, entegre ve sürdürülebilir şekilde yönetilmesine bağlıdır. Bu süreçlerin çerçevesini tanımlamada en yaygın kullanılan model, Tedarik Zinciri Operasyonları Referans Modeli (SCOR- Supply Chain Operations Reference) olarak bilinmektedir. SCOR modeline göre tedarik zinciri

beş ana işlevsel sürece dayanır: Planla, Tedarik Et, Üret, Teslim Et ve İade Et (Zhang vd., 2021).

Planlama Süreci: Talep tahmini, üretim planlaması, kapasite dengesi ve stok seviyelerinin belirlenmesi gibi faaliyetleri içerir. Planlama, tüm zincirin stratejik yönünü belirleyen ön adımdır. Huan vd. (2004), doğru planlamanın zincirin diğer aşamalarında verimlilik ve hız kazandırdığını vurgulamaktadır.

Tedarik Süreci: Üretim için gereken hammadde, bileşen veya hizmetlerin uygun tedarikçilerden teminini ve tedarikçi ilişkilerinin yönetimini kapsar. APICS (2017) tarafından tanımlandığı üzere, bu süreç zincirin devamlılığı açısından kritik bir halkadır.

Üretim Süreci: Girdilerin nihai ürüne dönüştürülmesini ifade eder. Bu süreçte üretim planlama, montaj, kalite kontrol ve paketleme yer alır. Verimli üretim yapısı, zincirin maliyet yapısını ve pazara yanıt süresini doğrudan etkiler (Stephens, 2001).

Teslimat Süreci: Depolama, sipariş yönetimi, nakliye ve dağıtım faaliyetlerini içerir. SCOR modelinde "deliver" olarak adlandırılan bu süreç, müşteri memnuniyetini belirleyen temel performans alanıdır.

İade Süreci (Tersine Lojistik): Hatalı, fazla ya da müşteri şikâyetine bağlı olarak iade edilen ürünlerin geri toplanması, değerlendirilmesi ve yeniden kazandırılması sürecidir. Huan vd. (2004), bu sürecin sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sunduğunu ve operasyonel verimliliği desteklediğini belirtmiştir.

1.5. Modern Tedarik Zinciri Yönetiminin Önemi

Günümüz iş dünyasında TZY, sadece lojistik faaliyetlerin koordinasyonundan ibaret bir operasyonel alan olmaktan çıkmış; işletmelerin stratejik yönetişim süreçlerinin merkezinde konumlanan bütünsel bir yapı hâline gelmiştir (Handfield ve Linton, 2017). Artan küresel rekabet, talep belirsizlikleri, jeopolitik riskler ve teknolojik dönüşüm, şirketleri yalnızca ürün üretmeye değil, bu ürünleri doğru zamanda, doğru yerde ve doğru değerle müşteriye sunmaya odaklanan entegre sistemler kurmaya yöneltmiştir. Bu bağlamda TZY, şirketlerin rekabet avantajı oluşturma, krizlere karşı dayanıklılık sağlama ve müşteri memnuniyetini maksimize etme gibi çok boyutlu hedeflerine hizmet eden stratejik bir araç hâline gelmiştir.

Rekabet avantajı, tedarik zincirlerinin sunduğu operasyonel verimlilik ve stratejik esneklik sayesinde sürdürülebilir hâle gelmektedir. Klasik strateji literatüründe rekabet

avantajı maliyet liderliği ve farklılaşma stratejilerine dayandırılırken (Porter, 1985), çağdaş yaklaşımlar bu avantajın büyük ölçüde tedarik zinciri düzeyinde gerçekleştiğini savunmaktadır. Etkin bir tedarik zinciri, hem üretim maliyetlerini minimize ederek fiyat rekabetine katkı sağlar hem de müşteriye özel çözümler sunarak farklılaşma yaratır (Tukamuhabwa vd., 2021). Literatürde TZY'nin amaçlarından biri olarak, zincir genelindeki bilgi ve malzeme akışlarını entegre ederek rakiplere kıyasla üstün bir değer sistemi oluşturmak vurgulanmaktadır (Menesha ve Mwanaumo, 2023).

Ancak bu rekabet avantajı, yalnızca maliyet ve hızla değil; aynı zamanda esneklik ve dayanıklılıkla da mümkündür. Son yıllarda yaşanan küresel krizler (COVID-19 pandemisi, Rusya-Ukrayna savaşı ve küresel enerji krizleri) tedarik zincirlerinin kesintilere karşı ne derece kırılgan olduğunu ortaya koymuştur. Bu süreçler, tedarik zinciri esnekliğini ve dayanıklılığını işletmelerin hayatta kalma kriterlerinden biri hâline getirmiştir. Esnek bir zincir, talep dalgalanmalarına hızlı tepki verebilirken; dayanıklı bir yapı, beklenmedik şoklara karşı adaptif kapasitesi yüksek olan sistemleri temsil etmektedir (Paul ve Saha, 2025). İşletmelerin "yalın ama kırılgan" zincirler yerine "esnek ve sağlam" yapılar oluşturma çabaları, günümüzde tedarik zincirlerinin stratejik dönüşümünü zorunlu kılmıştır (Francis vd., 2021).

Bu dönüşümün bir diğer önemli boyutu, sürdürülebilirlik ve etik değerler olmuştur. Çevresel krizler, artan toplumsal duyarlılık ve yasal düzenlemeler, işletmeleri yalnızca ekonomik değil, aynı zamanda sosyal ve çevresel sorumluluk taşımaya zorlamaktadır. Sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi; karbon ayak izinin azaltılması, atık yönetimi, enerji verimliliği, geri dönüşüm ve tedarikçilerin sosyal uygunluk denetimleri gibi kapsamlı uygulamaları içermektedir (Esan vd., 2024). Tedarik zincirinde sürdürülebilirlik yalnızca kurumsal sosyal sorumluluk değil; aynı zamanda uzun vadeli risk yönetimi, marka itibarı ve yatırımcı güveni açısından da belirleyici hâle gelmiştir.

Tedarik zincirlerinin müşteri odaklılık ilkesiyle yeniden yapılandırılması da modern dönemin ayırt edici özelliklerinden biridir. Bugünün müşterisi yalnızca ürünü değil, ürünün hangi koşullarda üretildiğini, ne kadar sürede teslim edildiğini, sürdürülebilir olup olmadığını da dikkate almaktadır. Bu nedenle modern TZY yaklaşımları, yalnızca ürün teslimine değil; aynı zamanda müşteri deneyiminin bütünsel yönetimine odaklanmaktadır (Naqvi vd., 2020). Özellikle e-ticaret ve çok kanallı perakende sistemlerinin yükselişi, tedarik zincirlerini daha esnek, daha hızlı ve daha görünür kılmayı zorunlu kılmıştır. Hızlı

teslimat, siparişin durumunun izlenebilirliği, şeffaf fiyatlandırma ve satış sonrası destek gibi unsurlar, müşteri memnuniyetinin temel belirleyicileri hâline gelmiştir (Hendijani ve Saeidi, 2020; Büyüközkan ve Çiftçi, 2012).

Bu dönüşümün sürdürülebilir olması ise sürekli iyileştirme ve yenilikçilik kavramlarına bağlıdır. Günümüzde başarılı tedarik zincirleri yalnızca iyi yapılandırılmış değil, aynı zamanda sürekli gelişmeye açık olanlardır. Yalın yönetim, toplam kalite yönetimi, benchmark uygulamaları ve dijitalleşme destekli veri analitiği, tedarik zinciri süreçlerinin verimliliğini ve çevikliğini artırmakta; aynı zamanda yenilikçilik kültürünü de beslemektedir (Prakash, 2023; Huang vd., 2023). Firmalar artık teknolojiyi yalnızca bir araç değil, tüm değer zincirine entegre edilmesi gereken stratejik bir yetkinlik olarak değerlendirmektedir.

Özetle, modern tedarik zinciri yönetimi artık yalnızca malzeme akışını koordine eden operasyonel bir fonksiyon değil; rekabet avantajı, kriz dayanıklılığı, sürdürülebilirlik, müşteri deneyimi ve dijital yenilikçilik gibi çok boyutlu stratejik hedefleri destekleyen bütünsel bir yönetişim modeli hâline gelmiştir. Bu bağlamda, dijital teknolojilerle desteklenen, esnek, sürdürülebilir ve müşteri odaklı bir tedarik zinciri yapısı, günümüz işletmeleri için rekabetin anahtarı olarak öne çıkmaktadır.

1.6. Dijitalleşme ve Teknolojik Dönüşüm İhtiyacı

Küresel rekabetin keskinleştiği, müşteri beklentilerinin çeşitlendiği ve dışsal risklerin arttığı günümüz ekonomik yapısında, tedarik zincirlerinin yalnızca verimli değil; aynı zamanda çevik, görünür, iş birliğine açık ve sürdürülebilir olması beklenmektedir. Bu hedeflere ulaşmada dijitalleşme, işletmeler için yalnızca bir tercih değil, kaçınılmaz bir zorunluluk hâline gelmiştir.

Tedarik zinciri dijitalleşmesi; malzeme, bilgi ve finans akışlarının uçtan uca gerçek zamanlı izlenebilmesi, farklı aktörler arasında güvenli veri paylaşımının sağlanması ve tüm süreçlerin hızlı karar destek sistemleri ile entegre biçimde yönetilmesi anlamına gelmektedir (Aslan, 2023). Bu dijitalleşme yalnızca operasyonların bilgisayarlaştırılmasını değil, aynı zamanda yapay zekâ (AI), büyük veri, nesnelerin interneti (IoT), otomasyon ve blok zincir gibi teknolojilerin birlikte kullanıldığı akıllı ve öngörüye dayalı sistemlere dönüşümü kapsamaktadır (Toprak ve Nebati, 2024). Bu bağlamda takip eden bölümlerde, dijital tedarik zinciri kavramı ve dönüşüm ihtiyacına yön veren temel teknolojik bileşenler ayrı başlıklar altında ele alınmaktadır.

1.6.1. Dijital Tedarik Zinciri

Dijital tedarik zinciri, geleneksel zincir yapısının dijital teknolojilerle entegre edilerek yeniden yapılandırılmasıdır. Bu yapı yalnızca fiziksel ürün akışını değil; aynı zamanda bilgi, süreç ve karar destek sistemlerini de dijital ortama taşıyarak tedarik zincirini uçtan uca görünür, esnek ve öngörülebilir kılmayı amaçlar (Büyüközkan ve Göçer, 2018:164). Dar anlamda dijital tedarik zinciri, fiziksel zincirin gerçek zamanlı izlenebilirliğini sağlayan dijital bir ağ olarak tanımlanırken; geniş anlamda, bağlantılı işletmeler, cihazlar, veriler ve algoritmaların etkileşim hâlinde çalıştığı bir siber-fiziksel sistem olarak değerlendirilir. Bu perspektifte dijitalleşme, sadece bir teknoloji yatırımı değil; zincir boyunca karar alma süreçlerini dönüştüren yapısal bir değişimdir (Yıldız, 2018).

Dijital tedarik zincirlerinde bilgi akışı yalnızca tek yönlü değil; çok aktörlü ve karşılıklı etkileşime dayalı bir yapıda kurgulanır. Tedarikçiler, üreticiler, lojistik firmaları ve müşteriler gibi tüm paydaşlar arasında bulut platformlar, veri analitiği sistemleri ve mobil arayüzler aracılığıyla anlık veri paylaşımı sağlanır. Böylece talep tahmini, üretim planlaması, stok yönetimi ve teslimat kararları veriye dayalı, öngörüye açık ve koordineli şekilde gerçekleştirilebilir.

Özellikle çok kanallı perakendecilik ve e-ticaret alanlarında yapılan güncel çalışmalar, dijital tedarik zinciri uygulamalarının stok görünürlüğünü artırdığını, teslimat sürelerini kısalttığını ve operasyonel maliyetleri düşürdüğünü göstermektedir (Ishfaq vd., 2022). Ancak bu dönüşümün başarılı olabilmesi için yalnızca teknoloji değil, örgütsel, yönetsel ve operasyonel altyapının da dönüşüme açık olması gerekir.

Nitekim Deepu ve Ravi (2021), dijital tedarik zincirlerinin etkin işleyebilmesi için karar destek sistemlerinin; örgütsel (yetki ve sorumluluk dağılımı), teknolojik (altyapı ve entegrasyon kapasitesi) ve inovatif (yenilikçilik ve öğrenme kültürü) olmak üzere üç temel boyutta eş zamanlı gelişim göstermesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Sonuç olarak dijital tedarik zinciri, yalnızca üretim ve lojistik süreçlerinin otomasyonunu değil; veriye dayalı karar almayı, çok aktörlü entegrasyonu ve stratejik çevikliği mümkün kılan bir dönüşüm alanıdır. Bu dönüşümün başarısı, temel teknolojilerin entegrasyonu ile doğrudan ilişkilidir.

1.6.2. Blok Zincir Teknolojisi

Dijital tedarik zinciri dönüşümünde karşılaşılan en temel sorunlardan biri, veri bütünlüğünün korunması, çok aktörlü yapılar arasında güven inşası ve gerçek zamanlı

izlenebilirliğin sağlanmasıdır. Geleneksel merkezi veri tabanlarına dayalı sistemlerde, veriler tek bir otorite tarafından kontrol edildiği için manipülasyon riski, erişim kısıtları ve gizlilik açıkları gibi problemler sıklıkla yaşanmaktadır. Ayrıca dağıtık paydaş yapısına sahip tedarik zincirlerinde veri uyumsuzluğu, kayıt tutarsızlığı ve işlem gecikmeleri gibi operasyonel sorunlar, sistemin verimliliğini ve güvenilirliğini azaltmaktadır (Jean, 2024).

Blok zincir teknolojisi bu noktada, tedarik zincirinde oluşan verilerin dağıtık, değiştirilemez ve kriptografik olarak güvence altına alınmış bir sistem üzerinde tutulmasını mümkün kılar. Her işlem, doğrulanmış düğümler aracılığıyla onaylanmakta; bu sayede, zincirdeki kayıtların geriye dönük olarak değiştirilmesi pratikte imkânsız hâle gelmektedir (Gupta ve Sadoghi, 2021). Bu özellik, ürün sahteciliğinin önlenmesi, geri çağırma süreçlerinin izlenebilirliği ve şeffaflık gerektiren kamu-özel iş birliklerinde blok zinciri öne çıkarmaktadır.

Tedarik zinciri bağlamında blok zincirin en önemli katkılarından biri de taraflar arası güveni, merkezi bir otoriteye ihtiyaç duymadan tesis edebilmesidir. Böylece zincirde yer alan üretici, dağıtıcı, lojistik firması veya regülasyon otoritesi gibi aktörler, tek bir kaynak üzerinden işlem bilgilerine erişebilir ve kendi verilerine müdahale edilmediğinden emin olabilir. Bu durum, veri şeffaflığını artırdığı gibi, anlaşmazlıkları da minimize eder.

Özellikle ilaç, gıda, savunma ve enerji gibi yüksek regülasyonlu sektörlerde, tedarik zincirinin uçtan uca izlenebilir olması, yalnızca müşteri güveni açısından değil; aynı zamanda yasal uyumluluk, kriz yönetimi ve stratejik tedarik planlaması bakımından da hayati öneme sahiptir. Literatürde, blok zincir teknolojisinin bu alanlardaki kullanımının hem izlenebilirliği hem de kurumsal denetlenebilirliği artırdığı gösterilmiştir (Rahaman vd., 2024; Liu vd., 2021).

Bu bağlamda, bu çalışmada ele alınan dijital dönüşüm yaklaşımında, blok zincir teknolojisi yalnızca bir veri yapısı değil; aynı zamanda çok aktörlü ve yüksek güven gerektiren sistemler için güven temelli bir yönetişim aracı olarak konumlandırılmaktadır. İzinli blok zincir sistemlerinin hem özel sektör hem de kamu aktörlerinin katılımıyla yürütülen tedarik zincirlerinde veri gizliliğini ve yetki kontrolünü esnek biçimde yönetebilmesi, çalışmada tercih edilen Hyperledger Fabric platformuna metodolojik zemin sunmaktadır. Blok zincir teknolojisinin teknik altyapısı, uygulama örnekleri ve Hyperledger mimarisi, çalışmanın ilerleyen bölümlerinde ayrıntılı biçimde ele alınacaktır.

Bu bölümde amaç, söz konusu teknolojinin dijital tedarik zinciri yapılarında neden gerekli olduğunu kavramsal düzeyde temellendirmektir.

1.6.3. Yapay Zekâ ve Karar Destek Sistemleri

Yapay zekâ (AI), dijital tedarik zinciri dönüşümünde karar alma süreçlerinin otomasyonuna ve öngörüsel kapasitenin artırılmasına yönelik en stratejik teknolojilerden biri olarak öne çıkmaktadır. Özellikle makine öğrenmesi, derin öğrenme ve doğal dil işleme gibi AI alt bileşenleri; büyük veri kümelerinden anlamlı desenlerin çıkarılması, geçmiş verilere dayalı olarak gelecekteki talebin öngörülmesi ve dinamik karar destek sistemlerinin geliştirilmesi açısından tedarik zinciri yönetiminde kritik işlevler üstlenmektedir (Douaioui vd., 2024).

AI tabanlı sistemler; talep tahmini, stok optimizasyonu, tedarikçi seçimi, rota planlaması, bakım öngörüsü ve risk analizi gibi çok sayıda karar alanında kullanılmakta; böylece insan müdahalesine dayalı geleneksel karar süreçlerinin yerini, veriye dayalı ve kendini sürekli geliştiren algoritmik yapılar almaktadır (Nweje ve Taiwo, 2025 s. 235). Örneğin, geçmiş satış verileriyle eğitilmiş bir AI modeli, belirli bir ürünün farklı bölgelerdeki mevsimsel talep değişimini öngörebilir ve buna göre otomatik sipariş önerilerinde bulunabilir. Benzer şekilde, tedarik zinciri boyunca oluşan anomali verileri analiz edilerek sahtecilik, gecikme veya tedarikçi performans düşüşleri önceden tespit edilebilir.

AI uygulamaları yalnızca operasyonel kararları değil, aynı zamanda stratejik düzeydeki süreçleri de dönüştürmektedir. Örneğin, tedarik zinciri ağ yapısının yeniden tasarlanması, acil durum senaryoları altında simülasyon çalışmaları yapılması veya alternatif kaynaklara yönelme kararlarının değerlendirilmesi gibi üst düzey yönetsel faaliyetlerde de AI destekli simülasyon ve optimizasyon sistemleri kullanılmaktadır (Ahn vd., 2024).

Bu bağlamda, yapay zekâ teknolojisinin en yüksek katma değeri, diğer dijital sistemlerle olan entegrasyon düzeyine bağlıdır. Özellikle IoT sistemlerinden gelen sensör verilerinin AI algoritmalarıyla analiz edilmesi; gerçek zamanlı veri akışının, öngörüsel karar desteğine dönüştürülmesini mümkün kılar (Anozie vd., 2024). Benzer şekilde, blok zincir sistemlerine entegre edilen AI modelleri, zincir üzerindeki işlemleri sürekli izleyerek anomali tespiti, otomatik uyarı üretimi ve dinamik yetki kontrolü gibi işlevler sağlayabilir. Böylece yalnızca veriye dayalı değil, aynı zamanda güvenli, şeffaf ve sürdürülebilir bir karar altyapısı inşa edilebilir.

Bu çerçevede, yapay zekâ tabanlı sistemler; tedarik zincirinde oluşan büyük ve çok kaynaklı verilerin işlenmesini, öngörüsel analizler yoluyla operasyonel risklerin azaltılmasını ve karar alma süreçlerinin daha dinamik hâle getirilmesini sağlamaktadır. Blok zincir, IoT ve bulut sistemleriyle entegre biçimde çalışan AI uygulamaları; tedarik zincirlerinde hem güvenilir veri yönetimi hem de öğrenen algoritmalara dayalı stratejik esneklik sağlayarak dijital dönüşümün en kritik bileşenlerinden biri olarak konumlanmaktadır.

1.6.4. Nesnelerin İnterneti ve Gerçek Zamanlı İzlenebilirlik

Nesnelerin İnterneti (IoT), fiziksel nesnelerin sensörler, iletişim protokolleri ve yazılımlar aracılığıyla internete bağlanarak birbirleriyle ve merkezi sistemlerle veri alışverişinde bulunmasını sağlayan bir teknoloji altyapısıdır (Zervoudakis vd., 2022). Tedarik zinciri bağlamında IoT, üretimden dağıtıma, depolamadan perakende raflarına kadar çok sayıda fiziksel sürecin gerçek zamanlı izlenmesini ve kontrol edilmesini mümkün kılar.

IoT cihazları ve sensörleri; sıcaklık, nem, konum, sarsıntı, stok seviyesi gibi kritik bilgileri anlık olarak toplar ve bu verileri merkezi ya da bulut tabanlı platformlara iletir (Karim vd., 2024). Örneğin, bir taşıma konteynerine yerleştirilen Küresel Konumlama Sistemi (GPS) ve sıcaklık sensörleri sayesinde, sevkiyatın konumu ve taşıma koşulları eş zamanlı olarak izlenebilir. Bu sayede lojistik yöneticileri, gecikmeleri, sapmaları veya riskli ortam koşullarını önceden tespit ederek müdahalede bulunabilir.

Taj vd. (2023), Radyo Frekanslı Tanımlama (RFID) ve Yakın Alan İletişimi (Near Field Communication – NFC) gibi IoT tabanlı teknolojilerin envanter yönetiminde otomatik sayım, stok seviyesi takibi ve konum doğrulama gibi işlevlerle tedarik zincirinin operasyonel görünürlüğünü büyük ölçüde artırdığını belirtmektedir. Gerçek zamanlı veri iletimi sayesinde, ürünlerin tedarik zinciri içerisindeki konumu ve durumu hakkında anlık bilgiye ulaşmak mümkün olur; böylece gecikmeler, kalite sorunları ve kayıplar hızlı biçimde önlenebilir.

IoT'un tedarik zincirine sağladığı en temel katkı, uçtan uca görünürlük ve proaktif karar alma kapasitesidir. Örneğin, bir üretim hattındaki sensörler makine arızalarını ya da bakım ihtiyacını önceden bildirerek üretim duruşlarını minimize edebilir. Benzer şekilde, akıllı raf sistemleri perakende noktalarında ürünlerin hareketini takip ederek raf eksiklerini bildirir. Bu sayede hem tedarik hem de talep tarafında süreçler daha bütüncül şekilde yönetilir (Fernández-Caramés vd., 2019).

Wattanakul vd. (2018), özellikle ilaç, gıda ve lüks tüketim ürünleri gibi hassas tedarik zincirlerinde IoT uygulamalarının ürün orijinalliğini teyit etme, sahte ürünleri tespit etme ve kayıtlı iz takibi sağlama yönünde kritik katkılar sunduğunu vurgulamaktadır. Ayrıca IoT destekli sistemler, tedarik zincirinde meydana gelen ihlalleri veya riskli olayları gerçek zamanlı olarak loglayarak dijital denetim izi oluşturulmasını mümkün kılar.

Bu bağlamda IoT sistemleri, blok zincir gibi güvenli kayıt altyapılarıyla entegre edildiğinde; bir taraftan verilerin kesintisiz ve doğrulanabilir biçimde toplanmasını, diğer taraftan da değiştirilemez biçimde saklanmasını mümkün kılar. Özellikle soğuk zincir, klinik araştırma lojistiği veya hassas ilaç taşımacılığı gibi alanlarda, IoT ve blok zincirin birlikte kullanımı; veri güvenliği, izlenebilirlik ve denetlenebilirlik açısından yüksek katma değer yaratmaktadır.

1.6.5. Siber Güvenlik ve Veri Koruma Gerekliliği

Dijitalleşme, tedarik zincirlerinde hız, şeffaflık ve entegrasyon kapasitesini artırırken; aynı zamanda yeni nesil siber güvenlik risklerini de beraberinde getirmektedir. Her geçen gün daha fazla sürecin bulut tabanlı sistemlere, IoT cihazlarına ve dijital platformlara taşınması, saldırı yüzeyini genişletmekte ve tedarik zinciri siber güvenliğini stratejik bir öncelik hâline getirmektedir.

IBM'in 2023 tarihli raporuna göre, imalat sektörü üst üste üç yıl boyunca en fazla siber saldırıya maruz kalan sektör olmuştur (IBM Community, 2024). Tedarik zincirinde yer alan çok sayıda dijital temas noktası (örneğin sensörler, depo sistemleri, sipariş yönetim yazılımları veya tedarikçi portalları) kötü niyetli aktörler için potansiyel zafiyet alanları oluşturmaktadır.

Ghadge vd. (2020), tedarik zinciri siber güvenliğinin hâlâ gelişmekte olan bir alan olduğunu ve birçok işletmenin bu konuda henüz proaktif stratejilere sahip olmadığını vurgulamaktadır. Özellikle insan hataları, zayıf şifre kullanımı, güvenlik protokollerine uyumsuzluk gibi faktörler, teknolojik sistemlerin zaaf noktası hâline gelebilmektedir. Bu bağlamda siber güvenlik sadece teknik önlemlerle değil, aynı zamanda organizasyonel kültür, farkındalık ve politika düzeyinde de ele alınmalıdır.

Veri koruma, siber güvenlik başlığının en kritik alt bileşenlerinden biridir. Tedarik zincirlerinde işlenen veriler arasında üretim reçeteleri, müşteri bilgileri, tedarikçi fiyatları, taşıma kayıtları ve stok seviyeleri gibi stratejik önemde içerikler yer almaktadır. Bu

verilerin kötü niyetli erişime karşı korunması hem rekabet avantajı hem de regülasyon uyumu açısından zorunludur.

Radanliev vd. (2020), IoT ve bulut tabanlı sistemlerin yaygınlaştığı ortamlarda uç bilişim (edge computing) birimlerinde ortaya çıkan güvenlik zafiyetlerinin sistemin geneline yayılabileceğini ortaya koymuştur. Örneğin bir sensör ağı üzerindeki açıklık, tüm üretim planlamasının ifşasına veya sabotajına yol açabilir. Özellikle ilaç, savunma ve kritik altyapı sektörlerinde bu tür saldırılar toplumsal risklere dönüşebilir.

Bu risk sadece iç sistemlerle sınırlı değildir. Tedarik zinciri doğası gereği, tedarikçiler, taşeronlar ve üçüncü taraf yazılım sağlayıcıları gibi çok sayıda dış aktörü içerir. Lazarovitz (2021), SolarWinds saldırısını örnek göstererek, bu tür üçüncü taraf yazılım güncellemeleri aracılığıyla tüm sistemin arka kapıdan ele geçirilebileceğini göstermiştir. Bu nedenle işletmeler, artık sadece kendi altyapılarını değil; tedarik zinciri boyunca yer alan tüm aktörlerin güvenlik seviyelerini de değerlendirmek zorundadır.

Bu kapsamda, sıfır güven mimarileri (Zero Trust), ağ segmentasyonu, çok faktörlü kimlik doğrulama, sürekli izleme ve anomali tespiti gibi yeni nesil yaklaşımlar ön plana çıkmaktadır (Herburger vd., 2024). Ancak bu önlemlerin sürdürülebilir olabilmesi, yalnızca teknolojik altyapı değil; aynı zamanda yönetişim, süreç tasarımı ve kurum içi eğitim sistemlerinin de entegre edilmesini gerektirir.

Sonuç olarak, dijital tedarik zinciri dönüşümünün başarıyla gerçekleştirilebilmesi, yalnızca performans artırıcı teknolojilerin değil; aynı zamanda güvenlik ve mahremiyet odaklı yapıların da sistematik olarak inşa edilmesine bağlıdır. Bu noktada blok zincir gibi güvenli, dağıtık ve değiştirilemez veri yapıları; siber tehditlere karşı daha dirençli sistemler kurmak açısından stratejik bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Ancak dijital tedarik zinciri dönüşümünün başarıyla gerçekleştirilebilmesi, yalnızca teknolojik çözümlerin etkinliğiyle sınırlı değildir. Yeni nesil sistemlerin uygulanabilirliği; organizasyonel esneklik, finansal kaynak tahsisi, çalışan yetkinlikleri ve yönetişim kapasitesi gibi çok boyutlu faktörlere de bağlıdır. Yüksek başlangıç maliyetleri, eski sistemlerle entegrasyon sorunları, düzenleyici belirsizlikler ve dijital olgunluk farkları, teknolojik dönüşümün hızını ve başarısını sınırlayabilmektedir. Ayrıca, kurum içi değişime direnç, liderlik eksikliği ve tedarik zinciri genelinde ortak dijital vizyon eksikliği de bu sürecin önündeki yapısal engeller arasında yer almaktadır. Bu nedenle

dijitalleşme, yalnızca teknik bir modernizasyon değil; stratejik düzeyde kurgulanması gereken bütüncül bir kurumsal dönüşüm süreci olarak ele alınmalıdır.

Birinci bölümde, tedarik zinciri yönetiminin temel kavramsal çerçevesi, yapısal özellikleri ve dijitalleşme ekseninde dönüşümü kapsamlı biçimde ele alınmıştır. Bu bağlamda blok zincir gibi teknolojilerin çok aktörlü ve yüksek regülasyonlu sistemlerde neden kritik hâle geldiği teorik olarak temellendirilmiştir. Bu kuramsal çerçeve doğrultusunda izleyen bölümde, dijital dönüşüm ihtiyacının en yoğun hissedildiği sektörlerden biri olan ilaç tedarik zinciri (İTZ) çok boyutlu bir bakışla ele alınacaktır. İTZ'nin yapısal özellikleri, işleyiş süreçleri, aktörleri, düzenleyici yapısı ve sistemde karşılaşılan temel kırılganlıklar analiz edilerek, dijital teknolojilerin bu alandaki dönüşüm potansiyelinin daha somut biçimde tartışılmasına zemin hazırlanacaktır.

İKİNCİ BÖLÜM

İLAÇ TEDARİK ZİNCİRİ

Tedarik zinciri yönetimi, sektörler arası ortak ilkelere dayansa da her endüstrinin kendine özgü dinamikleri ve regülasyon düzeyleri, zincir yapısını belirgin biçimde şekillendirmektedir. Bu bağlamda, ilaç sektörü, tedarik zinciri yapısının yalnızca lojistik ve operasyonel gereksinimlerle değil; aynı zamanda halk sağlığı, yasal uygunluk, kalite güvencesi ve dijital güvenlik gibi çok boyutlu kriterlerle tanımlandığı bir alan olarak öne çıkmaktadır. İTZ, yalnızca ürün hareketlerini değil; bu ürünlerin insan sağlığı üzerindeki etkilerini de doğrudan belirleyen nitelikte olması bakımından kritik bir stratejik altyapı niteliği taşımaktadır.

Bu bölümde, İTZ'nin sektörel ve yapısal özellikleri, işleyiş süreçleri, kurumsal aktörleri ve yasal çerçevesi çok boyutlu olarak analiz edilmektedir. Türkiye özelindeki dijital takip uygulamaları İTS örneğiyle ele alınmakta; sistemde karşılaşılan başlıca sorun alanları, kırılganlık bağlamında sınıflandırılmaktadır. Ayrıca COVID-19 pandemisinin zincir üzerindeki etkileri ve soğuk zincir gibi hassas süreçlerin taşıdığı riskler değerlendirilerek, dirençlilik ve dayanıklılık gibi kavramlara kavramsal zemin hazırlanmaktadır. Bu analiz, ilerleyen bölümlerde geliştirilecek dijital ve blok zincir temelli çözüm yaklaşımlarına teorik bir temel oluşturmaktadır.

2.1. Tanım ve Sektörel Özellikler

İTZ, ilaçların üreticiden hastaya ulaştırılmasına kadar olan tüm süreci kapsayan, çok aktörlü ve yüksek düzeyde düzenlemelere tabi karmaşık bir ağ yapısıdır (Mendoza, 2021). Bu yapı; etken madde temini, üretim, depolama, dağıtım ve eczane/hastane aracılığıyla son kullanıcıya ulaştırma gibi birçok aşamadan oluşur. Zincir, tedarikçiler, üreticiler, dağıtıcılar, eczacılar, hastaneler ve hastalar gibi çeşitli paydaşları içerdiğinden, süreçlerin entegrasyonu ve eşgüdümü büyük önem taşır (Wong vd., 2023:1).

Diğer sektörlerden farklı olarak, İTZ yalnızca malzeme akışını değil; aynı zamanda insan sağlığı açısından yüksek risk taşıyan ürünlerin kalite, etkinlik ve güvenlik gerekliliklerini de kapsar. Bu nedenle tedarik zinciri süreci, baştan sona sıkı yasal düzenlemelerle çerçevelenmiştir. Ulusal ve uluslararası düzenleyici kurumlar (örneğin Amerika Birleşik Devletleri Gıda ve İlaç Dairesi (Food and Drug Administration, FDA), Avrupa İlaç Ajansı (European Medicines Agency, EMA), Türkiye İlaç ve Tıbbi Cihaz Kurumu (TİTCK), üretim ve dağıtım süreçlerinin her aşamasında İyi Üretim Uygulamaları (Good Manufacturing Practices, GMP) ve İyi Dağıtım Uygulamaları (Good Distribution Practices, GDP) gibi standartlarla kalite güvence mekanizmaları oluşturmuştur. Bu standartlar sayesinde ürünlerin yalnızca güvenli koşullarda üretilmesi değil, aynı zamanda uygun ortamda taşınması ve hastaya doğru biçimde ulaştırılması hedeflenmektedir (Wong vd., 2023:3). Ancak uygulamada bu standartlar bazı durumlarda üretim duruşları, tedarik gecikmeleri gibi operasyonel riskleri de beraberinde getirebilmektedir.

İTZ, yalnızca ulusal ölçekte değil, küresel düzeyde entegre bir sistemdir. Özellikle etken madde üretimi birçok ülke tarafından Çin ve Hindistan gibi sınırlı sayıda ülkeye bağımlı biçimde yürütülmektedir. Bu durum, ürünlerin farklı aşamalarının farklı ülkelerde tamamlanmasına neden olmakta ve zincirin bütününü dışsal şoklara karşı kırılgan hâle getirmektedir. Örneğin COVID-19 pandemisi sırasında, küresel tedarik zincirinde yaşanan ani kırılmalar, ilaç temin süreçlerinde ciddi aksamalara yol açmıştır. Ancak buna karşın, küresel entegrasyon normal koşullarda hastalara çok daha geniş bir ürün yelpazesine erişim olanağı sağlamaktadır (Suda vd., 2022:766).

İTZ'nin ekonomik boyutu da küçümsenmeyecek düzeydedir. 2020'li yıllar boyunca küresel ilaç harcamalarının istikrarlı şekilde artması beklenmekte; bu durum sektörün yalnızca sağlık açısından değil, ekonomik açıdan da stratejik konumunu güçlendirmektedir (Papalexi vd., 2022). Yüksek Ar-Ge maliyetleri, patent yapısı ve düzenleyici zorunluluklar, sektörü yüksek giriş bariyerlerine sahip, rekabeti kontrollü ve devlet müdahalesine açık bir yapıya dönüştürmektedir.

Türkiye özelinde değerlendirildiğinde ise İTZ, kamu güdümlü ve merkezi denetim altında yapılandırılmış güçlü bir sistem görünümündedir. Yaklaşık 300 üretici/ithalatçı firma, 700 civarında ecza deposu ve 40.000'den fazla eczaneden oluşan yapı, TİTCK'nın düzenleyici otoritesinde faaliyet göstermektedir (Visiott, 2023). 2010 yılında devreye

alınan İlaç Takip Sistemi (İTS) sayesinde, karekod teknolojisi ile her bir kutu ilacın üretimden hastaya ulaşımına kadar olan süreci dijital olarak izlenebilir hâle gelmiştir. Bu sistem, yalnızca sahte/kaçak ilaçla mücadelede değil; aynı zamanda iade, geri çekme, envanter takibi ve denetim süreçlerinde de yüksek verimlilik sağlamaktadır (Parmaksiz vd., 2020:435).

Ayrıca İTS, yalnızca sahtecilik karşıtı bir uygulama olmakla kalmayıp; Türkiye'deki ilaç pazarının kayıt dışılıktan arındırılmasına da katkı sağlamıştır. İlaçların yalnızca yetkili üretici, dağıtıcı ve eczaneler aracılığıyla hareket etmesine izin verilmesi, tüm sektörün dijital tabanlı merkezi bir sistemle denetlenebilmesini mümkün kılmıştır. Bu yönüyle Türkiye örneği, dijital altyapı ile kamu denetiminin entegre biçimde çalıştığı bir model olarak ön plana çıkmaktadır.

2.2. Yapısal Özellikler ve Süreçler

İlaç tedarik zincirinin yapısı, çok aşamalı ve birbirine bağımlı düğümlerden oluşan dinamik bir sistemdir. Temel aşamalar; etken madde temini, ilaç üretimi (formülasyon ve ambalajlama), toplu dağıtım (ecza depoları aracılığıyla) ve perakende dağıtım (eczaneler veya hastaneler aracılığıyla) olarak sıralanabilir (Seeley, 2022). Her bir aşamada, süreçleri etkileyen farklı operasyonel gereksinimler ve düzenleyici yükümlülükler bulunmaktadır.

Üretim aşamasında, hammaddelerin güvenilir kaynaklardan temini, üretim planlaması, kalite kontrol ve GMP uyumu öne çıkarken; dağıtım aşamasında, depolama koşullarının sağlanması (örneğin sıcaklık kontrollü taşıma), envanter yönetimi ve sevkiyat optimizasyonu kritik hâle gelir. Perakende noktalarında (eczane/hastane), reçete yönetimi, ilacın doğru hasta ile eşleştirilmesi ve gerektiğinde farmakovijilans (ilaç güvenliği takibi) gibi işlevler devreye girer. Bu nedenle, her halkadaki aksaklık, zincirin bütününü etkileyebilecek sistemsel bir kırılganlık yaratabilir (Goswami vd., 2024).

İlaç tedarik zincirinde aktörler arası koordinasyon, zincirin verimliliği ve sürdürülebilirliği açısından hayati öneme sahiptir. Özellikle ecza depoları gibi aracı yapılar, hem yukarıdan gelen ürün akışını yönetir hem de eczaneler ve hastaneler gibi son kullanıcı kurumlara talep odaklı ürün akışı sağlar. Bu noktada, talep tahmini ve envanter yönetimi süreçleri zincirin performansı üzerinde doğrudan belirleyici rol oynar. Nitekim yapılan bir vaka çalışması, eczane/hastane aşamasının ilaç kıtlıkları açısından en kırılgan halka olduğunu ortaya koymuştur; çünkü buradaki herhangi bir stok eksikliği, doğrudan hasta bakımını sekteye uğratabilir (Wong vd., 2023:1).

Bu tür risklerin azaltılması amacıyla, üretimden başlayarak şeffaf bir sipariş ve stok bilgi akışı sağlanması, kritik ürünlerde güvenlik stoğu bulundurulması gibi stratejiler uygulanmaktadır. Bu yapılar modern İTZ tasarımlarında görünürlük ve öngörülebilirlik ilkelerine dayalı süreçlerin önemini artırmaktadır.

İTZ yalnızca ileri akıştan (üretici → hasta) ibaret değildir. Tersine lojistik süreçleri de yapının ayrılmaz parçasıdır. Süresi dolan, hatalı veya geri çağrılan ürünlerin toplanması ve bertaraf edilmesi yasal zorunluluk kapsamındadır. Bu nedenle üreticiler, dağıtıcılar ve perakendeciler, bu tür ürünleri izleyip iade mekanizmalarını devreye alacak sistemleri kurmak zorundadır.

Yapısal olarak çok katmanlı ve süreçleri sıkı biçimde tanımlanmış olan ilaç tedarik zinciri, yalnızca operasyonel aşamalardan değil; bu aşamaların yürütülmesinden sorumlu çok sayıda kurum ve aktörden oluşmaktadır. Zincirin her bir halkasında görev alan bu aktörlerin rollerinin net biçimde anlaşılması, sistemin bütüncül yönetimi açısından kritik önemdedir. Bu bağlamda bir sonraki bölümde, İTZ içinde yer alan temel aktörler ve kurumsal roller analiz edilecektir.

2.3. Aktörler ve Kurumsal Roller

İTZ, birbiriyle etkileşim içinde çalışan çok sayıda aktörden oluşmakta ve her aktör, zincirin belirli bir noktasında özgün bir kurumsal sorumluluk üstlenmektedir. Bu aktörlerin koordineli çalışması, ürün güvenliği, hizmet kalitesi ve sistem sürdürülebilirliği açısından kritik önem taşır (Kaylor, 2023).

Üretici firmalar, zincirin ilk halkasını oluşturur. Ar-Ge sonucunda geliştirilen veya jenerik olarak üretilen ilaçların imalatından sorumlu olan bu firmalar, aynı zamanda ruhsatlandırma, kalite güvencesi ve GMP uyumluluğu gibi yasal yükümlülüklere tabidir. Bazı üretici firmalar, üretim süreçlerini sözleşmeli üreticilere devredebilir.

Etken madde tedarikçileri, üreticilere ham madde sağlayan özel bir grup olarak zincirde yer alır. Bu tedarikçilerin büyük kısmı uluslararası pazarda faaliyet göstermekte olup, üreticiler tarafından kalite denetimlerine tabi tutulmaktadır. Çin ve Hindistan, bu alanda küresel hâkimiyet sahibidir.

Dağıtıcılar ve ecza depoları, üreticiden gelen ürünleri toplayarak perakende noktalarına ulaştıran lojistik aktörlerdir. Türkiye'de ecza depoları, eczanelerin siparişlerine kısa sürede yanıt verebilecek altyapıya sahiptir. Bu aktörler aynı zamanda İTS gibi

platformlara ilaç hareketlerini bildirmekle yükümlüdür. Böylece sistem genelinde izlenebilirlik sağlanır.

Eczaneler ve hastane eczaneleri, zincirin son halkasında yer alır. Eczacılar, yalnızca ilacın fiziksel temininden değil; aynı zamanda hasta bilgilendirmesi ve doğru kullanımın sağlanmasından da sorumludur. Özellikle hastane eczaneleri, kritik ilaçların planlamasında ve stok optimizasyonunda önemli rol oynar. Bu kurumlar aynı zamanda talepleri doğrudan üst basamaklara ileten geri besleme merkezleridir.

Regülatör kurumlar, İTZ'nin yönetişimsel çerçevesini belirleyen kural koyucu aktörlerdir. Türkiye'de TİTCK ABD'de FDA ve AB'de EMA, ruhsatlandırma, üretim denetimi, farmakovijilans ve geri çekme süreçlerini yöneten kurumlardır. Bu aktörler, yalnızca ilaç güvenliği değil; arz sürekliliği açısından da karar alma süreçlerinde etkilidir. Örneğin üretimin durdurulması gibi durumlarda alternatif tedarik kaynakları için sektörel koordinasyonu sağlarlar.

Geri ödeme kurumları, sistemin finansal mimarisini belirler. Türkiye'de Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK), hangi ilacın hangi koşullarda karşılanacağını ve geri ödeme kurallarını belirlemektedir. Bu kurumlar doğrudan tedarikçi olmasa da pazar erişimi, fiyatlama ve ürün dolaşımı üzerinde belirleyici etkiye sahiptirler. Bazı durumlarda, yüksek maliyetli ilaçların kamu eliyle doğrudan temin edilmesi de mümkündür.

Teknoloji ve altyapı sağlayıcıları, doğrudan ilaç üretip dağıtmasalar da İTZ'nin dijitalleşme süreçlerine altyapı sunarak zincirin etkinliğine katkıda bulunurlar. İTS yazılım geliştiricileri, reçete sistemleri, e-nabız gibi platformları yöneten teknoloji firmaları bu kategoriye girer.

Özetle, İTZ'nin başlıca aktörleri; üretici firmalar, etken madde tedarikçileri, dağıtıcılar, eczaneler/hastaneler, regülatör kurumlar, ödeme kurumları ve destekleyici hizmet sağlayıcılardır. Bu çok aktörlü yapının yalnızca operasyonel değil, yasal ve yönetişimsel düzeyde de düzenlenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, ilaç tedarik zincirini şekillendiren yasal ve düzenleyici çerçevenin rolü bir sonraki bölümde incelenecektir.

2.4. Yasal ve Düzenleyici Çerçeve

İlaç tedarik zincirinin işleyişini belirleyen en temel unsurlardan biri, yasal ve düzenleyici çerçevedir. İlaçlar, doğrudan halk sağlığını ilgilendirdiği için, üretimden dağıtıma ve tüketiciye ulaşana kadar tüm süreçlerde kayıt altına alınması ve denetim mekanizmalarına

tabi tutulması gereken ürünlerdir. Bu nedenle İTZ, ulusal ve uluslararası düzeyde kapsamlı yasal düzenlemelere tabidir.

Ruhsatlandırma süreçleri, bu çerçevenin başlangıç noktasını oluşturur. Bir ilacın piyasaya çıkabilmesi için, öncelikle düzenleyici otoriteden pazarlama izni (ruhsat) alması gerekir. Ruhsat, ürünün kalitesi, güvenliği ve etkinliğine ilişkin bilimsel verilerin titizlikle değerlendirilmesi sonucunda verilir. Örneğin AB'de 2019 itibariyle uygulanan Tekil İzleme Sistemi, her ilaç kutusunun 2D karekod ile kaydedilmesini ve eczanede hastaya sunulurken dijital doğrulama yapılmasını zorunlu kılmıştır (European Commission, 2016). Benzer şekilde, ABD'de 2013'ten bu yana kademeli olarak uygulanan İlaç Tedarik Zinciri Güvenliği Yasası (Drug Supply Chain Security Act- DSCSA), ilaçların dijital ortamda izlenmesini zorunlu kılarak sahteciliğe karşı regülasyonun kapsamını genişletmiştir (U.S. Food and Drug Administration, 2024). Bu tür uygulamalar, sadece ruhsat alan ürünlerin değil, son kullanıcıya ulaşan her bir kutunun kontrol altında tutulmasını sağlayarak, tedarik zincirinde izlenebilirliğin en alt seviyeye kadar genişletilmesini hedefler.

GMP ve GDP, ilaç tedarik zincirinin kalite güvencesi boyutunu oluşturmakta olup, Türkiye'de bu standartlar uluslararası normlarla uyumlu biçimde yürürlüğe girmiştir. Üretim tesislerinin hijyen koşulları, çalışan eğitimi, dokümantasyon, sıcaklık kontrolü ve taşıma süreçleri gibi birçok unsur, bu kurallar çerçevesinde denetlenmektedir (Resmi Gazete, 2017).

Ancak bu denetimlerin sıkılığı, bazı durumlarda üretimin durdurulmasına ya da ürünlerin piyasadan geri çekilmesine neden olabilir. Örneğin ABD FDA'nın 2019 İlaç Kıtlıkları Raporu'nda, üretim kalitesi sorunları ve düzenleyici yaptırımlar, en yaygın kıtlık nedenlerinden biri olarak tanımlanmıştır (Gómez ve España, 2020:1674). Bu nedenle regülasyonun amacı yalnızca kalite değil, kalite ve tedarik güvenliği arasında denge kurmaktır.

Bir diğer önemli alan, ilaç takip ve izlenebilirlik sistemleridir. Sahte ve kaçak ilaçlarla mücadele kapsamında geliştirilen bu sistemler, ilacın üretimden hastaya kadar olan tüm hareketlerinin dijital kayıt altına alınmasını sağlar. Türkiye'de 2010 yılında devreye alınan İlaç Takip Sistemi (İTS), tüm iç pazarı kapsayan ilk ulusal çaplı uygulamalardan biridir (Parmaksiz vd., 2020). Üretici, dağıtıcı, eczane ve hastane gibi tüm aktörler, ellerindeki ilaçların İTS veritabanına kayıtlarını yapmakla yükümlüdür. Bu sistem,

yalnızca sahte ilaçları engellemekle kalmamış; aynı zamanda geri çekme, denetim ve stok izleme süreçlerinde etkinlik sağlamıştır (İlaç Takip Sistemi, 2023).

Avrupa Birliği, sahte ilaçlarla mücadele amacıyla 2011/62/EU sayılı sahte ilaçlarla mücadele yönergesi (Falsified Medicines Directive – FMD) kapsamında bir dijital doğrulama sistemi geliştirmiş ve 2019 itibarıyla üye ülkelerde kutu bazlı doğrulama uygulamasını zorunlu hâle getirmiştir. Tüm bu sistemler, tedarik zinciri güvenliği kadar halk sağlığına olan güvenin artırılmasını da amaçlamaktadır.

Düzenlemelerin diğer boyutu ise ilaç fiyatlandırması ve geri ödeme sistemleridir. Türkiye'de ilaç fiyatları, Sağlık Bakanlığı'nın belirlediği "İlaç Fiyat Kararnamesi"ne göre referans ülkeler bazında belirlenmekte ve sabit Euro kuru uygulanmaktadır (Sönmez ve İlgün, 2018:106). Ancak sabit kur politikası, kur dalgalanmaları karşısında üreticilerin zarar etmesine ve bazı ilaçların pazardan çekilmesine yol açabilmektedir. Literatürde bu durum, düşük kâr marjlarının arz üzerinde baskı yarattığı ve erişim sorunlarını artırabileceği şeklinde değerlendirilmektedir (Mendoza, 2021).

Küresel düzeyde ise Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ile İlaç Ürünlerinde Uyumlaştırma Uluslararası Konseyi (ICH), üye ülkeler arasında teknik kılavuzları standartlaştırmakta; uluslararası sahte ilaçla mücadele, denetim uyumu ve ruhsatlandırma prosedürleri gibi alanlarda eşgüdüm sağlamaktadır (Årdal vd., 2021; PIC/S, 2023). Bu sayede bir ülkede onaylanan ürünün, diğer ülkelerde de daha hızlı piyasaya erişmesi mümkün olabilmektedir.

Yasal düzenlemeler, ilaç tedarik zincirinde kalite güvencesi, izlenebilirlik ve hasta güvenliği açısından önemli bir çerçeve sunmaktadır. Ancak bu çerçeve, sistemin tüm zorluklarını ortadan kaldırmakta yetersiz kalmakta; uygulamada çeşitli yapısal ve operasyonel sorunlarla karşılaşılmaktadır. İzleyen bölümde, ilaç tedarik zinciri literatüründe öne çıkan başlıca sorunlar değerlendirilecektir.

2.5. Karşılaşılan Temel Sorunlar ve Sistemsel Kırılganlıklar

İlaç tedarik zinciri; ürünün stratejik önemi, sistemin çok katmanlı yapısı ve yüksek regülasyon seviyesi nedeniyle, operasyonel sorunların ötesine geçen birçok yapısal zorlukla karşı karşıyadır.

Aşağıda, literatürde en sık vurgulanan temel sorun alanları özetlenmektedir:

- Stokçuluk ve İlaç Kıtlığı

Piyasa belirsizlikleri, döviz kuru dalgalanmaları ve sabit kur politikaları, üretici, dağıtıcı ve eczane düzeyinde stok tutma eğilimini artırmakta; bu da bazı ilaçların sahada bulunamamasına neden olmaktadır (Çalıkuşu ve Özçelikay, 2024). Özellikle ithal ilaçlarda kur farkı nedeniyle arz kesintisi yaşanabilir.

- Fiyatlandırma Baskısı

Türkiye'de sabit Euro kuru uygulaması, özellikle ithal ürünlerde fiyat–maliyet dengesini bozan bir unsur hâline gelmiştir. Düşük kâr marjları, üreticilerin ürünlerini piyasaya sunma motivasyonunu azaltmakta, bu da arz güvenliğini zayıflatmaktadır (Mendoza, 2021).

- Ruhsat Gecikmeleri ve Regülasyon Tıkanıklığı

Yeni ilaçların ruhsatlandırılmasındaki yavaşlık ve mevcut ürünlerin farklı formlarının kaydedilmesindeki bürokrasi, ürün erişimini geciktiren kritik sorunlardan biridir (Shore vd., 2022) Özellikle biyoteknolojik ve nadir hastalık ilaçlarında bu durum daha sık görülmektedir.

- Uzun Tedarik Süreleri ve Dışa Bağımlılık

İlaç üretiminde kullanılan birçok etken madde ve ambalaj malzemesi, dış tedarikçilere bağlıdır. Bu durum, uluslararası lojistikte yaşanan gecikmelerin doğrudan ilaç arzına yansımasına neden olmaktadır (McGeeney vd., 2025).

- Sahte ve Kaçak Ürün Tehdidi

Dünya Sağlık Örgütü'ne göre, düşük ve orta gelirli ülkelerde ilaçların yaklaşık %10'u sahte ya da standart dışıdır (WHO, 2024). İnternet üzerinden yapılan yasa dışı satışlar, düzenlemelere rağmen sahte ürünlerin yasal zincire sızmasına yol açabilmektedir (Sim vd., 2022). Türkiye'de İTS bu konuda önemli başarılar sağlamış olsa da küresel düzeyde sorun devam etmektedir.

- Soğuk Zincir Uygulamalarında Yetersizlik

Aşı, insülin, kan ürünleri gibi ısıya duyarlı ürünlerin taşınması sırasında gerekli sıcaklık koşulları sağlanamadığında, ürün etkinliği kaybolmakta ve hasta güvenliği riske atılmaktadır (Wal vd., 2019).

- Talep Tahmin Hataları ve Planlama Sorunları

İlaç talebi; salgınlar, mevsimsel değişimler ve ani krizler gibi faktörlerle hızlı biçimde değişebilir. Doğru tahmin yapılamadığında, ya aşırı stok (maliyet ve israf) ya da stok eksikliği (tedarik krizi) yaşanır. Moosivand vd. (2019), planlama hatalarının İTZ'de ciddi kıtlıklara yol açtığını belirtmektedir.

- Lojistik ve Dağıtım Altyapısındaki Eksiklikler

Kırsal bölgelerdeki erişim güçlükleri, taşıma maliyetleri ve altyapı eksiklikleri, bazı bölgelerde düzenli ilaç erişimini zorlaştırmaktadır (Türk ve Güner, 2021). Depolar arası stok dengelemenin manuel yapılması, zaman ve kaynak kaybına neden olmaktadır.

Bu sorunlar çoğu zaman birbirini tetikleyen dinamikler üzerinden ilerlemektedir. Örneğin, ilaç fiyatlandırmasında uygulanan baskılar üreticilerin üretim süreçlerinden çekilmesine; bu durum arz kısıtlarına ve ilaç kıtlıklarına; devamında ise sahte ürünlerin yasal olmayan kanallardan dolaşıma girmesine neden olabilmektedir. Dolayısıyla İTZ'de karşılaşılan bu çok katmanlı sorunlara yönelik çözüm yaklaşımlarının da bireysel değil; bütüncül, entegre ve çok aktörlü nitelikte olması gerekmektedir. Nitekim bu sistemsel zorluklar, kriz dönemlerinde çok daha belirgin hâle gelmekte ve tedarik zincirinin yapısal zayıflıklarını görünür kılmaktadır. Bu sistemsel sorun alanları arasında, soğuk zincir lojistiği hem fiziksel kırılganlık düzeyi hem de hasta güvenliği açısından en kritik halkalardan biri olarak öne çıkmaktadır. Özellikle sıcaklık duyarlılığı yüksek ürünlerin taşınması ve depolanmasında yaşanan altyapı yetersizlikleri, sistemin genel dayanıklılığını zayıflatmakta; lojistik hataların sağlık sonuçlarını doğrudan etkileyebilecek düzeye ulaşmasına neden olmaktadır. İzleyen bölümde, soğuk zincir yapısının taşıdığı yapısal riskler daha ayrıntılı biçimde ele alınacak; bu kırılganlığın nedenleri ve sistem üzerindeki etkileri değerlendirilecektir.

2.6. Soğuk Zincir Lojistiği ve Kritik Önemi

İlaç tedarik zincirinde yer alan en hayati süreçlerden biri olan soğuk zincir lojistiği, sıcaklık duyarlılığı yüksek farmasötik ürünlerin belirli ısı aralıklarında saklanarak üreticiden nihai kullanıcıya kadar güvenli biçimde ulaştırılmasını amaçlayan özel bir lojistik sistemdir (Sykes, 2018). Aşılar, insülinler, kan ürünleri ve biyoteknolojik ilaçlar gibi birçok ürünün etkililiğini koruyabilmesi, yalnızca üretim kalitesine değil; bu ürünlerin uygun koşullarda taşınıp depolanmasına da doğrudan bağlıdır (Nyirimanzi vd., 2023). Bu nedenle, soğuk zincir sadece bir lojistik teknik detay değil; doğrudan hasta güvenliğini ve tedavi başarısını etkileyen kritik bir yapı taşıdır.

Bu süreçte ilaçların +2°C ile +8°C arasında taşınması gibi spesifik koşullar sağlanmak zorundadır. Ancak bu hassasiyet, zinciri daha kırılgan hâle getirmekte ve süreç boyunca maruz kalınabilecek her türlü sapma, ürünün farmakolojik etkisini yitirmesine yol açabilmektedir (Chhay ve Scheckelhoff, 2023). Taşıma sırasında araç kapılarının sık açılıp kapanması, elektrik kesintileri, depolama alanlarının uygun izleme sistemlerinden yoksun olması gibi durumlar, zincirin farklı halkalarında risk birikimi yaratmaktadır. Ayrıca taşımadan sorumlu personelin eğitimsizliği, manuel ısı takip sistemlerinin hata payı ve raporlamada yaşanan gecikmeler gibi nedenlerle bu risklerin tespiti ya da önlenmesi çoğu zaman mümkün olmamaktadır (Pajic vd., 2024; Girma vd., 2024).

COVID-19 pandemisi bu kırılgan yapının sistemsel etkilerini görünür kılan en çarpıcı örneklerden biri olmuştur. Özellikle mRNA temelli aşıların -70°C gibi ekstrem sıcaklık koşullarında taşınma zorunluluğu, yalnızca gelişmekte olan ülkelerde değil; birçok gelişmiş sağlık sisteminde dahi ciddi lojistik darboğazlara neden olmuştur (Pambudi vd., 2022). Aşıların bozulması, imha edilmesi ya da güvenlik endişesiyle uygulanamaması gibi durumlar, soğuk zincirin yeterince dirençli olmadığı durumlarda nasıl bir halk sağlığı krizine dönüşebileceğini açıkça göstermiştir.

Soğuk zincir lojistiğinde karşılaşılan sorunlar yalnızca ürünün fiziksel niteliğini değil, aynı zamanda sistemin bütünlüğünü de etkilemektedir. Sıcaklık sapmalarına bağlı olarak ürünün etkisini kaybetmesi hâlinde, bu ürün hâlâ piyasaya sunulmuşsa sahaya potansiyel olarak zararlı bir ürün sürülmüş olur. Bu nedenle, soğuk zincir süreci yalnızca taşıma ya da depolama değil; izleme, raporlama, karar verme ve denetleme gibi çok katmanlı işlevleri barındıran karmaşık bir sistemdir (Pajic vd., 2024). Ayrıca kırsal alanlara erişimin sınırlı olduğu bölgelerde lojistik altyapı eksiklikleri, sıcaklık kontrollü araç sayısının yetersizliği veya ürünlerin ulaşım sürelerinin uzun olması gibi nedenlerle soğuk zincirin kırılganlığı daha da artmaktadır. Bu da sağlık hizmetlerinde bölgesel eşitsizliklere yol açmakta; kritik ürünlerin bazı bölgelere geç ya da eksik ulaşmasına neden olabilmektedir. Bu durum özellikle aşılama kampanyaları ve salgın yönetimi gibi kamusal sağlık müdahalelerinde zincirin performansını doğrudan belirlemektedir (Adeyemo vd., 2021).

Genel olarak değerlendirildiğinde, soğuk zincir lojistiği, ilaç tedarik zincirinin yalnızca operasyonel bir halkası değil; stratejik kırılma noktasıdır. Bu sistemin sorunsuz işlemesi, yalnızca ürün kalitesi açısından değil; hasta güvenliği, hizmet sürekliliği ve kamu sağlığı

açısından da belirleyicidir. Bu nedenle, soğuk zincirin süreçsel zaaflarının, yapısal kırılganlıklarının ve müdahale gecikmelerinin sistem düzeyinde ele alınması kaçınılmazdır.

Bu kırılgan yapının daha bütüncül biçimde anlaşılabilmesi için soğuk zincir süreçlerinin hangi aşamalarda, nasıl kırılabileceği ve bu kırılmaların hangi operasyonel aksaklıklarla ilişkili olduğu ayrıntılı biçimde ele alınmalıdır. Ayrıca, bu kırılganlığın hangi dijital araçlarla izlenebilir hâle getirilebileceği, kurumsal sorumlulukların nasıl şeffaflaştırılabileceği ve hasta güvenliği açısından nasıl müdahale edilebilir bir sistem tasarlanabileceği de değerlendirme kapsamına alınmalıdır.

Bu doğrultuda, izleyen iki alt başlıkta sırasıyla; (i) soğuk zincir süreçlerinin kırılgan noktaları ve sistem içi risk alanları analiz edilecek, (ii) ardından bu kırılganlığın dijital altyapılarla nasıl yönetilebileceği ve izlenebilirliğin neden kritik bir dönüşüm alanı olduğu açıklanacaktır.

2.6.1. Soğuk Zincir Süreçleri ve Kırılganlık Noktaları

Soğuk zincir lojistiği, yüksek duyarlılık gerektiren ilaçların sabit sıcaklık aralıklarında saklanması ve taşınmasına dayalı kritik bir süreçtir. Bu sürecin hassas yapısı, yalnızca çevresel koşullardan değil, aynı zamanda sistemsel izleme eksikliklerinden kaynaklanan kırılganlıklarla da karşı karşıyadır. Bu bağlamda, kırılganlık kavramı yalnızca fiziksel sapmaları değil; bu sapmaların sistem tarafından tespit edilememesi, raporlanamaması ve yönetilememesi durumlarını da kapsamaktadır (Ren vd., 2024)

Soğuk zincirin farklı aşamalarında ortaya çıkan sistemsel kırılganlık noktaları aşağıda yapılandırılmış biçimde özetlenmektedir (Pajic vd., 2024: Wang ve Du, 2025):

- Geçiş Aşamalarında Veri Kaybı: Üretimden çıkış ile taşıma sürecine geçiş aşamalarında sıcaklık verilerinin otomatik olarak kayıt altına alınmaması, sistemin kritik zayıf noktalarından birini oluşturarak, ürün teslimatı sırasında veri bütünlüğünün kaybedilmesine neden olmaktadır.
- Süreçler Arası Sorumluluk Belirsizliği: Taşıma, dağıtım, stoklama gibi süreçler arasında dijital iz takibi yapılmadığında, zincirin hangi aşamasında ihlal yaşandığı saptanamaz. Özellikle manuel teslimat ve kabul süreçlerinde bu kırılganlık daha belirgindir.

- Müdahalede Gecikme Sorunu: Soğuk zincir ihlalleri çoğu zaman anlık değil, geriye dönük fark edilir. Bu da ürün piyasaya ulaştıktan sonra geri çağırma ya da iptal gibi maliyetli ve gecikmiş müdahaleleri beraberinde getirir.
- Parçalı Veri Yapısı ve Entegrasyon Sorunları: Taşıyıcı araç, depo, eczane gibi noktalar arasında veri standardı olmaması, sıcaklık verilerinin anlamlı şekilde bütünleştirilmesini engeller. Bu durum, zincirin bütünsel izlenebilirliğini bozar.

Bu kırılganlık noktaları, sistemin yalnızca teknik olarak değil, aynı zamanda yönetişimsel olarak da zayıf kaldığını göstermektedir. Çünkü bir zincir kırılması yalnızca fiziksel bir arıza değil; kurumsal sorumluluğun atanamadığı, denetimin devreye giremediği, hasta güvenliğinin riske girdiği bir sistemsel arızadır (Nwoke, 2024).

Bu nedenle, bir sonraki başlıkta bu kırılganlıkların yalnızca tespiti değil, dijital sistemlerle nasıl giderilebileceği, sıcaklık verisinin nasıl güvenli ve izlenebilir biçimde kayıt altına alınabileceği, kurumsal şeffaflık ve denetim kapasitesinin nasıl artırılabileceği detaylandırılacaktır.

2.6.2. Soğuk Zincir İzlenebilirliği İçin Dijital Altyapı Gereksinimi

Soğuk zincirin çeşitli aşamalarında yaşanabilecek kırılmaların erken tespit edilebilmesi, yalnızca fiziksel önlemlerle değil; bu süreçlere entegre edilmiş dijital izleme sistemleri ile mümkündür. Kırılgan noktaların çoğu, sıcaklık sapmaları, gecikmeler, kayıt dışı geçişler veya manuel kontrol yetersizliklerinden kaynaklanmaktadır (Pajic vd., 2024). Ancak bu olayların sistem tarafından anlık olarak algılanabilmesi ve müdahale edilebilir bir çerçevede raporlanabilmesi için süreçlerin dijital altyapılarla desteklenmesi gereklidir.

Soğuk zincir süreçlerinde dijital izlenebilirliğin temel hedefi, ürünün her aşamasındaki çevresel koşulları anlık biçimde kaydedebilmek, bu verileri zaman damgası ve işlem sahibi bilgisiyle birlikte saklayabilmek ve zincir boyunca oluşan tüm kayıtların bütünsel olarak denetlenmesine imkân tanımaktır (Rana vd., 2024). Bununla birlikte, bu sistem yalnızca sıcaklık verisini izlemekle kalmamalı; aynı zamanda herhangi bir sapma durumunda kim, ne zaman, hangi işlemde sorumludur sorularına net ve müdahale edilebilir cevaplar verebilecek kapasitede olmalıdır.

Ne var ki, mevcut uygulamalarda bu kapasiteye erişilmemektedir. Birçok sistem, ürünün fiziksel hareketini bildirim temelli takip ederken; sıcaklık gibi çevresel faktörleri sistematik biçimde kayıt altına almamakta, olay bazlı ihlalleri algılayamamaktadır. Bu

durum, yalnızca ürün güvenliğini değil; aynı zamanda sistemin kurumsal hesap verebilirliğini, müdahale hızını ve halk sağlığına karşı duyarlılığını da sınırlamaktadır.

Bu çerçevede, soğuk zincir süreçlerinin dijital olarak izlenebilir hâle getirilmesi, tedarik zincirinin bütünsel etkinliği açısından vazgeçilmez bir gerekliliktir. Süreçlerin otomatik veri üretimiyle desteklenmesi, izleme noktalarının çoğaltılması, manuel sistemlerin yerini alan sensör tabanlı yapılarla veri güvenliğinin artırılması ve süreç sahipliğinin dijital kayıtlarla netleştirilmesi bu altyapının ön koşulları arasında yer almaktadır (Ahmad vd., 2024).

Türkiye'de kullanılan merkezî sistemlerde ise, çevresel verilerin sistematik olarak entegre edilmediği görülmektedir. Özellikle soğuk zincir ürünlerinde taşıma koşullarına ilişkin veriler sistem düzeyinde tutulmadığından, yaşanabilecek zincir kırılmaları yalnızca fiziksel gözleme ya da kullanıcı beyanına dayalı olarak tespit edilmektedir. Bu yapı, soğuk zincirin yönetiminde hem veri boşluğu hem de kurumsal belirsizlik üretmektedir (İpekçi ve Tanyaş, 2021: Parmaksiz vd., 2020).

Sonuç olarak, soğuk zincir süreçlerinde izlenebilirliğin güçlendirilmesi, yalnızca operasyonel başarı açısından değil; aynı zamanda tedarik zincirinin risklere karşı ne ölçüde dirençli olduğu sorusuna da doğrudan yanıt üretmektedir. İzleyen bölümde bu yapı, kırılganlık–dirençlilik–dayanıklılık kavramları ekseninde teorik olarak ele alınacak ve dijitalleşme gereksinimi sistemsel risk perspektifiyle bütünleştirilecektir.

2.7. İlaç Tedarik Zincirinde Risk Yönetimi, Kırılganlık, Dirençlilik ve Dayanıklılık

İlaç tedarik zinciri, küresel ölçekte giderek daha karmaşık, belirsiz ve kırılgan bir yapı kazanmaktadır. Pandemi, doğal afetler, arz-talep dengesizlikleri, jeopolitik krizler ve regülasyonel baskılar gibi birçok faktör, zincirin performansını etkileyen temel unsurlar hâline gelmiştir. Bu koşullarda tedarik zinciri yönetimi, yalnızca planlama ve operasyon süreçlerini değil; aynı zamanda sistemin risklere karşı ne ölçüde hazırlıklı ve tepkisel olduğunu da içeren çok boyutlu bir yaklaşıma dönüşmüştür.

Bu bağlamda, literatürde öne çıkan üç temel kavram, tedarik zinciri sistemlerinin kırılganlık düzeyini ve müdahale kapasitesini değerlendirmek açısından kritik öneme sahiptir: kırılganlık (vulnerability), dirençlilik (resilience) ve dayanıklılık (robustness).

- Kırılganlık, tedarik zincirinin içsel ya da dışsal şoklara karşı duyarlılığını (Elliott vd., 2022),

- Dirençlilik, bu şoklara karşı hızlı ve etkili tepki verebilme, toparlanma ve yeniden yapılanma kapasitesini (Ozdemir vd., 2022),
- Dayanıklılık ise şoklardan etkilenmeden sistemi minimum sapma ile sürdürebilme yeteneğini ifade eder (Wieland ve Durach, 2021).

Bu üç kavram, tedarik zinciri risk yönetimi (Supply Chain Risk Management – SCRM) yaklaşımlarının temelini oluşturmaktadır. SCRM yalnızca risklerin tanımlanması ve izlenmesiyle sınırlı kalmayıp, sistemin bu risklere ne ölçüde dayanıklı ve uyarlanabilir olduğunu ortaya koymayı da hedefler. Bu bağlamda, kırılgan bir sistemde herhangi bir aksama, performans kaybına ve süreçlerin geçici ya da kalıcı olarak durmasına yol açabilir. Özellikle merkezi veri akışına, sınırlı sayıda tedarikçiye ya da fiziksel altyapı kısıtlarına dayalı sistemler, beklenmeyen durumlar karşısında hızla işlevsiz hâle gelebilir. Buna karşılık dirençli sistemler, bu tür aksamalara karşı hızlı ve esnek biçimde tepki verebilir; alternatif tedarik yolları, senaryo bazlı müdahale planları ve çok aktörlü eşgüdüm mekanizmaları sayesinde işlevselliği kısa sürede yeniden kazanabilir. Dirençlilik, yalnızca tepki verme değil; aynı zamanda sistemin öğrenme ve yeniden yapılandırma kapasitesi açısından da kritik bir göstergedir. Dayanıklı sistemler ise bu tür şokların varlığına rağmen, süreçlerinde büyük bir sapma olmaksızın faaliyetlerini sürdürebilecek altyapısal ve kurumsal bütünlüğe sahiptir. Bu yapı, sistemin kriz anlarında bile minimum performans kaybıyla görevini yerine getirmesine olanak tanır. Dolayısıyla kırılganlık, dirençlilik ve dayanıklılık; SCRM'nin sadece kriz yönetimine değil, aynı zamanda sistemin sürdürülebilirliğine, esnekliğine ve uzun vadeli stratejik planlamaya katkı sağlayan üç temel sütununu oluşturmaktadır. (Barhmi, 2023; El Baz ve Ruel, 2021).

Aşağıda yer alan Tablo 2.1, bu üç kavramı temel farklarıyla birlikte özetlemektedir:

Tablo 2.1. *Tedarik zinciri yönetiminde kırılganlık, dirençlilik ve dayanıklılık kavramlarının karşılaştırılması*

Kavram	Tanım	Odağı	Belirti / Ölçüt	Hedef
Kırılganlık	Zincirin İç/Dış Şoklara Karşı Duyarlılığı ve Etkilenebilirliği	Risk ve Belirsizlik Yönetimi	Şok Anında Performans Kaybı	Riskleri Önceden Tanıma ve Azaltma
Dirençlilik	Şok Sonrası Hızlı Yanıt ve Toparlanma Kapasitesi	Müdahale ve Yeniden Yapılanma	Alternatif Süreçler, Toparlanma Hızı	Sürekliliğin Yeniden Sağlanması
Dayanıklılık	Şoklara Rağmen İşlevselliğin Korunması	Yapısal Güç ve Süreklilik	Minimum Sapma ile İşlevsellik	Performansın Sürdürülebilirliği

Kaynak: Tablo yazar tarafından oluşturulmuştur.

İlaç tedarik zinciri, çok aktörlü, yüksek düzeyde düzenlemeye tabi ve doğrudan halk sağlığı ile ilişkili bir sistem olması nedeniyle bu kavramların uygulama düzeyinde somut karşılık bulduğu sektörlerin başında gelmektedir. Zincirin herhangi bir halkasında yaşanabilecek lojistik aksama, enformasyon gecikmesi ya da kalite sorunu yalnızca birim performansını değil, tüm sistemi etkileyen zincirleme sonuçlara yol açabilir.

Özellikle sıcaklık kontrollü ürünlerin taşınması gibi yüksek duyarlılık gerektiren süreçler, tedarik zincirinin fiziksel kırılganlık düzeyini artırmaktadır. Bu kırılganlık, ürünlerin etkinliğinin kaybına, hasta güvenliğinin tehlikeye girmesine ve kamu otoritesine duyulan güvenin zedelenmesine neden olabilecek yapısal bir risktir (Patel vd., 2023). Diğer yandan, tedarik zincirinde hammaddede dışa bağımlılık, alternatif tedarikçilerin sınırlılığı veya iletişim altyapısının yetersizliği gibi unsurlar da sistemin jeopolitik ve operasyonel kırılganlığını pekiştirmektedir.

Dirençli bir ilaç tedarik sistemi, yalnızca kriz anlarında hızlı müdahale edebilen değil, aynı zamanda bu müdahaleleri sistemli biçimde uygulayabilen esnek altyapılara sahip olmalıdır. Bu çerçevede; çoklu tedarikçi ağı kurmak, önceden belirlenmiş senaryo planları geliştirmek, kritik ürünler için güvenlik stoğu oluşturmak ve bilgi akışını hızlandıracak çözümler geliştirmek dirençlilik kapasitesini artıran temel stratejiler arasında yer almaktadır (Guo vd., 2025). Dayanıklılık ise daha yapısal ve kalıcı bir güvenlik düzeyini işaret eder. Sistem, herhangi bir kesinti yaşamaksızın, esnek otomasyon ve karar destek altyapıları sayesinde işleyişini sürdürebilmelidir. Özellikle sağlık sektöründe, sistemin belli bir kriz ortamında tamamen devre dışı kalmadan fonksiyonlarını sürdürebilmesi, hizmet sürekliliği açısından kritik değer taşır.

Sonuç olarak, ilaç tedarik zincirinin etkin bir şekilde yönetilebilmesi için bu üç kavram birlikte ele alınmalı; sistemin hem kırılgan yapılarını tanımlamak hem de dirençli ve dayanıklı bir yapı inşa etmek üzere bütüncül bir strateji geliştirilmelidir. Bir sonraki bölümde, bu kavramsal yapının dijital çözümlerle nasıl desteklenebileceği; özellikle blok zincir teknolojisinin risk yönetimi açısından hangi avantajları sunduğu ayrıntılı biçimde değerlendirilecektir.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

BLOK ZİNCİR TEKNOLOJİSİ: KAVRAMSAL VE KURAMSAL ARKA PLAN

Dijitalleşmenin hız kazandığı günümüzde, verinin güvenli, şeffaf ve merkeziyetsiz biçimde yönetilmesine duyulan ihtiyaç, blok zincir teknolojisinin yalnızca kripto paralarla sınırlı olmayan çok boyutlu bir altyapı çözümüne dönüşmesini beraberinde getirmiştir. Bu dönüşüm, teknik bir yenilikten ziyade bilgi sistemleri, dağıtık ağ mimarisi ve dijital ekonomi kesişiminde yer alan yapısal bir paradigma değişimini ifade etmektedir. Blok zincir teknolojisi, kriptografik yöntemlerle güvence altına alınmış ve dağıtık bir yapıda tutulan işlem kayıtlarını ifade eden bir yenilik olarak son yıllarda hem akademide hem de endüstride yoğun ilgi görmektedir. Bu teknoloji en genel anlamıyla merkezi otorite olmadan çalışan, değiştirilmesi son derece güç ve şeffaf bir dijital kayıt defteri şeklinde tanımlanabilir (Yaga vd., 2018). İlk olarak 2008 yılında Satoshi Nakamoto takma adlı bir kişi veya grup tarafından ortaya konulan blok zinciri kavramı, Bitcoin kriptoparasının temelini oluşturan dağıtık veri yapısı olarak tasarlanmıştır. Blok zinciri, merkezi aracıya duyulan ihtiyacı ortadan kaldırmakta ve işlemleri taraflar arasında doğrudan güvenli bir şekilde gerçekleştirmeye olanak tanımaktadır (Narayanan vd., 2016).

Bu bağlamda, bu bölümde blok zincir teknolojisinin tarihsel gelişimi, kavramsal dayanakları, teknik bileşenleri ve sistem mimarisi çok katmanlı bir perspektiften ele alınmaktadır. Ayrıca, teknolojinin güven, otomasyon, izlenebilirlik ve işlem bütünlüğü gibi temel vaatleri ile nasıl somutlaştığı değerlendirilmekte ve diğer dijital teknolojilerle entegrasyon potansiyeli analiz edilmektedir. Bölüm sonunda ise blok zincir altyapısının tedarik zinciri yönetiminde nasıl konumlandığına dair uygulama örnekleri üzerinden bir geçiş yapılacaktır.

3.1. Blok Zincir Teknolojisinin Tarihsel Gelişimi

Blok zincir teknolojisinin kavramsal temelleri, Bitcoin'in ortaya çıkışından önceye uzanan çeşitli fikir ve buluşlara dayanmaktadır. Dijital zaman damgalama ve kriptografik olarak birbirine bağlanmış kayıtlar fikri ilk olarak Haber ve Stornetta (1991) tarafından ortaya atılmıştır. Çalışmalarında, dijital belgelerin zaman damgasıyla güvence altına alınması ve belgelerde yapılacak en küçük değişikliğin bile sonraki damgalar tarafından fark edilmesini sağlayan bir mekanizma tanımlamışlardır (Haber ve Stornetta, 1991:100). Bu çözüm, bir belge özetinin bir sonrakine bağlanması prensibine dayanıyordu ve böylece zincirleme bir yapıyla müdahale tespitini mümkün kılıyordu. Bu çalışma, blok zinciri veri yapısının gelişiminde ilham kaynağı olmuştur.

1990'lar ve 2000'lerin başlarında, dağıtık dijital nakit ve kriptografik para konseptine yönelik çeşitli denemeler yapılmıştır. Örneğin, 1998 yılında Wei Dai, merkezi otorite olmaksızın çalışan bir dijital para birimi olan b-money konseptini ortaya koymuştur. Benzer şekilde Nick Szabo, 1997'de akıllı sözleşme kavramını ve "bit gold" adını verdiği merkeziyetsiz dijital para fikrini tartışmıştır. Ancak bu erken dönem önerileri tam anlamıyla uygulanamamış veya geniş kitlelerce benimsenememiştir (Narayanan vd., 2016).

Asıl dönüm noktası, 2008 yılında Satoshi Nakamoto tarafından yayınlanan Bitcoin teknik belge (white paper) ile gerçekleşmiştir. "Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System" başlıklı bu makalede Nakamoto, çift harcama sorununu çözen ve güvenilir bir üçüncü tarafa gerek duymadan çalışabilen eşler arası bir elektronik ödeme sistemi tarif etmiştir (Nakamoto, 2008). Bitcoin ağı, Ocak 2009'da ilk blok (genesis block) kazılarak faaliyete geçirilmiş ve böylece tarihin ilk blok zinciri uygulaması hayata geçmiştir. Bu gelişme, blok zincir teknolojisinin kriptografi, dağıtık sistemler ve ekonomik teşvik mekanizmalarının birleşimiyle işlevsel hale gelebileceğini göstermiştir.

Bitcoin'in başarısı, altında yatan blok zinciri mimarisinin gücünü kanıtlamış; kriptografik güvence, dağıtık mutabakat ve ekonomik teşviklerin özgün kombinasyonu sayesinde ağ, hiçbir merkezi otoriteye ihtiyaç duymadan işlemleri doğrulayabilmiştir (Antonopoulos, 2014). Bu yapının başarısı, blok zincirin yalnızca dijital para sistemlerinde değil, aynı zamanda farklı sektörlerde de uygulanabilir bir teknoloji olduğuna dair ilgiyi artırmıştır.

2014 yılında tanıtılan Ethereum platformu, blok zincir konseptini kriptopara işlemlerinin ötesine taşıyarak akıllı sözleşmeler dönemini başlatmıştır (Buterin, 2014). Bu aşama,

Blok Zincir 2.0 olarak anılmakta ve blok zincirin finans dışı uygulamalarda (tedarik zinciri, dijital kimlik, oylama sistemleri vb.) kullanımını mümkün kılan esnek bir altyapı sunmaktadır. Ethereum'un ardından hem kamuya açık hem de özel sektör odaklı izinli blok zincir ağları gelişmeye başlamıştır.

2015 yılında, blok zincir teknolojisinin finans dışı alanlarda da yaygın kullanım potansiyelini gören Linux Vakfı, kurumsal ihtiyaçlara uygun modüler ve izinli blok zincir yapıları geliştirmek amacıyla Hyperledger projesini başlatmıştır. Hyperledger çatısı altında geliştirilen Hyperledger Fabric, özellikle sağlık, finans ve tedarik zinciri gibi regülasyona açık sektörlerde güçlü kimlik doğrulama ve veri gizliliği mekanizmaları ile öne çıkmıştır (Androulaki vd.,2018). Bu dönem, blok zincirin yalnızca bir fikir olmaktan çıkıp, kurumsal sistemlere entegre edilmeye başlandığı evre olarak kabul edilmektedir.

2017 yılı ise blok zincir teknolojisinin endüstriyel düzeyde benimsenmeye başladığı eşik noktalarından biri olmuştur. Özellikle sağlık ve ilaç sektöründe geliştirilen MediLedger Projesi ile lojistik sektörüne yönelik IBM Blockchain çözümleri, blok zincirin teoriden uygulamaya geçişini sembolize eden öncü girişimlerdir. Bu projeler, izlenebilirlik, veri güvenliği ve tedarik zinciri şeffaflığı gibi temel sorunlara blok zincir temelli çözümler geliştirilmesinin mümkün olduğunu göstermiştir (Chronicled 2023; IBM 2020).

2020 yılında Ethereum topluluğu tarafından başlatılan Ethereum 2.0 güncellemesi, enerji tüketimi yüksek olan iş ispatı (Proof of Work) mekanizmasından hisse ispatı (Proof of Stake) sistemine geçişi içeren büyük bir yapısal dönüşüm olmuştur. Bu gelişme, blok zincirin sürdürülebilirlik ve ölçeklenebilirlik sorunlarına yanıt arayan ikinci nesil çözümlerinin önünü açmış; aynı zamanda akıllı sözleşme uygulamalarının daha verimli çalışmasına olanak sağlamıştır (Asif ve Hassan, 2023).

2021 yılında ise blok zincir teknolojisi yalnızca finansal sistemler veya tedarik zincirleriyle sınırlı kalmamış; dijital sanat eserlerinin, mülkiyet haklarının ve kimliklerin temsil edilmesini sağlayan NFT (Non-Fungible Token) altyapısı ile kültürel ve yaratıcı endüstrilere de entegre edilmiştir. Bu gelişme, blok zincirin kullanım alanlarının genişliğini ve toplumsal etki potansiyelini göstermesi bakımından önemli bir dönüm noktasıdır (Rennie vd., 2022).

2023 yılına gelindiğinde ise blok zincir teknolojisinin küresel ölçekte kurumsallaşması yönünde önemli bir adım atılmıştır. Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) tarafından yürütülen ISO/TC 307 süreci kapsamında, blok zincir sistemlerinin teknik tanımları,

güvenlik standartları ve birlikte çalışabilirlik kuralları tanımlanarak ilk defa uluslararası düzeyde standardize edilmiştir. Bu gelişme, teknolojinin yaygın kabul görmesi, hukuki güvenlik kazanması ve kamu-özel sektör iş birliklerinde daha sağlam zemine oturması açısından dönüm noktası niteliğindedir (ISO, 2024).

Blok zincir teknolojisinin tarihsel gelişimini anlamak hem kavramsal temellerin hem de uygulama pratiklerinin hangi aşamalardan geçerek bugünkü hâlini aldığını ortaya koymak açısından önemlidir. Bu bağlamda, Tablo 3.1 teknolojinin evrim sürecinde öne çıkan kuramsal ve teknik katkıları yıllara göre özetlemektedir.

Tablo 3.1. *Blok zincir teknolojisinin kavramsal gelişimi ve sektörel uygulamalara evrimi*

Yıl	Gelişme ve Kavramsal Katkı	Kaynak
1982	Dağıtık Ortamlarda Bizans Hata Toleransı Problemi Tanımlandı. Bu Çalışma, Merkeziyetsiz Ağlarda Güvenilir Mutabakatın Zorluklarını Ortaya Koydu.	(Lamport vd., 1982)
1991	Dijital Zaman Damgası Zinciri Önerildi. Kriptografik Özetlerin Birbirine Bağlanarak Kayıt Bütünlüğünün Korunabileceği Gösterildi.	(Haber ve Stornetta, 1991)
1998	B-Money Kavramı Ortaya Atıldı. Wei Dai, Merkeziyetsiz ve Kriptografik Olarak Güvenli Dijital Para Sistemini Önerdi.	Dai, 1998
2008	Bitcoin White Paper Yayımlandı. Blok Zinciri Tabanlı İlk Elektronik Nakit Sistemi Kavramsallaştırıldı; İş Kanıtı ile Çift Harcama Sorunu Çözüldü.	(Nakamoto, 2008)
2009	Bitcoin Ağı Başlatıldı. İlk Blok (Genesis) Oluşturularak Kriptopara Kavramı Fiilen Uygulamaya Geçti.	(Nakamoto, 2008)
2012	Hisse İspatı (Proof of Stake) Konsepti Önerildi. Bitcoin'in Enerji Tüketen İş İspatına Alternatif Olarak Varlık Miktarına Dayalı Bir Blok Oluşturma Yöntemi Sunuldu.	(King ve Nadal, 2012)
2014	Ethereum Platformu Tanıtıldı. Blok Zincir 2.0 Dönemine Geçilerek Turing-Tam Akıllı Sözleşmelerin Çalıştırılmasına Olanak Sağlandı.	(Buterin, 2014)
2015	Hyperledger Projesi Başlatıldı. Kurumsal Blok Zincirler İçin Açık Kaynaklı ve Modüler Bir Çerçeve Oluşturuldu.	(Androulaki vd.,2018).
2017	Mediledger ve IBM Blockchain Projeleri Geliştirildi. İlaç ve Lojistik Sektörlerinde Blok Zincir Uygulamaları Hayata Geçirildi.	(Chronicled 2023; IBM 2020)
2020	Ethereum 2.0 Geçişi Başlatıldı. İş İspatından Hisse İspatına Geçilerek Daha Ölçeklenebilir ve Enerji Verimli Bir Yapıya Geçildi.	(Asif ve Hassan, 2023).
2021	NFT Uygulamaları Yaygınlaştı. Blok Zincir; Dijital Kimlik, Sanat ve Mülkiyet Gibi Alanlara Entegre Edildi.	(Rennie vd., 2022).
2023	ISO/T.C. 307 Süreci Tamamlandı. Blok Zincir Teknolojilerine Yönelik İlk Uluslararası Teknik Standartlar Belirlendi.	(ISO, 2024).

Kaynak: Tablo yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 3.1 incelendiğinde, blok zincir teknolojisinin yalnızca teknik bir inovasyon değil, aynı zamanda çeşitli sektörlere uyarlanabilir dinamik bir sistem olarak geliştiği görülmektedir. Bu tarihsel birikim, teknolojinin bugünkü yaygınlığına ve stratejik önemine ışık tutmaktadır.

1980'lerde dağıtık sistemler literatüründe tanımlanan Bizans Generalleri Problemi (Lamport vd., 1982), güvenilir merkezi olmayan mutabakatın zorluğunu ortaya koymuştur ve bu problem, blok zincir gibi güvenilirlik gerektiren dağıtık sistemlerin temelinde yatan kuramsal bir meydan okumadır. 1991'de Haber ve Stornetta'nın dijital kayıtları mühürleme yöntemi, günümüz blok zincirlerinin kullandığı hash bağlama tekniğinin erken bir prototipi olarak görülebilir.

2008'deki Bitcoin devrimi, önceki tüm fikirleri bir araya getirerek gerçek dünyada çalışan ilk blok zincirini tanımlamıştır. Bitcoin'in tasarımında Hashcash adlı iş ispatı mekanizmasının uyarlanması (Back, 2002:4) ve kriptografik imzaların kullanımı, önceki çalışmaların somut bir uygulamaya dönüştürülmesi olarak değerlendirilebilir. Bitcoin ile başlayan Blok Zincir 1.0 dönemi, sadece kriptoparalara odaklanmıştır (Swan, 2015:5).

2014 sonrası Ethereum ile başlayan Blok Zincir 2.0 dönemi; akıllı sözleşmeler, merkeziyetsiz uygulamalar ve sektör uyarlamalarıyla yeni bir aşamayı temsil etmiş; 2020 sonrası gelişmeler ise teknolojinin kurumsallaşması, çeşitlenmesi ve sürdürülebilirliği esas alan olgunluk dönemine işaret etmiştir.

Tüm bu tarihsel gelişmeler, blok zincir teknolojisinin yalnızca geçici bir yenilik değil, yapısal dönüşüm potansiyeline sahip bir paradigma değişimi olduğunu göstermektedir. Gelişen uygulama alanları, uluslararası standartlaşma girişimleri ve kamu-özel sektör iş birlikleri dikkate alındığında, bu teknolojinin önümüzdeki yıllarda daha da olgunlaşarak çeşitli sektörlerde derinleşeceği öngörülmektedir.

Blok zincirin tarihsel gelişimi, teknolojiye yön veren birçok teorik ve pratik katkının bir araya gelmesiyle şekillenmiştir. Ancak bu teknolojinin işleyişini ve uygulama gücünü anlayabilmek için sadece tarihsel değil, aynı zamanda teknik düzeyde de kavramsal bir çözümleme yapmak gerekmektedir. Bu nedenle bir sonraki bölümde blok zincir teknolojisinin temel bileşenleri ve işleyiş mantığı detaylı olarak ele alınacaktır.

3.2. Blok Zincir Teknolojisinin Tanımı ve Temel Kavramları

Blok zincir teknolojisi, temelde kriptografik yöntemlerle güvence altına alınmış, değiştirilemez ve dağıtık bir defter yapısı üzerinden işlem kayıtlarının tutulmasını sağlayan dijital bir sistemdir. Bu teknoloji, merkezi bir otoriteye ihtiyaç duymadan çalışan, işlem kayıtlarının tüm ağ katılımcıları tarafından eş zamanlı olarak doğrulandığı ve şeffaf biçimde saklandığı bir yapıya sahiptir (Yaga vd., 2018). Her bir katılımcı (düğüm), yeni verilerin doğruluğunu belirli bir mutabakat mekanizması aracılığıyla

kontrol eder ve yalnızca doğrulanan işlemler bloklar hâlinde deftere eklenir. Bu yönüyle blok zincir, geleneksel merkezi kayıt sistemlerinden radikal biçimde ayrılmakta ve çok aktörlü dijital ortamlarda güvenin, kod, kriptografi ve dağıtık mutabakat ilkeleri üzerinden yeniden inşa edilmesine olanak tanımaktadır. İlk olarak 2008 yılında Satoshi Nakamoto takma adını kullanan bir kişi ya da grup tarafından geliştirilen Bitcoin ağı ile somut bir örneğe kavuşan bu teknoloji, dijital varlıkların taraflar arasında doğrudan ve güvenli biçimde transferini mümkün kılan bir veri mimarisi olarak tasarlanmıştır (Narayanan vd., 2016).

Literatürde farklı disiplinlerden gelen tanımlar da blok zincirin çok boyutlu yapısını desteklemektedir. Schatsky vd., (2018) blok zinciri, veri bütünlüğünü garanti altına alan ve katılımcılar arasında güveni yazılı kurallar yerine algoritmik mutabakatla sağlayan bir dağıtık kayıt yapısı olarak tanımlamıştır. Tapscott ve Tapscott (2016), teknolojiyi yalnızca teknik bir yenilik olarak değil, aynı zamanda ekonomik ve yönetişimsel dönüşümün altyapısı olarak değerlendirmekte ve blok zinciri "şeffaf, değiştirilemez ve merkeziyetsiz bir dijital kayıt defteri" olarak ifade etmektedir. Nofer vd. (2017) ise blok zinciri, bilginin eşler arası ağlarda merkezi bir otoriteye ihtiyaç duyulmaksızın güvenli şekilde paylaşılmasına imkân tanıyan sistematik bir mimari olarak tanımlamıştır.

Bu kavramsal çerçeve doğrultusunda, blok zincir teknolojisinin yapı taşlarından biri olan dağıtık defter teknolojisi kavramsal temelleriyle birlikte açıklanacaktır.

3.2.1. Dağıtık Defter Teknolojisi (Distributed Ledger Technology)

Blok zincir dijital ortamda gerçekleşen işlemlerin dağıtık bir şekilde kaydedilmesini sağlayan yenilikçi bir veri tabanı teknolojisidir. Daha geniş bir kavram olan dağıtık defter teknolojisi içinde yer alır; yani blok zincir dağıtık defter teknolojisi'nin bir alt türü olarak düşünülebilir.

Blok zincir, dağıtık defter teknolojisi (DLT) kapsamında değerlendirilen bir yaklaşım olup geleneksel veritabanlarından farklı olarak verilerin tek bir merkezde saklanmaması ve çoğaltılmış kayıtların ağ genelinde paylaşılması fikrine dayanır. Bu modelde, ağdaki her katılımcı bir defter kopyası tutar. Böylelikle herhangi bir düğümde yaşanan hata veya kötü niyetli eylem, tüm sistemi çökertmez (Zheng vd., 2017). Bu yapı, güvenliğin merkezi güvene değil, ağ üzerindeki çoğul doğrulamalara dayandırılmasını sağlar.

Merkezi sistemlerde tüm kayıtların tutulması ve doğrulanmasından tek bir sunucu ya da otorite sorumludur; bu yapıda arıza ya da saldırı durumunda tüm sistem işlevsiz kalabilir.

Buna karşılık DLT tabanlı sistemlerde veriler ağ üzerindeki düğümlerde çoklu kopyalar halinde saklanır ve işlemlerin geçerliliği, mutabakat mekanizmalarıyla (Proof of Work veya Proof of Stake) sağlanır. Bu dağıtık yapı, tek bir hata noktasına bağlı kalmaksızın yüksek erişilebilirlik, veri bütünlüğü ve güvenilirlik sağlar (Natarajan vd., 2017).

3.2.2. Blok Yapısı ve Hash Fonksiyonları

Blok zincir, adından da anlaşılacağı üzere "blok" adı verilen veri paketlerinin sıralı biçimde birbirine eklenmesiyle oluşan zincir yapısına sahip bir sistemdir. Her bir blok belirli sayıda işlem kaydını içerir ve bloklar, zaman damgası ve referans yapılarıyla kronolojik olarak birbirine bağlanır. Yeni bir blok eklendikçe zincir uzar ve ilk işlemden itibaren tüm işlemleri kapsayan dağıtık bir defter oluşur (Nofer vd., 2017:184).

Bu zincir yapısını sürdürülebilir ve güvenilir kılan temel mekanizma, kriptografik hash fonksiyonlarıdır. Her blok hem kendi içerdiği işlem verilerinden hem de bir önceki bloğun özet değerinden (hash) türetilmiş benzersiz bir özet içerir. Bu özet, SHA-256 gibi birbiriyle aynı özet değeri üretmeleri son derece düşük olasılık olan ve tek yönlü algoritmalar aracılığıyla hesaplanır. Her blok, kendisinden önce gelen bloğun hash değerini içerdiğinden, bloklar arasında güçlü ve doğrulanabilir bir kriptografik bağlantı kurulur. Böylece zincirin herhangi bir noktasında yapılacak en ufak bir değişiklik, ilgili bloğun hash'ini değiştirir ve bu değişiklik zincirin geri kalanında da hash tutarsızlıklarına yol açar. Dolayısıyla, zincirin bütünlüğü bozulur ve bu durum yalnızca değişiklik yapılan bloğu değil, onu izleyen tüm blokları geçersiz kılar (Narayanan vd., 2016; Antonopoulos, 2014). Bu yapı, sistemin değiştirilemezlik özelliğini ortaya koyar. Blok zincirdeki kayıtlar yalnızca ileriye dönük eklenebilir ve geriye dönük olarak değiştirilmesi pratikte mümkün değildir. Her blok, yapısal olarak üç temel bileşenden oluşmaktadır (Yaga vd., 2018):

1. İşlem Verileri (Transaction Data): Blok içerisinde yer alan, kullanıcılar arasında gerçekleşen işlemlerin kayıtlarını ya da yürütülmesi planlanan akıllı sözleşmelere ilişkin komut ve parametreleri içerir.
2. Önceki Blokun Özet Değeri (Previous Block Hash): Zincirdeki bütünlüğü sağlayan bu alan, bir önceki bloğa ait kriptografik özet bilgiyi barındırır. Böylece her blok, kendisinden önce gelen bloğa referans verir ve bloklar arasındaki bağlantı kurulmuş olur.
3. Zaman Damgası ve Diğer Meta Veriler (Timestamp and Metadata): Bloğun oluşturulduğu tarih ve saat gibi zaman bilgilerini içerir. Buna ek olarak, nonce (rastgele

sayı), blok versiyonu ve hedef zorluk seviyesi gibi madencilik sürecine ilişkin sistemsel parametreler de bu kısımda yer alabilir.

Şekil 3.1'de, blok zincir sisteminde yer alan blokların yapısı ve aralarındaki bağlantı şematik olarak gösterilmektedir. Her bir blok; kendine özgü işlem verileri, bir önceki bloğun hash değeri, nonce gibi sistemsel parametreler ve Merkle kökü gibi özet veriler içermektedir. Bloklar, önceki bloğun hash değeriyle birbirine bağlanarak değiştirilemez ve doğrulanabilir bir zincir oluşturur. Bu yapı, sistemin bütünlüğünü ve güvenliğini sağlayan temel mekanizmadır.

Şekil 3.1. *Blok zincir yapısı (Bapatla, 2024)*



3.2.3. Düğümler (Nodes) ve Ağ Yapısı

Blok zincir teknolojisinin temel unsurlarından biri, işlemlerin eşler arası (Peer-to-Peer, P2P) bir ağ üzerinde gerçekleştirilmesidir. Bu yapı, her katılımcının hem istemci hem de sunucu işlevi üstlenmesini mümkün kılarak merkezi bir otoriteye olan bağımlılığı ortadan kaldırır. Ağdaki tüm katılımcılar doğrudan birbirleriyle iletişim kurar ve veri alışverişi yapar. Böylece merkezi bir sunucuya veya aracıya ihtiyaç duyulmaz. Her düğüm, blok zincir protokolündeki kuralları izleyerek yeni blokları ve işlemleri ağa iletir. Bu dağıtık iletişim modeli hem verilerin çoğaltılmış biçimde saklanmasını hem de ağ bütünlüğünün tekil bir hata noktasına bağlı olmaksızın korunmasını sağlar (Swan, 2015).

Ağ üzerinde görev alan düğümler, üstlendikleri işlevlere göre farklı türlere ayrılır (Franco, 2014:44-46):

- Tam Düğümler (Full Nodes)

Blok zincirin tamamını (tüm bloklar ve işlemler) eksiksiz bir şekilde saklayarak ağın kurallarına uygunluk denetimini yapar. Bu düğümler, yeni eklenen blokların geçerliliğini

kontrol ederek zincirin doğruluğunu ve tutarlılığını sağlar. Bitcoin gibi sistemlerde tam düğümler, ağın güvenliğini sağlayan omurgayı oluşturur.

- Hafif Düğümler (Lightweight Nodes)

Blok zincir verilerinin yalnızca belirli bir özetini (örneğin blok başlıklarını) tutar ve işlemlerin doğrulanması için tam düğümlere güvenir. Bu yapı sayesinde sınırlı işlemci gücü ve depolama alanına sahip cihazlar (mobil telefonlar vb.), ağa düşük maliyetle katılabilir.

- Madenciler (Miner Nodes)

Bu düğümler, ağdaki işlem havuzundan aldıkları işlemleri bir araya getirerek yeni bir blok oluşturur. Konsensüs mekanizmasına bağlı olarak, örneğin İş İspatı (Proof of Work) sürecinde kriptografik bulmacaları çözerek, oluşturdukları bloğu zincire eklemeye çalışırlar. Bu işlem, aynı zamanda işlem doğrulama ve güvenlik katmanını da temsil eder.

Blok zincirin P2P ağ modeli, katılımcı düğümlerin mutabakata dayalı birlikte çalışmasına dayanır ve böylece herhangi bir merkezi otorite olmaksızın güvenilir bir işlem kayıt sistemi oluşur. Her yeni işlem ağa yayınlandığında, düğümler tarafından alınır ve geçerlilik denetiminden geçtikten sonra uygun bir bloğun içerisine yerleştirilerek kalıcı hale gelir. Ağdaki düğüm sayısının artması, yalnızca işlem kapasitesini değil; aynı zamanda saldırılara karşı dayanıklılığı ve sistemin güvenlik eşiğini de yükseltmektedir.

3.2.4. Konsensüs (Mutabakat) Mekanizmaları

Dağıtık blok zincir ağlarında, her katılımcının ortak bir karara varabilmesi kritik önem taşır. Çünkü eklenen her yeni bloğun veya onaylanan her işlemin güvenilirliğini sağlamak, tüm ağın aynı defter üzerinde uzlaşmasını gerektirir. Bu uzlaşma süreci, "konsensüs algoritmaları" aracılığıyla yürütülür ve ağın güvenlik, işlem hızı ve enerji verimliliği gibi performans boyutlarını doğrudan etkiler. Bu amaçla, farklı blok zincir projelerinde çeşitli konsensüs algoritmaları kullanılmaktadır. Aşağıda, en yaygın üç temel konsensüs yönteminin ana hatları sunulmaktadır.

1. İş İspatı (Proof of Work, PoW): PoW, ilk olarak Bitcoin tarafından popüler hâle getirilen ve blok zincirlerinde en yaygın kullanılan konsensüs mekanizmalarından biridir. Bu yöntemde madenci düğümler, yeni bir blok eklemek için zorlu bir matematiksel bulmacayı (kriptografik hash) çözmek zorundadır. Doğru çözümü bulan madenci, yeni bloğu ağa ekleme hakkı kazanır ve belirli bir ödülle teşvik edilir.

Ardından bu blok, ağdaki diğer düğümler tarafından doğrulanarak zincire kalıcı biçimde eklenir. Madencilik işlemi yüksek hesaplama gücü gerektirdiğinden, saldırganın sahte bir zinciri kabul ettirebilmesi için toplam hesap gücünün büyük kısmını (ör. %51'den fazlasını) ele geçirmesi gerekir (Mittal vd., 2020). Aşağıda PoW'un avantajları ve dezavantajları özetlenmiştir. (Pilkington, 2016).

Avantajları:

- Güvenliği yüksek seviyede sağlar; saldırganın başarılı olabilmesi için ağdaki toplam hesap gücünün çoğunu ele geçirmesi gerekir.
- Tamamen anonim ve birbirine güvenmeyen düğümler arasında dahi tutarlı bir defter oluşturabilir.

Dezavantajları:

- Yüksek elektrik tüketimi ve özel donanım gereksinimi, PoW'un enerji verimliliğini düşürür.
- İşlem hızı görece yavaştır; örneğin Bitcoin ağı, saniyede yalnızca birkaç işlemi (yaklaşık 7 işlem/sn) onaylayabilir.

Bu yapı, PoW ağlarında güvenliği sağlam bir zemine oturturken, enerji tüketimi ve ölçeklenebilirlik gibi konularda tartışmalara neden olmaktadır. Özellikle büyük madencilik havuzlarının (mining pools) toplam hesap gücünün önemli bir kısmını elinde bulundurabilmesi, ağın merkeziyetçilik düzeyine ilişkin endişeleri artırmaktadır. Buna rağmen PoW, basitliği ve uzun yıllara dayanan test edilmişliği nedeniyle hâlâ birçok kripto para projesinde tercih edilmektedir (Nguyen ve Kim, 2018:106).

2. Hisse İspatı (Proof of Stake, PoS): PoS algoritması, PoW'un yüksek enerji tüketimine alternatif olarak geliştirilmiştir. Bu yöntemde yeni blok oluşturma hakkı, madencilerin hesap gücüne göre değil ellerindeki hisseye (örneğin cüzdanlarındaki kripto para miktarına) göre belirlenir. Ağı güvence altına alan katılımcılar, sahip oldukları varlık oranında blok üretme veya doğrulama şansı elde eder. Bu yaklaşım, enerji verimliliğini artırır çünkü karmaşık matematiksel problemler çözülmez. Bunun yerine, blok üreticileri bir seçim algoritmasıyla belirlenir (Monrat vd., 2019:2).

Avantajları:

- PoW'a kıyasla çok daha düşük elektrik tüketimi sağlar.

- Özel donanım gerektirmediği için daha erişilebilir ve sürdürülebilirdir.

Dezavantajları:

- "Nothing at Stake" sorunu: Katılımcılar maliyet üstlenmeden birden fazla zincirde oy kullanabilir.
- Büyük miktarda varlığa sahip olan doğrulayıcıların sürekli ödül kazanması, zenginlerin daha da güçlenmesine neden olabilir.

Bu sorunları azaltmak için çeşitli PoS varyasyonları (örneğin coin kilitleme süreleri, rastgele seçim mekanizmaları) geliştirilmiştir. Hisse ispatı ilk olarak Peercoin (PPCoin) gibi erken dönem projelerde uygulanmış; günümüzde Ethereum 2.0, Cardano gibi platformlarda benimsenmiştir.

3. Pratik Bizans Hata Toleransı (Practical Byzantine Fault Tolerance, PBFT): PBFT, genellikle izinli (kapalı) blok zinciri ağlarında kullanılan bir konsensüs algoritmasıdır. Bu ağlarda kimlikler bilinir ve doğrulayıcı düğüm sayısı göreceli olarak sınırlıdır. PBFT, bir "Bizans Hata Toleransı" yaklaşımı sunar; yani ağdaki bazı düğümler kötü niyetli veya hatalı davransa dahi sistemin doğru bir karara ulaşabilmesini amaçlar. Algoritmaya göre, toplam düğüm sayısının üçte birine kadar olan bozulmalar sistemin çalışmasını engellemez. (Castro ve Liskov, 1999).

Bu yöntemde lider düğüm, gelen işlem taleplerini derleyerek bir blok önerisi oluşturur ve bunu doğrulayıcı düğümlerin değerlendirmesine sunar. Doğrulayıcılar, önerilen bloğu birbirleriyle iletişime geçerek ve protokole uygun biçimde değerlendirir. Gerekli oybirliği sağlandığında, blok geçerli sayılır ve zincire eklenir.

Avantajları:

- Enerji tüketimi düşüktür; PoW gibi kaynak yoğun süreçler gerektirmez.
- İşlem kesinliği (finality) çok hızlıdır; genellikle saniyeler içinde doğrulama tamamlanır.

Dezavantajları:

- Düğüm sayısı arttıkça iletişim maliyeti üssel olarak artar.
- Yüksek ölçeklenebilirlik gerektiren kamu ağları için uygun değildir.

PBFT ve benzeri algoritmalar, Hyperledger Fabric gibi kurumsal platformlarda kullanılır. Bu sistemler, hızlı işlem onayı, düşük gecikme ve yüksek işlem kapasitesi gerektiren kapalı blok zincirleri için idealdir (Sukhwani vd., 2017:253).

Her blok zinciri ağı, yukarıdaki konsensüs algoritmalarından birini veya türevlerini kullanarak güvenliği ve bütünlüğü sağlar. Örneğin Bitcoin ve Ethereum iş ispatını kullanırken, yeni nesil Ethereum ağı ve Cardano gibi platformlar hisse ispatına geçiş yapmıştır. Bazı kurumsal veya konsorsiyum blok zincirleri ise PBFT veya RAFT gibi klasik konsensüs algoritmalarını tercih eder. Sonuç olarak, konsensüs algoritmaları blok zincirin kalbinde yer alır ve dağıtık ağdaki tüm tarafların güvenilir, tutarlı ve senkronize bir defter üzerinde uzlaşmasını mümkün kılar.

3.2.5. Akıllı Sözleşmeler (Smart Contracts)

Blok zincir teknolojisinin öne çıkan yenilikçi uygulama alanlarından biri akıllı sözleşmelerdir. İlk kez 1990'larda Nick Szabo tarafından kavramsal olarak ortaya atılan bu yapı, sözleşme ilişkilerinin yazılım kodu aracılığıyla otomatik biçimde yürütülmesini öngörmektedir. Blok zincir teknolojisinin gelişimiyle birlikte bu kavram, özellikle dağıtık ve güvenilir veri yapılarıyla birleşerek pratikte uygulanabilir bir çözüm haline gelmiştir (Nofer vd., 2017).

Akıllı sözleşmeler, belirli koşullar sağlandığında kendiliğinden devreye giren ve işlemleri insan müdahalesine gerek olmadan gerçekleştiren programlanabilir kod parçalarıdır (Isda, 2017). Örneğin, bir hizmetin sağlanması durumunda otomatik olarak ödeme yapılmasını sağlayan bir akıllı sözleşme, taraflar arasında güven ihtiyacını minimize eder. Kodun blok zincir üzerinde çalışıyor olması, bu sözleşmelerin değiştirilemez, şeffaf ve herkes tarafından doğrulanabilir biçimde yürütülmesini mümkün kılar. Christidis ve Devetsikiotis'e (2016) göre akıllı sözleşmeler, çok adımlı işlemlerin otomasyonuna olanak tanıyan ve blok zinciri üzerinde barınan kendi kendini yürüten komut dosyalarıdır.

Teknik açıdan bakıldığında, akıllı sözleşmeler blok zincir ağındaki tüm düğümler üzerinde saklanan ve çalıştırılan dağıtık yazılım bileşenleridir. Bu sözleşmelere blok zincir üzerinde benzersiz bir adres atanır ve kullanıcılar bu adrese gönderilen işlemlerle sözleşme fonksiyonlarını tetikler (Wang vd., 2019). İşlemler, Ethereum gibi platformlarda Ethereum Sanal Makinesi tarafından yürütülür ve tüm düğümler, bu işlemleri deterministik biçimde çalıştırarak aynı sonucu üretir. Böylece ağ üzerinde işlem

doğruluğu sağlanır ve merkezi bir otoriteye ihtiyaç kalmadan güvenli bir şekilde işlem yapılabilir (Hu vd., 2021).

Akıllı sözleşmelerin uygulama biçimi, blok zincir ağının yapısına göre değişiklik göstermektedir. Halka açık blok zincirlerde sözleşmelerin yürütülmesi işlem ücretine (gas) tabidir. Buna karşın Hyperledger Fabric gibi izinli blok zincir ağlarında akıllı sözleşmeler, "zincir kodu (chaincode)" olarak adlandırılır ve yalnızca yetkilendirilmiş katılımcılar arasında, işlem ücreti olmaksızın çalıştırılır. Bu yapı, özellikle kurumlar arası sistemlerde daha kontrollü ve gizliliğe duyarlı bir uygulama ortamı sunmaktadır.

Tüm bu özellikleriyle akıllı sözleşmeler; finans, tedarik zinciri yönetimi, sigorta, dijital kimlik doğrulama, mülkiyet hakları ve kamu hizmetleri gibi birçok alanda otomasyon, güvenlik ve maliyet avantajı sağlayan stratejik bir bileşen haline gelmiştir (Zheng vd., 2020). Hem süreçleri hızlandırması hem de taraflar arasında güveni kod üzerinden tesis etmesi, onu blok zincir tabanlı sistemlerin temel yapı taşlarından biri hâline getirmektedir.

3.2.6. İzinli ve İzinsiz Blok Zincirleri

Blok zincir teknolojisi uygulamaları, ağ yapısına ve katılımcıların erişim düzeyine göre iki ana kategoriye ayrılmaktadır: izinli ve izinsiz blok zincirler. Bu ayrım, sistemin yönetişim biçimini, güvenlik düzeyini ve işlem maliyetlerini doğrudan etkileyen yapısal bir fark yaratır.

İzinsiz (Halka Açık) Blok Zincirler: İzinsiz blok zincir ağları, internete erişimi olan herkesin katılımına açık, tamamen dağıtık ve merkeziyetsiz sistemlerdir. Bu ağlarda kullanıcılar anonim ya da takma adlarla işlem gerçekleştirebilir, verileri okuyabilir ve konsensüs süreçlerine katkıda bulunabilirler. Bitcoin ve Ethereum gibi halka açık kripto para platformları bu kategoriye örnektir. İzinsiz blok zincirlerde merkezi bir otorite bulunmadığından, ağın güvenliği ve tutarlılığı PoW veya PoS gibi konsensüs algoritmalarıyla sağlanır. Bu ağların avantajları arasında dış müdahaleye karşı yüksek direnç, açık katılım, yüksek şeffaflık ve küresel birlikte çalışabilirlik yer alır. Ancak buna karşılık yüksek enerji tüketimi, düşük işlem hızı ve sınırlı ölçeklenebilirlik gibi teknik zorluklar söz konusudur (Bakos ve Halaburda, 2021).

İzinli (Özel) Blok Zincirler: İzinli blok zincir ağları, yalnızca kimliği doğrulanmış ve yetkilendirilmiş katılımcıların erişimine açık olan, erişim haklarının merkezi bir otorite veya konsorsiyum tarafından yönetildiği sistemlerdir. Bu ağlarda hem veri okuma/yazma işlemleri hem de konsensüs süreçlerine katılım, sistem yöneticisi tarafından belirlenmiş

kullanıcılarla sınırlıdır. Katılımcıların önceden biliniyor olması, sistem güvenliğinin daha az kaynak tüketen, iletişim protokollerine dayalı mutabakat algoritmalarıyla sağlanmasına olanak tanır. Bu kapsamda özellikle PBFT, RAFT ve çeşitli oylama temelli yaklaşımlar yaygın biçimde tercih edilmektedir (Sukhwani vd., 2017).

Günümüzde birçok kurumsal düzeyde geliştirilen izinli blok zincir platformu, güvenlik, performans ve düzenleyici uyumluluk açısından özelleştirilebilir yapılar sunmaktadır. Bu platformlar genellikle yetki bazlı erişim kontrolleri, katmanlı kimlik doğrulama sistemleri, gizli veri kanalları ve modüler mimari bileşenler aracılığıyla kurumsal ihtiyaçlara göre yapılandırılabilmektedir. Özellikle veri bütünlüğünün korunması, işlem doğruluğunun hızlı şekilde sağlanması ve hassas bilgilerin sadece yetkilendirilmiş taraflar arasında paylaşılması gibi gereksinimler doğrultusunda izinli mimariler, açık blok zincir ağlarına göre daha kontrollü ve uyarlanabilir çözümler sunmaktadır (Nasir vd., 2024).

Ayrıca, izinli blok zincir sistemleri, erişim haklarının merkezi bir otorite veya konsorsiyum tarafından kontrol edilmesi nedeniyle, blok zincirin temel ilkelerinden biri olan tam merkeziyetsizlikten belirli ölçüde uzaklaşmaktadır. Bu durum, sistem güvenliğinin ağ algoritmalarından ziyade yönetişim politikalarına dayalı olarak sağlanmasını gerektirir (Liu vd., 2022). Ancak bu yapı, özellikle regülasyona tabi sektörlerde hesap verebilirliği ve veri denetimini mümkün kıldığı için, bilinçli bir tercih olarak değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak, bir blok zincir sisteminin izinli mi yoksa izinsiz mi olacağı; kullanım senaryosuna, güvenlik ihtiyaçlarına, veri paylaşımı düzeyine ve düzenleyici çerçeveye bağlı olarak belirlenmelidir. Kamuya açık, şeffaf ve katılıma açık ağ yapıları için izinsiz blok zincirler tercih edilirken; veri gizliliği, işlem performansı ve yetki kontrolünün ön planda olduğu durumlarda izinli blok zincirler daha uygun bir çözüm sunmaktadır.

3.2.7. Token Kavramı, Kripto Varlıklar

Blok zincir teknolojisinin getirdiği en önemli yeniliklerden biri, dijital varlıkları temsil eden ve güvenli biçimde transfer edilebilen token (jeton) kavramıdır. Tokenlar, blok zincir platformları üzerinde oluşturulan; dijital ortamda bir değer, hak veya varlığı simgeleyen programlanabilir dijital birimlerdir (Schär, 2021:157). Bu terim, genellikle Bitcoin ve Ethereum gibi kripto para birimlerinin birimlerini ifade etmek için kullanılsa da daha geniş anlamda gerçek dünya varlıklarının veya haklarının dijital temsili olarak da tanımlanabilir.

Örneğin Ethereum platformu, ERC-20 gibi standartlar aracılığıyla kullanıcıların kendi tokenlarını üretmelerine ve bunları blok zincir üzerinde dağıtmalarına olanak sağlamaktadır. Bu olanak sayesinde tokenlar; geleneksel finans araçları, fiziksel varlıklar, menkul kıymetler, oy kullanma hakları ve erişim yetkileri gibi çeşitli değerleri dijital ortamda temsil edebilir hale gelmiştir (Cong vd., 2018).

Tokenlaştırma kavramı ise fiziksel veya dijital bir varlığın blok zincir üzerinde dijital token biçiminde temsil edilerek saklanması ve transfer edilmesi sürecini ifade eder. Bu süreç, varlıkların daha bölünebilir, taşınabilir ve izlenebilir hale gelmesini sağlayarak; geleneksel finans sistemlerinde mümkün olmayan yeni ekonomik modellerin ve iş yapış biçimlerinin önünü açmaktadır. Tokenlaştırılmış varlıklar, sahiplik ilişkileri ve işlem geçmişi açısından tamamen şeffaf ve blok zincir üzerinde izlenebilir bir yapı sunar (Cong vd., 2021).

Kripto varlıklar (crypto assets) ise blok zincir üzerinde oluşturulan tüm dijital varlıkları kapsayan daha geniş bir üst kavramdır. Başlangıçta yalnızca Bitcoin ve Ethereum gibi kripto para birimlerini ifade eden bu kavram, zamanla dijital sanat eserlerini temsil eden değiştirilemez tokenlar (NFT), oyun içi varlıklar, dijital sertifikalar ve hizmetlere erişim hakları gibi çok çeşitli kullanım alanlarını da içerecek şekilde genişlemiştir (Kim vd., 2018). Kripto varlıklar, merkezi bir otoriteye bağlı olmaksızın kullanıcılar arasında doğrudan ve güvenli biçimde transfer edilebilir. Bu sayede, geleneksel finansal sistemlere kıyasla daha şeffaf, hızlı ve düşük maliyetli çözümler sunma potansiyeline sahiptir.

Sonuç olarak hem token kavramı hem de kripto varlık yapısı, blok zincir teknolojisinin yalnızca bir veri kayıt sistemi olmaktan çıkıp, dijital ekonominin altyapısını oluşturan bir değer aktarım katmanına dönüşmesini mümkün kılmıştır. Bu kavramlar, dijital sahiplik, finansal sistemlerin yeniden şekillenmesi ve merkeziyetsiz iş modellerinin geliştirilmesi açısından stratejik öneme sahiptir.

Bu bölümde blok zincir teknolojisinin temel kavramları, tarihsel gelişiminden dağıtık defter yapısına, mutabakat mekanizmalarından akıllı sözleşmelere, izinli ve izinsiz ağ mimarilerine kadar çok boyutlu bir yapıda ele alınmıştır. Kavramsal çeşitliliğin bu denli yüksek olduğu bir sistemin anlaşılabilirliği açısından, anahtar terimlerin teknik tanımlarının ve sistem içindeki işlevlerinin bütüncül biçimde özetlenmesi önem arz etmektedir. Aşağıda sunulan tablo 3.2, blok zincir teknolojisinin yapı taşlarını oluşturan

bu kavramları karşılaştırmalı bir bakış açısıyla derlemekte ve her bir bileşenin sistemdeki rolünü açıklığa kavuşturmaktadır.

Tablo 3.2. *Blok zincir teknolojisinin temel kavramları ve sistem içindeki işlevleri*

Kavram	Tanım	Blok Zincir Sistemindeki Rolü / Önemi
Blok	Belirli Sayıda İşlemi ve Meta Veriyi İçeren Veri Kapsülüdür.	İşlem Kayıtlarının Yapılandırıldığı Temel Birimdir; Zincirin Sürekliliğini Sağlar.
Hash Fonksiyonu	Verilerden Sabit Uzunlukta, Benzersiz Bir Dijital İz (Özet) Üretir.	Bloklar Arası Bağlantıyı ve Verinin Değiştirilemezliğini Sağlayan Kriptografik Temel Mekanizmadır.
Blok Zinciri	Blokların Kronolojik ve Kriptografik Olarak Birbirine Bağlanmasıyla Oluşan Defter Yapısıdır.	Merkeziyetsiz, Şeffaf ve Güvenilir Bir İşlem Kayıt Altyapısı Oluşturur.
Dağıtık Defter	Verilerin Tek Merkez Yerine Ağdaki Birçok Katılımcı Tarafından Tutulduğu Sistem Mimarisidir.	Verinin Çoğaltılarak Saklanmasını ve Güvenin Ağın Kendisinde İnşa Edilmesini Sağlar.
Konsensüs Mekanizması	Ağ Katılımcılarının Hangi İşlemlerin Geçerli Olduğu Konusunda Ortaklaşmasını Sağlayan Algoritmadır.	Ağın bütünlüğünü sağlar, aynı dijital varlığın birden fazla kez kullanılmasını (çift harcama) önler ve işlem geçerliliğini garanti eder.
Düğüm	Ağa Katılan, Verileri Tutan ve İşlemleri Doğrulayan Bağımsız Cihaz ya da Yazılım Birimidir.	Ağın Dağıtık Doğasını Mümkün Kılar; İşlem Yükünü ve Kontrolü Paylaşır.
Akıllı Sözleşme	Belirli Koşullar Sağlandığında Otomatik Olarak Çalışan Programlanabilir Kodlardır.	İnsan Müdahalesi Olmaksızın İşlem Otomasyonu ve Güvenli Sözleşme Yürütümü Sağlar.
İzinli Blok Zincir	Katılım ve İşlem Doğrulama Süreçlerinin Yetkilendirmeye Tabi Olduğu Ağ Yapısıdır.	Kurumsal Uygulamalarda Gizlilik, Erişim Kontrolü ve Regülasyon Uyumluluğu Sağlar.
İzinsiz Blok Zincir	Herkesin Katılabildiği, Merkeziyetsiz ve Açık Ağ Yapısıdır.	Şeffaflık, Açık Katılım ve Sansüre Karşı Dirençli Yapı Sunar; Kamuya Açık Sistemlerde Tercih Edilir.
Dijital İmza	Kullanıcının Kimliğini ve İşlem Bütünlüğünü Doğrulayan Kriptografik İmzadır.	İşlem Güvenliğini Sağlar; Kimlik Doğrulama ve Veri Bütünlüğü Açısından Temel Bileşendir.

Kaynak: Tablo yazar tarafından Zheng vd. (2018) ve Yaga vd. (2019) çalışmalarından yararlanılarak oluşturulmuştur.

Tablo 3.2'de yer alan kavramlar, blok zincir teknolojisinin işleyiş mantığını oluşturan yapısal unsurların bir arada değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Kavramlar arasında kurulan bu sistematik ilişki, yalnızca teorik altyapının değil, aynı zamanda sonraki bölümlerde incelenecek olan mimari bileşenlerin ve sektörel uygulamaların anlaşılmasında da yol gösterici olacaktır. Bu doğrultuda izleyen bölümde, blok zincir sistemlerinin çok katmanlı yapısı ve teknik bileşenleri ayrıntılı biçimde analiz edilecek; kavramsal düzeyde sunulan bu yapı taşlarının uygulamadaki karşılıkları teknik perspektifle ortaya konacaktır.

3.3. Blok Zincirin Sisteminin Yapısı ve Teknik Bileşenleri

Blok zincir teknolojisi, yalnızca teorik ilkeleri ve işlevsel çıktılarıyla değil, aynı zamanda çok katmanlı teknik yapısıyla da dikkat çeken bütüncül bir sistemdir. Güven, otomasyon

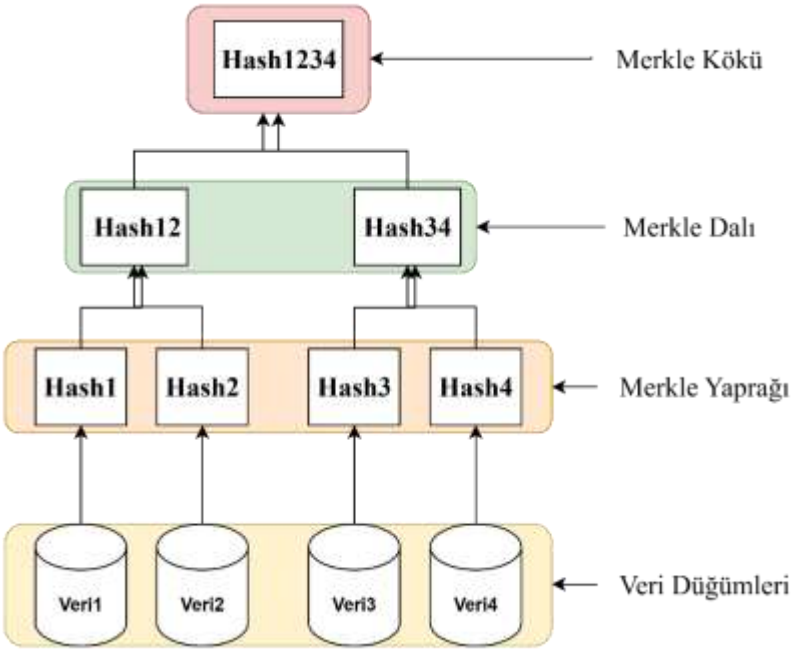
ve veri bütünlüğü gibi temel vaatlerini yerine getirebilmesi, bu mimarinin her bileşeninin senkronize ve güvenli biçimde işlemesine bağlıdır. Bu nedenle, blok zinciri oluşturan teknik yapı taşlarının işlevleri, konumları ve birbirleriyle ilişkileri dikkatle analiz edilmelidir. Bu bölümde blok zincir sisteminin temel bileşenleri, sistem düzeyinde ele alınmaktadır.

3.3.1. Blok Yapısı ve Merkle Ağaçları

Blok yapısının temel veri bileşenleri bağlamında nasıl şekillendiği daha önce açıklanmış olup, bu bölümde söz konusu yapının sistem içindeki teknik işlevi değerlendirilmektedir. Özellikle, işlem kayıtlarının blok içerisinde nasıl yapılandırıldığı ve bu yapıların sistemin bütünlüğüne, doğrulama sürecine ve performansına nasıl katkı sunduğu açıklanmaktadır.

Bloklar içerisinde yer alan işlemler, geleneksel bir liste mantığıyla değil, Merkle ağacı (Merkle Tree) adı verilen hiyerarşik ve kriptografik bir veri yapısı aracılığıyla organize edilir. Bu yapı, her bir işlem verisinin kriptografik özetinin (hash) alınmasını ve ardından bu özetlerin ikili biçimde üst katmanlarda birleştirilerek tek bir kök hash değerine, yani Merkle köküne (Merkle root) ulaşılmasını sağlar. Merkle kökü, blokta yer alan tüm işlem verilerinin bütünlüğünü tek bir özetle temsil eder ve herhangi bir verinin değiştirilip değiştirilmediğinin hızlıca anlaşılmasına imkân tanır (Kuznetsov vd., 2024).

Şekil 3.2. *Merkle ağacı yapısı (Kanstrén, 2021).*



Şekil 3.2'de Merkle ağacının yapısal işleyişi katmanlı biçimde gösterilmektedir. En alt düzeyde yer alan veri düğümleri (Data1–Data4), önce kriptografik özet fonksiyonlarıyla

işlenerek Merkle yaprakları (Hash1–Hash4) elde edilir. Bu yaprak düğümleri daha sonra çiftler hâlinde gruplanarak bir üst katmanda merkle dallarını (örneğin Hash12 ve Hash34) oluşturur. Süreç bu şekilde yukarı doğru devam eder ve en tepedeki Merkle kökü (Hash1234) ile son bulur. Bu kök değer, tüm ağacın temsili olarak blok başlığına yazılır ve o bloktaki işlemlerin değişmediğini garanti eder.

Merkle yapısı sayesinde herhangi bir işlemin doğruluğu, yalnızca o işlemin hash değeri ve birkaç katmanlık özet yoluyla hızlı biçimde doğrulanabilir. Bu yapı, ağdaki tüm işlemlerin yeniden taranmasını gerektirmeksizin veri bütünlüğünün kısmi doğrulama yoluyla kontrol edilmesine olanak tanır. Özellikle yüksek işlem hacmine sahip blok zincir ağlarında, bu doğrulama yöntemi sistemin ölçeklenebilirliğini artırmakta ve doğrulama sürelerini ciddi ölçüde kısaltmaktadır. Bloklar arasında kurulan bu yapı; yalnızca veri saklamayı değil, aynı zamanda geçmiş işlemlerin kriptografik olarak zincirleme biçimde güvenliğini ve geri izlenebilirliğini sağlar. Merkle ağaçlarının teknik düzeyde entegre edilmesi, blok zincir sistemlerinin hem performans hem de güvenlik açısından mimari etkinliğini artıran kritik bir unsurdur.

3.3.2. Dağıtık Yapı ve Veri Akışı

Dağıtık defter teknolojisi, blok zincir sistemlerinin mimari bütünlüğünü sağlayan temel yapılardan biri olarak, veri paylaşımı ve doğrulama süreçlerinde teknik bir çerçeve sunar. Bu bölümde, söz konusu yapının blok zincir ağı içerisindeki teknik işleyişi ve veri yayılımındaki rolü değerlendirilmektedir. Blok zincir sisteminin merkeziyetsizliğini sürdürülebilir ve güvenilir kılan ana unsurlardan biri, ağdaki her bir düğümün defterin tamamının bir kopyasını saklaması ve işlemleri senkronize biçimde güncellemesidir.

Yeni bir işlem ağa gönderildiğinde, bu veri parçası önce gossip protokolü (ağdaki düğümlerin bilgiyi birbirine rastgele ve çoklayarak ilettiği yöntem) veya benzeri bir yayınlama mekanizması aracılığıyla ağdaki diğer düğümlere iletilir. Bu yaklaşımda her düğüm, aldığı veriyi komşu düğümlerine iletir ve veri ağı domino etkisiyle tüm sistemde yayılır. Bu yöntem, ağdaki iletişim yükünü dengeleyerek veri yayılımının gecikmesiz ve ölçeklenebilir biçimde gerçekleşmesini mümkün kılar (Huang vd., 2021).

Bu süreç yalnızca işlemlerin paylaşılmasını değil, aynı zamanda konsensüs öncesi doğrulama mekanizmasının da temelini oluşturur. Bir işlem veya blok, düğümler arasında paylaşıldıktan sonra yerel doğrulama kurallarına göre kontrol edilir ve yalnızca uygun bulunan veriler konsensüs sürecine dâhil edilir. Bu yapı hem ağın performansını korur

hem de kötü niyetli girişimlerin yayılmasını sınırlayan bir ön filtre görevi görür (Lashkari ve Musilek, 2021). Dağıtık defter yapısının sunduğu bu çoğaltılmış veri modeli, sistemsel hata toleransını önemli ölçüde artırır. Herhangi bir düğümün çevrimdışı kalması, ağın genel bütünlüğünü bozmaz çünkü tüm veri diğer düğümlerde de mevcuttur. Aynı zamanda bu mimari, sistemin tekil hata noktalarına karşı dirençli olmasını sağlar. Blok zincir ağlarında güvenlik, süreklilik ve işlem eş zamanlılığı açısından sürdürülebilirlik, bu mimari yaklaşımın sistemin geneline entegre edilebilmesine doğrudan bağlıdır.

3.3.3. Ağda Uzlaşma ve Blok Onayı

Konsensüs mekanizmalarının tanımsal ve algoritmik çeşitliliği önceki bölümlerde açıklanmıştır. Bu bölümde ise blok zincir sistemlerinin teknik mimarisi içerisinde konsensüs sürecinin nasıl konumlandığı ve blok kabul süreci üzerindeki işlevsel rolü ele alınmaktadır. Konsensüs katmanı, blok zincirin sistemsel tutarlılığını ve işlem geçerliliğini garanti altına alan yapısal bir doğrulama düzlemidir.

Her yeni blok, zincire eklenmeden önce, ağdaki yetkili düğümler arasında bir uzlaşı sürecine tabi tutulur. Bu süreçte, önerilen blok içeriği, ağdaki katılımcılar tarafından doğrulanır ve mevcut defterle çelişip çelişmediği kontrol edilir. Blok yalnızca ağın belirli bir çoğunluğu tarafından geçerli kabul edildiğinde zincire kalıcı olarak eklenir.

Farklı blok zincir yapılarında bu uzlaşı farklı algoritmalarla sağlanır. Halka açık ağlarda enerji yoğun PoW veya varlık temelli PoS gibi yöntemler kullanılırken; izinli ağlarda PBFT, RAFT veya oylama temelli mekanizmalar tercih edilmektedir. Bu algoritmalar yalnızca işlem doğruluğunu değil, aynı zamanda blok eklenme sırasının kesinliğini de güvence altına alır (Hussein vd., 2023).

Konsensüs katmanı ayrıca, ağın çatallaşma riskini (forking) minimize eden, aynı işlem için birden fazla geçerli blok oluşturulmasının önüne geçen kritik bir dengeleme unsurudur (Baliga, 2017). Bu katmanın sağladığı algoritmik düzen, veri bütünlüğü, ağ içi güven ve işlem sırasının doğruluğu gibi temel mimari gereksinimlerin karşılanmasını sağlar.

Blok kabul süreci teknik olarak yalnızca doğrulama değil, aynı zamanda ağın senkronizasyonunu ve işlem sırasının tespitini içeren çok katmanlı bir işlem dizisidir. Konsensüs katmanında yapılan her işlem, blok zincirin yalnızca geçmişle tutarlı değil, gelecek için de deterministik bir yol haritası izlemesini mümkün kılar. Sistemin genel güvenlik yapısını, işlem sırasının bütünlüğünü ve çok aktörlü ağlarda karar alma

mekanizmasının sürdürülebilirliğini teknik düzeyde garanti altına alan bu yapı, blok zincir mimarisinin istikrar ve doğruluk temelli işleyişini tanımlayan temel bileşenlerden biri olarak konumlanmaktadır (Xu vd., 2023).

3.3.4. Akıllı Sözleşmelerin İşleyişi

Akıllı sözleşmeler, blok zincir sistemlerinin yalnızca veri kaydı tutan yapılar olmaktan çıkarak, koşullara bağlı olarak işlem yürüten otonom sistemlere dönüşmesini mümkün kılan temel bileşenlerden biridir. Bu bölümde, akıllı sözleşmelerin mimari düzeydeki yerleşimi, uygulama katmanındaki teknik işleyişi ve sistem genelindeki işlevsel rolü değerlendirilmekte; dağıtık ağ yapısı içerisinde merkeziyetsiz işlem otomasyonu sağlamadaki katkısı ele alınmaktadır.

Mimari düzeyde akıllı sözleşmeler, blok zincirin uygulama katmanı üzerinde çalışır ve genellikle ağın diğer bileşenleriyle (konsensüs, veri, ağ) sıkı bir etkileşim içerisindedir. Bu sözleşmeler, blok zincir ağına özgü sanal yürütme ortamlarında (örneğin Ethereum'da Ethereum Sanal Makinesi- EVM) ya da izinli ağlarda zincir kodları (chaincode) biçiminde çalıştırılır. Her akıllı sözleşme, blok zincir üzerindeki benzersiz bir adres üzerinden tetiklenir ve tüm düğümler, sözleşme koşullarını aynı şekilde çalıştırarak ağ genelinde tutarlılığı ve şeffaflığı sağlar. Teknik olarak bu yapı, akıllı sözleşmelerin yalnızca bir kez yazılıp, tüm düğümler tarafından eşzamanlı ve aynı şekilde yürütülmesini garanti altına alır. Bu deterministik çalışma modeli, sözleşmelerin manipüle edilemeyecek biçimde işlemesini ve sonuçların tüm ağda aynı şekilde kaydedilmesini sağlar.

Konsensüs mekanizmaları ile çalışan bu katman, yalnızca işlemlerin doğruluğunu değil, sözleşmelere bağlı koşullu işlemlerin yürütülme sırasını ve geçerliliğini de garanti eder. Bu durum; finansal işlemler, tedarik zinciri takibi, dijital kimlik doğrulama, izin yönetimi gibi çok aktörlü süreçlerde otomasyon, şeffaflık ve denetlenebilirlik sağlar (Santosh vd., 2024).

İzinli blok zincir ağlarında, akıllı sözleşme bileşenleri genellikle belirli rollerle sınırlandırılmıştır ve veri erişimi ya da işlem yetkileri sadece yetkilendirilmiş aktörler tarafından yürütülebilir. Bu yönüyle uygulama katmanı, kurumsal iş akışlarının kod ile güvence altına alındığı bir yasal ve teknik otomasyon çerçevesi sunar. Blok zincirin uygulama katmanında konumlanan bu yapı, teknolojinin yalnızca bir kayıt defteri

olmanın ötesine geçerek, koşula bağlı işlem yürüten otonom sistemler olarak evrilmesini sağlayan mimari bütünlüğün merkezinde yer almaktadır.

3.3.5. Sistem Katmanları

Blok zincir teknolojisinin temel bileşenleri önceki bölümlerde açıklanmış olsa da bu bileşenlerin sistem mimarisi içinde nasıl yapılandırıldığı ve katmanlar hâlinde ayrıştırıldığı henüz ele alınmamıştır. Blok zincir sistemlerinde katmanlı mimari yaklaşımı, yalnızca yazılım geliştirme değil, güvenlik, performans, esneklik ve sistem yönetilebilirliği açısından da stratejik bir tasarım tercihi olarak öne çıkmaktadır. Bu katmanlı yapı, teknik bileşenlerin ayrıştırılmasının sistemsel gerekçelerini, işlevsel avantajlarını ve mimari sürdürülebilirliğe katkılarını değerlendirerek, blok zincirlerinin daha verimli ve sürdürülebilir bir şekilde yapılandırılmasını sağlamaktadır.

Katmanlı mimari, blok zincir sisteminin farklı işlevlerinin birbirinden bağımsız ancak uyumlu bileşenler olarak yapılandırılmasına olanak tanır. Bu sayede her katman, kendine özgü görevleri üstlenir ve diğer katmanlarla tanımlı arayüzler (API'ler) aracılığıyla etkileşir. Bu yapı, sistemin modülerliğini artırmakta; herhangi bir katmanda yapılacak güncellemenin tüm sistemi etkilemeden uygulanabilmesini mümkün kılmaktadır (Wang vd., 2021).

Örneğin, ağ katmanı düğümler arası veri iletimini sağlarken, konsensüs katmanı blokların doğruluğunu denetler; veri katmanı işlem ve blok verilerini saklar; uygulama katmanı ise akıllı sözleşmeleri yürütür. Entegrasyon ve API katmanı ise blok zincirin dış sistemlerle (örneğin ERP sistemleri, tedarik zinciri yazılımları veya kimlik servisleri) etkileşimini sağlar. Bu ayrım, her bir katmanın hem ayrı ayrı optimize edilebilmesine hem de güvenlik risklerinin katman bazında izole edilebilmesine olanak tanır (Alzhrani vd., 2023).

Bu mimari düzenleme, özellikle kurumsal ve yüksek ölçekli uygulamalarda yazılım yaşam döngüsü yönetimini kolaylaştırır. Katmanlar arası geçişlerin ve veri akışının belirli protokollere bağlanmış olması, hem geliştiriciler için standart bir çalışma zemini sunmakta hem de sistem performansının tutarlı bir biçimde izlenmesini mümkün kılmaktadır. Katmanlı yapının bu bütüncül işleyişi, blok zincir sistemlerini yalnızca teknik bir çözüm değil; aynı zamanda yönetilebilir, ölçeklenebilir ve çok bileşenli dijital altyapılar içerisinde güvenilir şekilde konumlanabilen mimari bir yapı hâline getirmektedir.

3.3.6. Güvenliğin Sağlanması ve Sistemsel Dayanıklılık

Blok zincir teknolojisinin güvenlik altyapısı, salt şifreleme algoritmalarından ya da tekil bileşenlerden ibaret değildir; sistemin mimari düzeyde güveni yeniden tanımlayan, çok katmanlı ve dağıtık bir yapı sunması bu teknolojiyi özgün kılmaktadır. Bu bölümde, daha önce açıklanan bileşenlerin güven üretme sürecine katkısı ve sistemin bütünsel dayanıklılığı değerlendirilmektedir.

Blok zincir sistemleri, geleneksel sistemlerden farklı olarak güveni merkezî otoritelere değil; kriptografiye, dağıtık yapıdaki çoğul doğrulamaya ve algoritmik mutabakata dayandırır. Her bir blok, yalnızca geçmiş bloklara bağlı olarak oluşur; bu yapı zincirin bütünlüğünü korurken, hash fonksiyonları sayesinde kayıtların değiştirilemezliğini garanti altına alır. Öte yandan konsensüs katmanı, yalnızca teknik doğrulama değil, aynı zamanda ağ genelinde karar birliği oluşturarak işlem tutarlılığını sağlamaktadır.

Bu mimari, sistemdeki tek bir bileşenin veya düğümün arızalanmasının tüm ağı etkilemesini engeller. Veri, düğümler arasında çoğaltılmış biçimde tutulduğundan dolayı, herhangi bir saldırı, hata veya erişim sorunu durumunda ağın geri kalan kısmı bütünlüğünü korur. Bu yapı, blok zinciri güvenli kılmanın yanı sıra, hata toleransı yüksek ve operasyonel sürekliliği güçlü bir sistem hâline getirir (Gramoli vd., 2024).

Ayrıca blok zincirin şeffaf ve geriye dönük denetime açık yapısı, kullanıcılar ve kurumlar arasında güven ilişkisini merkeziyetsiz olarak inşa etmeyi mümkün kılar. Bu sayede sistemdeki taraflar veriye olduğu kadar, verinin nasıl işlendiğine ve kimler tarafından doğrulandığına dair sürece de güven duyabilir. Özellikle çok aktörlü ve düzenlemeye tabi alanlarda bu yapı, güvenlik ile denetlenebilirlik arasında denge kuran stratejik bir çözüm sunar. Blok zincir mimarisinde güven, sadece teknik koruma katmanları ile değil; karar süreçlerini şeffaflaştıran, veri bütünlüğünü garanti eden ve sistemin genel işleyişine duyulan inancı yazılı protokoller aracılığıyla inşa eden mimari bir bütünlük üzerinden şekillenir.

Bu bölümde, blok zincir teknolojisinin kavramsal temellerinin yanı sıra, sistem mimarisi içerisinde yer alan teknik bileşenleriyle nasıl yapılandığı detaylı biçimde incelenmiştir. Blok yapısından Merkle ağaçlarına, dağıtık defter yapısından konsensüs katmanına, uygulama düzeyinde akıllı sözleşmelere ve katmanlı mimari organizasyona kadar tüm unsurlar, güvenli, değiştirilemez ve merkeziyetsiz bir dijital altyapının nasıl inşa edildiğini ortaya koymaktadır. Bu teknik bileşenlerin birlikte işlemesi; işlem

doğruluğunu, sistemin sürdürülebilirliğini, hata toleransını ve dış tehditlere karşı direncini garanti altına almaktadır.

Blok zincir teknolojisinin bu çok katmanlı ve bütüncül yapısı, onu geleneksel bilgi sistemlerinden ayıran en temel özelliği oluşturmakta; aynı zamanda onu sadece veri kaydı değil, kuralları kodla işleyen otonom sistemlerin temel altyapısı hâline getirmektedir. Bu mimari, özellikle çok aktörlü, düzenlemeye tabi ve güven temelli sektörlerde blok zincir sistemlerinin neden stratejik bir çözüm olarak konumlandığını açıklamaktadır.

Bir sonraki bölümde, bu teknik altyapının sistem düzeyinde ne tür avantajlar sunduğu, işlemsel etkinlik, güvenlik, izlenebilirlik ve merkeziyetsizlik gibi temel nitelikler üzerinden değerlendirilecek; ardından diğer dijital teknolojilerle entegrasyon potansiyeli detaylı biçimde ele alınacaktır.

3.4. Blok Zincirin Temel Özellikleri ve Avantajları

Blok zincir teknolojisinin dünya çapında bu denli ilgi görmesinin nedeni yalnızca teknik bir yenilik sunması değil; aynı zamanda mevcut sistemlerin temel zayıflıklarına yapısal çözümler üretme potansiyeline sahip olmasıdır. Özellikle güven, şeffaflık, işlem bütünlüğü ve merkeziyetsizlik gibi ilkeler, dijital çağda öne çıkan gereksinimlerin başında gelmektedir. Blok zincir, bu gereksinimlere doğrudan yanıt sunan nitelikleriyle hem teorik hem de uygulamalı düzeyde alternatif bir dijital mimari ortaya koymaktadır. Bu bölümde, teknolojinin temel özellikleri ve bunların doğurduğu sistemsel avantajlar incelenmektedir.

3.4.1. Değiştirilemezlik

Blok zincirin en karakteristik özelliği, kayıtların değiştirilemezliğidir. Bu özellik, bloklar arasında kurulan kriptografik zincir sayesinde elde edilir. Her blok, bir önceki bloğun hash'ini içerdiğinden, zincirin herhangi bir yerindeki değişiklik sonraki tüm blokları geçersiz kılar. Bu yapı, geçmişteki verilerin manipüle edilmesini pratikte imkânsız hale getirir. Değiştirilemezlik, özellikle finans, sağlık ve tedarik zinciri gibi hassas veri yönetimi gerektiren alanlarda veri bütünlüğü ve kayıt güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir (Click vd., 2020).

3.4.2. Şeffaflık ve İzlenebilirlik

Blok zincir sistemleri, işlemlerin tüm ağ katılımcıları tarafından görüntülenebilmesine olanak tanır. Bu şeffaf yapı sayesinde her işlem, kronolojik olarak dağıtık deftere kaydedilir ve izlenebilirlik kazanır. İzlenebilirlik, bir işlemin kaynağından son noktaya

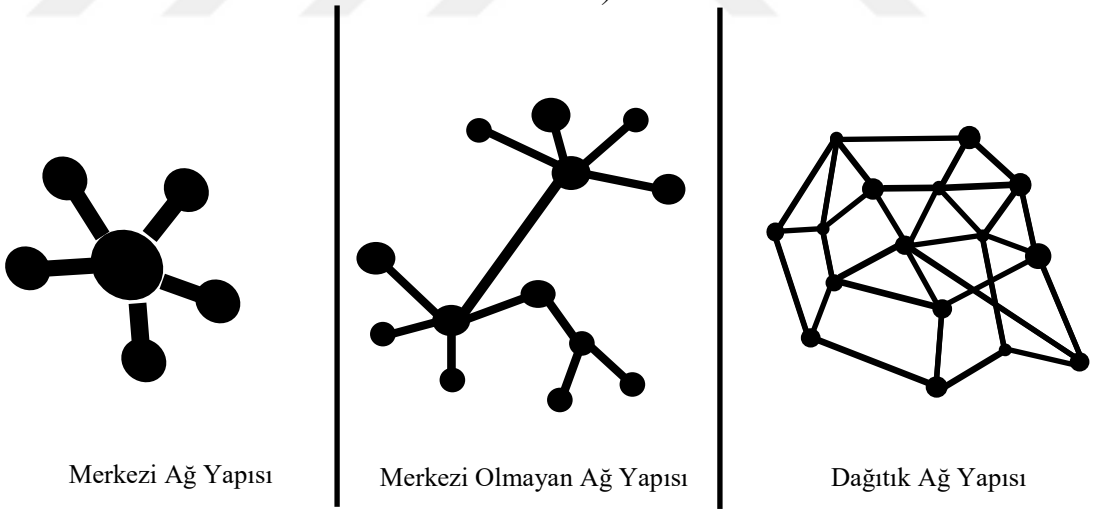
kadar takibini mümkün kılar. Bu yapı, özellikle denetim, geri çağırma ve hesap verebilirlik gibi uygulama alanlarında yüksek değer taşır (Daoud, 2019). Şeffaflık, aktörler arası güveni artırırken bilgi asimetrisini de ortadan kaldırır.

3.4.3. Merkeziyetsizlik

Merkeziyetsizlik, blok zincir ağlarının tek bir otoriteye veya aracıya ihtiyaç duymadan çalışmasını ifade eder. Her düğüm, sistemin bir parçası olarak veri doğrulama ve blok üretme süreçlerine katılır. Bu yapı, arıza toleransını artırmanın yanında merkezi müdahalelere ve tekil hata noktalarına karşı sistemi daha dirençli hâle getirir. (Hoffman vd., 2020). Özellikle merkezi otoritelere duyulan güvenin sınırlı olduğu alanlarda, merkeziyetsiz mimari sistemin sürekliliğini ve bütünlüğünü destekleyen kritik bir yapı olarak öne çıkmaktadır.

Şekil 3.3, merkezi, merkezi olmayan ve dağıtık ağ yapılarının karşılaştırmalı görünümünü sunarak, blok zincirin neden "tam dağıtık" bir yapı üzerine inşa edildiğini görsel olarak ortaya koymaktadır.

Şekil 3.3. *Merkezi, merkezi olmayan ve dağıtık ağ yapılarının karşılaştırılması (Tunçer, 2023 s. 25)*



Şekil 3.3'ten de anlaşılacağı üzere, merkezi ağ yapılarında kontrol tek bir merkezde toplanmakta; merkezi olmayan yapılarda ise kontrol, birkaç alt merkeze dağılmış bir yapı sergilemektedir. Dağıtık ağlarda ise her düğüm eşit haklara sahip olup, ağın işleyişi merkezi bir otoriteye bağlı olmaksızın sürdürülebilmektedir. Blok zincir teknolojisi, bu tam dağıtık model sayesinde güven, şeffaflık ve sistem bütünlüğünü temel alan bir altyapı sunmaktadır.

3.4.4. Güvenlik

Blok zincir teknolojisi, kriptografik algoritmalar ve dağıtık defter mimarisi sayesinde yüksek düzeyde güvenlik sunar. Her işlem, dijital imzalarla doğrulanır ve yalnızca ilgili özel anahtara sahip kullanıcılar tarafından gerçekleştirilebilir. Ayrıca verilerin birden fazla düğümde çoğaltılması, tek bir noktaya yapılacak saldırıların sistemi felce uğratmasını engeller (Zheng vd., 2018:366). Geriye dönük değişiklikler için ağın çoğunluğunu kontrol etmek gerekir; bu da saldırı maliyetini son derece yükseltir.

3.4.5. Otomasyon ve Verimlilik

Blok zincir sistemleri, özellikle akıllı sözleşmeler aracılığıyla işlem süreçlerini otomatikleştirebilir. Bu sözleşmeler, belirli koşullar sağlandığında işlemleri otomatik olarak gerçekleştirir. Bu otomasyon; süreç sürelerini kısaltır, insan müdahalesini azaltır ve hata oranını düşürür. Örneğin bir ürünün teslim alınmasını takiben otomatik fatura kesimi gibi uygulamalar, operasyonel verimlilik sağlar (De Giovanni, 2020).

3.4.6. Çok Aktörlü İş Birliği

Dağıtık yapı sayesinde sistemdeki tüm taraflar aynı verilere senkronize şekilde erişebilir. Bu durum, veri tutarlılığı sağlar ve iş birliğini kolaylaştırır. Özellikle sağlık, kamu hizmetleri ve tedarik zinciri gibi çok paydaşlı yapılarda kurumlar arası koordinasyonun güçlendirilmesi açısından önemli bir avantaj sunar (Yigit ve Dağ, 2024).

3.4.7. Düşük Maliyet ve Hızlı İşlem Onayı

Blok zincir sistemlerinde işlemler, aracı kurumlara ihtiyaç duymadan doğrudan katılımcılar arasında gerçekleştirilir. Bu, işlem süresini kısaltır ve maliyetleri düşürür. Özellikle uluslararası para transferleri, belge onayı ve tedarik zinciri işlemleri gibi alanlarda, blok zincir temelli sistemler klasik çözümlere kıyasla daha hızlı ve düşük maliyetli çözümler sunar (Alamsyah ve Syahrir, 2023).

Yukarıda açıklanan temel özellikler, blok zincir sistemlerinin sunduğu yapısal avantajların anlaşılması açısından kavramsal bir çerçeve sunmaktadır. Ancak bu özelliklerin kısa ve karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmesi hem teknik faydaların hem de operasyonel sonuçların daha net kavranmasına katkı sağlar. Aşağıdaki tablo 3.3, blok zincir teknolojisinin öne çıkan temel özelliklerini ve her bir özelliğin sunduğu sistemsel avantajları özetleyerek sunmaktadır.

Tablo 3.3. *Blok zincir teknolojisinin temel özellikleri ve sağladığı sistemsel avantajlar*

Özellik	Açıklama ve Sağladığı Avantaj
Değiştirilemezlik	Kayıtlar Oluşturulduktan Sonra Geri Dönük Olarak Değiştirilemez. Bu Sayede Veri Bütünlüğü Sağlanır ve Sahtecilik Riski Minimize Edilir.
Şeffaflık ve İzlenebilirlik	İşlemler Tüm Ağ Katılımcılarına Açık ve Kronolojik Olarak Kayıtlıdır. Denetlenebilirlik Artar, Hesap Verebilirlik Güçlenir.
Merkeziyetsizlik	Otoriteye Bağlılık Ortadan Kalkar. Sistem Dağıtık Çalışır; Arızalara ve Manipülasyonlara Karşı Dirençlidir.
Güvenlik	Kriptografi ve Dağıtık Yapı Sayesinde Hem Dış Saldırılara Hem de Veri Değiştirme Girişimlerine Karşı Yüksek Koruma Sağlar.
Otomasyon ve Verimlilik	Akıllı Sözleşmeler İşlemleri Koşul Bazlı Otomatikleştirir. İş Gücü Azaltılır, Süre ve Maliyet Avantajı Sağlanır.
Çok Aktörlü İş Birliği	Dağıtık Defter Tüm Taraflara Aynı Anda Güvenilir Veri Sunar. Kurumlar Arası İş Birliği ve Veri Uyumu Artar.
Düşük Maliyet ve Hız	Aracılar Ortadan Kalktığı İçin İşlem Maliyetleri Düşer, İşlem Süresi Kısalır. Özellikle Sınır Ötesi İşlemlerde Avantajlıdır.

Kaynak: Tablo yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 3.3'te sunulan bu özellikler, blok zincirin veri kaydının ötesinde güven inşası, işlem hızlandırma, kurumsal iş birliği ve maliyet azaltma gibi çok boyutlu işlevlere sahip olduğunu göstermektedir. Bu çok yönlü yapı, blok zinciri özellikle karmaşık, çok aktörlü ve yüksek doğruluk gerektiren süreçlerde güçlü bir dijital altyapı haline getirmektedir.

Blok zincirin bu temel avantajları, diğer dijital teknolojilerle entegre biçimde kullanıldığında daha da yüksek bir katma değer yaratmaktadır. Özellikle AI, büyük veri analitiği, IoT gibi teknolojilerle birlikte ele alındığında, blok zincirin hem karar destek kapasitesi hem de sistem esnekliği açısından çok daha güçlü çözümler sunduğu görülmektedir. Bu nedenle bir sonraki bölümde, blok zincir teknolojisinin diğer dijital sistemlerle entegrasyon potansiyeli ve gelecek perspektifleri detaylı biçimde ele alınacaktır.

3.5. Blok Zincirin Diğer Teknolojilerle Entegrasyonu ve Gelecek Perspektifleri

Blok zincir teknolojisinin gelişimi, yalnızca kendi iç mimarisiyle sınırlı kalmamış; aynı zamanda diğer dijital teknolojilerle entegrasyonu yoluyla yeni iş modelleri ve yüksek güvenlikli uygulamalar için temel altyapı hâline gelmiştir. Bu bölümde, blok zincirin çeşitli ileri dijital teknolojilerle nasıl bütünleştiği ve bu birleşimlerin sağladığı yapısal avantajlar incelenmektedir.

- Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)

Nesnelerin İnterneti (IoT) ile blok zincir entegrasyonu, geniş cihaz ağlarında güven ve veri bütünlüğü sağlamak için büyük bir potansiyel sunmaktadır. IoT ekosistemindeki cihazlar arasında güvenilir veri paylaşımı ve otomasyon için blok zincir teknolojisi kullanılabilir. Blok zincirin de merkezi ve değişmez yapısı, IoT cihazlarından gelen

verilerin kurcalanmadan saklanmasına ve kimlik doğrulamasının sağlanmasına imkân tanır. Nitekim yapılan akademik çalışmalar, blok zincir entegrasyonunun IoT sistemlerinde veri manipülasyonunu engelleyerek kimlik yönetimini güçlendirdiğini ve işlemleri şeffaf biçimde doğrulanabilir hale getirdiğini ortaya koymuştur (Almarri ve Aljughaiman, 2024). Gelecekte binlerce nesnenin internete bağlanacağı göz önüne alındığında, blok zincir-IoT birleşiminin bu cihazlar arası güven altyapısını desteklemesi beklenmektedir.

- Yapay Zekâ (Artificial Intelligence)

AI ile blok zincir teknolojisinin birleşimi, Endüstri 4.0 dünyasında yeni ve yenilikçi iş modelleri yaratma potansiyeline sahiptir. Bu entegrasyon sayesinde AI sistemlerinin ürettiği karar ve çıktılar, blok zincir üzerinde izlenebilir ve doğrulanabilir hale gelebilir. Örneğin, makine öğrenimi ile elde edilen bir tahmin sonucu veya karar ağacı, blok zincire kaydedilerek sonradan şeffaflıkla incelenebilir. Blok zincir, AI uygulamalarında kullanılan büyük verinin güvenilirliğini ve veri kaynağının değişmezliğini sağlayarak yapay zekâ süreçlerine duyulan güveni arttırır. Akademik literatürde de vurgulandığı üzere, AI ve blok zincirin birleşimi dijitalleşme ile desteklenen yepyeni iş modelleri oluşturma potansiyeli taşımaktadır (Kumar vd., 2023). Gelecek perspektifinde, yapay zekâ kararlarının daha hesap verebilir olması ve çeşitli sektörlerde (tedarik zinciri, finans, sağlık vb.) yeni uygulamaların ortaya çıkması bu entegrasyon sayesinde mümkün olacaktır.

- Büyük Veri (Big Data)

Büyük veri, çok yüksek hacimli ve çeşitli veri yığınlarının analizini ifade ederken blok zincir, bu verilerin güvenli ve dağıtık bir şekilde yönetimini mümkün kılar. Blok zincir ve büyük veri teknolojilerinin entegrasyonu, kurumlar arası veri paylaşımında güvenilir bir kayıt defteri sağlayarak veri mahremiyetini ve bütünlüğünü korur. Özellikle farklı kaynaklardan gelen büyük verinin tek bir merkez yerine dağıtık bir blok zincir üzerinde tutulması, veri üzerinde yetkisiz değişiklik yapılmasını önler ve veriye dayalı karar alma süreçlerini iyileştirir. Literatürde blok zincirin, büyük verinin temel sorunlarına etkili bir çözüm olarak görüldüğü; örneğin merkezi olmayan özel veri yönetimi ve dijital mülkiyet haklarının takibi gibi olanaklar sunduğu belirtilmektedir (Saraswat vd., 2023). Gelecekte blok zincir destekli büyük veri uygulamaları sayesinde şirketler, veri sahipliği ve

paylaşımına dair güven problemlerini minimize ederek daha verimli analitik çalışmalar yapabilecektir.

- Bulut Bilişim (Cloud Computing)

Bulut bilişim, verilerin ve uygulamaların internet üzerinden sunulmasını sağlarken blok zincir entegrasyonu bu ortamlara dağıtık güvenlik katmanı ekler. Blok zincir ile bulut sistemlerinin birleşimi, özellikle çoklu bulut sağlayıcıları arasında güvenilir iş birliği ve veri bütünlüğü temininde etkilidir. Örneğin, blok zincir tabanlı akıllı sözleşmeler kullanılarak farklı bulut platformları arasında otomatik ve güvenli veri transferi gerçekleştirilebilir. Bu entegrasyonun avantajları arasında, bulut ortamlarında tutulan verilerin değişmez kayıtlarla izlenebilmesi, kullanıcı kimlik doğrulamasının merkezi bir otoriteye ihtiyaç duymadan yapılabilmesi ve denetim süreçlerinin kolaylaşması sayılabilir. Nitekim yapılan bir çalışma, bulut ve blok zincirin birlikte kullanımının ağ kontrolü, veri bütünlüğü, kaynak yönetimi ve adil ödeme mekanizmalarını geliştirebileceğini ortaya koymuştur (Alshinwan vd., 2023). Gelecekte Blockchain-as-a-Service (BaaS) uygulamalarının yaygınlaşmasıyla, bulut bilişim hizmetlerinde güvenlik ve şeffaflığın daha da artması beklenmektedir.

- Siber-Fiziksel Sistemler (Cyber-Physical Systems)

Siber-fiziksel sistemler (CPS), fiziksel dünyadaki sensör ve cihazların bilişim sistemleriyle etkileşimini içeren entegre ortamlardır (örneğin akıllı fabrikalar, enerji şebekeleri, otonom araç ağları). Blok zincir teknolojisi, CPS içerisinde gerçekleşen işlemleri ve cihaz etkileşimlerini güvence altına almak için güçlü bir altyapı sunar. Özellikle Endüstri 4.0 kapsamında, üretim verilerinin veya makine kayıtlarının blok zincir üzerinde tutulması, herhangi bir değişiklik girişiminin hemen tespit edilmesini ve geçmiş kayıtların şeffaf biçimde denetlenebilmesini sağlar. Bu şekilde, CPS alanlarında merkezi bir otoriteye duyulan ihtiyaç azalırken sistemin güvenilirliği artar. Akademik çalışmalarda da blok zincirin, IoT, imalat, ulaşım ve tedarik zinciri gibi birçok siber-fiziksel sistem uygulamasında güvenli ve dağıtık bir kayıt defteri sağlayarak yenilikçi kullanım alanlarına kapı açtığı vurgulanmaktadır (Maleh vd., 2022). Gelecekte, blok zincir destekli CPS uygulamaları sayesinde kritik altyapılarda (ör. akıllı şebekeler veya otonom trafik sistemleri) veri bütünlüğü ve operasyonel güven üst seviyeye çıkacaktır.

- Artırılmış Gerçeklik (AR) / Sanal Gerçeklik (VR)

Artırılmış ve sanal gerçeklik ortamlarında blok zincir entegrasyonu, dijital varlıkların mülkiyeti ve değişmez kayıt altına alınması konularında devrim yaratmaktadır. Metaverse gibi kapsamlı sanal dünyalarda kullanıcıların sahip olduğu öğeler (dijital kıyafetler, eserler, araziler vb.), blok zincir üzerindeki Değiştirilemez Tokenlar (NFT) aracılığıyla benzersiz biçimde tanımlanabilir ve korunabilir. Bu sayede, sanal ortamlarda üretilen veya alınıp satılan varlıkların kopyalanması ya da sahtecilik yapılması engellenerek gerçek sahiplik kanıtlanır. Blok zincir, AR/VR uygulamalarında kullanıcı kimliklerinin doğrulanması ve dijital kimlik yönetimi için de kullanılabilir; örneğin bir kullanıcının tek bir avatar kimliği, blok zincir üzerinde güvenli şekilde saklanabilir. Hong Kong Institute for Monetary and Financial Research (HKIMR) tarafından Haziran 2024'te yayımlanan "The Metaverse" başlıklı raporda blok zincir teknolojisinin metaverse içinde sanal varlıkların mülkiyetini güvence altına alabileceği belirtilmektedir. (HKIMR, 2024). Gelecek perspektifinde AR/VR ve blok zincir bütünleşmesiyle birlikte, küresel ölçekte sanal ekonomiler gelişecek ve kullanıcılar sanal dünyalarda edindikleri değerleri gerçek dünyadaki gibi güvenle ellerinde tutabileceklerdir.

- Kuantum Bilişim (Quantum Computing)

Kuantum bilişim, blok zincir teknolojisi için hem bir sınav hem de bir fırsat alanıdır. Bir yandan, gelişmiş kuantum bilgisayarlar günümüz blok zincirlerinde kullanılan kriptografik algoritmaları kırma potansiyeline sahiptir. Bu durum, blok zincir tabanlı kripto para ve uygulamalarda yer alan dijital varlıkların gelecekte risk altına girebileceği anlamına gelir. Nitekim araştırmacılar, kuantum hesaplamanın blok zincir protokollerini tehdit ettiğini ve kuantuma dirençli yeni çözümlere ihtiyaç duyulduğunu vurgulamaktadır (Allende vd., 2023). Diğer yandan, kuantum bilişimin prensipleri blok zincire entegre edilerek kuantum blok zincir kavramı ortaya çıkmaya başlamıştır. Bu yaklaşımda, kuantum rastgelelik kaynakları ve kuantum kriptografi yöntemleri kullanılarak blok zincirlerin güvenliği ve verimliliği artırılabilir. Örneğin, bazı çalışmalar kuantum temelli yeni konsensüs algoritmaları veya kuantum anahtar dağıtımı ile güvence altına alınmış blok zincir ağları önermektedir (Singh vd., 2024). Gelecek perspektifinde, blok zincir ağlarının kuantum çağında güvenli kalabilmesi için post-kuantum kriptografi yöntemlerinin mevcut blok zincir sistemlerine entegre edilmesi kritik olacaktır. Bu sayede, blok zincir teknolojisi kuantum bilgisayarların tehditlerine karşı dayanıklı hale

gelirken, belki de kuantum bilişim ile çok daha güçlü ve hızlı dağıtık sistemler geliştirme fırsatı doğacaktır.

Yukarıda özetlenen entegrasyon örnekleri, blok zincirin sadece bir veri kayıt teknolojisi değil; aynı zamanda farklı dijital sistemlerle birleşerek yüksek değer üreten bir platform haline geldiğini göstermektedir. Tablo 3.4, blok zincirin farklı teknolojilerle entegrasyon alanlarını ve her bir birleşimin sunduğu temel avantajları sistematik biçimde özetlemektedir.

Tablo 3.4. *Blok zincir ile farklı teknolojilerin entegrayon alanları ve sağladığı avantajlar*

Teknoloji	Entegrasyon Alanları	Sağladığı Avantajlar
IoT	Akıllı Cihaz Ağları, Sensör Sistemleri, Ev Otomasyonu, Tedarik Zinciri	Veri Bütünlüğü ve Güvenilirliği, Cihazlar Arası Güvenli İletişim, Merkezi Otoriteye İhtiyaç Duymadan Kimlik Doğrulama
AI	Veri Paylaşımı Platformları, Karar Algoritmalarının İzlenmesi, Akıllı Sistemler	Şeffaf ve İzlenebilir AI Kararları, Veride Güven ve Doğruluk, Yeni Dijital İş Modellerinin Ortaya Çıkması
Büyük Veri	Kurumlar Arası Veri Paylaşımı, Büyük Ölçekli Veri Depolama ve Analiz	Dağıtık ve Güvenli Veri Yönetimi, Veri Mülkiyetinin Takibi, Gizlilik ve Değişmezlik ile Güvenilir Analiz Olanağı
Bulut Bilişim	Çoklu Bulut Entegrasyonu, Servisler Arası Veri Alışverişi, Blockchain-As-A-Service (Baas)	Merkeziyetsiz Güvenlik ve Denetim, Veri Bütünlüğünün Korunması, Farklı Bulut Sağlayıcıları Arasında Güvenli İş Birliği
Siber-Fiziksel Sistemler	Akıllı Fabrikalar, Endüstri 4.0 Süreçleri, Akıllı Şebekeler, Otonom Taşıma Sistemleri	Tüm İşlemlerin Değişmez Kayıt Altında Olmasıyla Operasyonel Güven, Sistem Bileşenleri Arasında Güvenli ve İzlenebilir Etkileşim, Veride Şeffaflık
AR/VR (Artırılmış/Sanal)	Metaverse Platformları, Dijital Oyun ve Alışveriş Ekosistemleri, Sanal Mülkiyet	Dijital Varlıkların Benzersiz Şekilde Sahiplenilmesi (NFT ile), Sahteciliğin Önlenmesi, Kullanıcıların Sanal Ekonomiye Duyduğu Güvenin Artması
Kuantum Bilişim	Blok Zincir Altyapısının Kuantum Güvenli Hale Getirilmesi, Kuantum Rastgelelik Entegrasyonu	Kuantum Saldırılarına Dayanıklılık (Post-Kuantum Kripto ile), Uzun Vadede Veri ve Varlık Güvenliğinin Korunması, Potansiyel Olarak Daha Hızlı ve Güçlü Konsensüs Mekanizmaları

Kaynak: Tablo yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 3.4, blok zincirin farklı teknolojilerle sinerji yarattığı alanları derleyerek, gelecekteki potansiyel kullanım senaryolarına ışık tutmaktadır. Özellikle güvenlik, veri bütünlüğü, kimlik doğrulama ve sistemler arası etkileşim gibi konularda blok zincir altyapısının belirleyici rol oynayacağı öngörülmektedir.

Blok zincir teknolojisinin diğer dijital sistemlerle entegrasyon kapasitesi, yalnızca veri yönetimi değil, aynı zamanda karar alma, otomasyon ve iş birliği süreçlerinde de yüksek etki potansiyeli taşımaktadır. Bu potansiyelin somut biçimde değerlendirildiği alanların başında ise tedarik zinciri yönetimi gelmektedir. Aşağıdaki bölümde, blok zincirin tedarik

zinciri süreçlerine nasıl entegre edildiği, hangi sektörlerde ne tür uygulamalara olanak sunduğu ve bu uygulamaların sunduğu avantajlar detaylı biçimde analiz edilecektir.

3.6. Tedarik Zinciri Yönetiminde Blok Zincir Kullanımı ve Uygulama Alanları

Günümüz küresel pazarlarında, tedarik zinciri yönetimi, hammaddeden son kullanıcıya kadar tüm süreçleri içeren karmaşık bir ağdır. Bu süreç, ürünlerin doğru zamanda, doğru miktarda ve doğru kalitede teslim edilmesini hedefleyen çok aktörlü bir iş birliğini zorunlu kılar. Ancak geleneksel tedarik zinciri yönetiminde merkezi veri tabanları, manuel denetim mekanizmaları ve sınırlı dijital izlenebilirlik gibi sorunlar bulunmaktadır. Bu eksiklikler, özellikle küresel ölçekte çalışan veya sıkı düzenlemelere tabi olan otomotiv, ilaç ve gıda gibi sektörlerde ciddi risklere ve müşteri güveninde kayıplara yol açmaktadır (Kshetri, 2018).

Blok zincir teknolojisi, tedarik zincirinde karşılaşılan bu geleneksel yapıların sınırlılıklarını aşmak üzere geliştirilmiş, yenilikçi bir çözümdür. Bu teknoloji sayesinde ürün hareketleri, taşıma koşulları, üretici ve tedarikçi bilgileri gibi kritik veriler değiştirilemez ve şeffaf şekilde saklanır. Blok zincirin sunduğu dağıtıklık, şeffaflık ve akıllı sözleşme özellikleri, zincirdeki tüm aktörlerin merkezi bir otoriteye güvenmek yerine, sistemin kendisine güvenmesini sağlar. Bu bağlamda ürünlerin sahtecilik risklerinin azaltılması, lojistik süreçlerinin gerçek zamanlı takibi, tedarikçi doğrulaması, otomatik sözleşme yönetimi ve etkili geri çağırma operasyonları gibi süreçlerde blok zincirden yararlanılmaktadır (Saberi vd., 2019).

Tedarik zincirinde blok zincirin sunduğu avantajları daha iyi anlamak için, aşağıdaki tabloda küresel ölçekte gerçekleştirilen ve aktif olarak kullanılan örnek projeler özetlenmiştir. Tablo 3.5, blok zincirin izlenebilirlik, veri güvenliği ve sahtecilik önleme gibi kritik alanlarda nasıl işlevselleştiğini gösteren ampirik örnekleri sunmaktadır.

Tablo 3.5. *Küresel tedarik zinciri uygulamalarında blok zincir projeleri ve sektörel etkileri*

Sektör	Proje İsmi	Uygulama Detayları	Başarı Durumu	Kaynaklar
Gıda	IBM Food Trust	Walmart ve Nestlé'nin Gıda Ürünlerinin Gerçek Zamanlı Takibi	Yüksek Başarı, Yaygın Kullanım	IBM (2020)
Denizcilik ve Lojistik	TradeLens (MaerskveIBM)	Küresel Konteyner Taşımacılığı Takip Platformu	Başarılı, Ancak Sektör Katılımı Düşük	Maersk (2022)
İlaç ve Sağlık Ürünleri	MediLedger	İlaç Sahteciliği Önleme ve Ürün Doğrulama	ABD'de FDA Onayı Almış Başarılı Pilot Uygulama	Chronicled (2023)
Değerli Metaller ve Taşlar	Everledger	Elmas ve Değerli Taşların İzlenebilirliği ve Menşe Doğrulama	Başarılı, Sektörde Geniş Kullanım	Kemp, (2021)
Moda ve Tekstil	Provenance	Sürdürülebilir ve Etik Moda Ürünlerinin Şeffaf Tedarik Zinciri	Pilot Proje, Artan İlgi ve Genişleyen Kullanım	Provenance (2022)
Enerji	Energy Web Foundation	Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Blok Zincir Üzerinden Takibi ve Yönetimi	Genişleyen Kullanım, Yüksek Başarı	EWF (2022)
Otomotiv	BMW PartChain	Otomotiv Parçalarının İzlenebilirliği ve Tedarik Zinciri Güvenliği	Başarıyla Uygulanan Proje	BMW (2022)
Tarım	AgriDigital	Tahıl Ürünlerinin İzlenmesi ve Ödemelerin Otomasyonu	Avustralya'da Geniş Kullanım	AgriDigital (2022)
Elektronik	Samsung Blockchain	Elektronik Parçaların Orijinalliği ve Garanti Takibi	Başarılı Pilot Uygulama	Samsung (2023)
Perakende	Starbucks Blockchain	Kahve Çekirdeklerinin Tarladan Fincana İzlenebilirliği	Yüksek Başarı, Yaygınlaştırılmış Uygulama	Ginting ve Tesselhof, (2023)
Otomotiv	Volvo Battery Passport	Elektrikli Araç Bataryalarının Menşe Takibi	Başarılı Uygulama (Volvo EX90 Modeli)	Volvo ve Circulor (2024)
Geri Dönüşüm	Dow- Project 2Life	Geri Dönüştürülen Malzemelerin Takibi ve Döngüsel Ekonomi Desteği	Başarılı Pilot Uygulama	Dow ve BanQu (2024)

Kaynak: Tablo yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 3.5 incelendiğinde, blok zincir teknolojisinin farklı sektörlerde yalnızca teorik bir kavram olmaktan öteye geçerek, pratik ve işlevsel çözümler sunduğu açıkça görülmektedir. Gıda sektöründe IBM Food Trust, tarladan rafa kadar uzanan süreçte ürün izlenebilirliğini mümkün kılarak gıda güvenliğini önemli ölçüde artırmıştır. İlaç sektöründe geliştirilen MediLedger projesi, sahte ilaçların önlenmesi ve ürün doğrulama süreçlerinde FDA uyumlu bir sistem altyapısı sunarak sektör regülasyonlarına entegrasyon açısından önemli bir örnek teşkil etmektedir. Otomotiv endüstrisinde uygulanan BMW PartChain ve Volvo Battery Passport projeleri ise, parça orijinalliği ve batarya menşe takibi gibi kritik alanlarda blok zincir temelli çözümlerin başarısını ortaya koymaktadır.

Bunlara ek olarak, TradeLens (lojistik), Energy Web Foundation (enerji), Everledger (değerli madenler), Provenance (tekstil) ve AgriDigital (tarım) gibi projeler, blok zincir teknolojisinin çok aktörlü sistemlerde veri güvenliği, tedarikçi doğrulaması ve regülasyon uyumu gibi temel sorunları çözmedeki potansiyelini somutlaştırmaktadır. Bu örnekler, blok zincir teknolojisinin yalnızca finansal işlemlerle sınırlı kalmadığını fiziksel ürün akışlarının ve karmaşık tedarik yapılarının dijital dönüşümünde de merkezi bir rol üstlenebileceğini göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, blok zincir teknolojisi, tedarik zinciri yönetiminde güvenli ve şeffaf dijital altyapılar sunarak, özellikle küresel ölçekte faaliyet gösteren ve sıkı regülasyonlara tabi sektörlerde önemli yapısal iyileştirmeler sağlamaktadır. Gelecek perspektifinde, tedarik zinciri paydaşlarının veri paylaşımına açık olması ve blok zincir sistemlerinin kurumsal iş akışlarına daha derin entegrasyonu sayesinde esneklik, dayanıklılık ve sürdürülebilirlik bakımından yüksek performanslı dijital tedarik zincirleri inşa edileceği öngörülmektedir.

Tedarik zinciri yönetiminde blok zincir uygulamalarının başarısı, büyük ölçüde tercih edilen platformun teknik ve yönetsel özelliklerine bağlıdır. Bu tez çalışmasında, kurumsal uyumluluğu, modüler mimarisi ve izinli yapısı nedeniyle Hyperledger Fabric tabanlı bir çözüm modeli önerilmektedir. İzleyen bölümde platformun mimarisi, temel bileşenleri ve çalışmada üstlendiği rol detaylandırılacaktır.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

HYPERLEDGER FABRİC: KURUMSAL BLOK ZİNCİR MİMARİSİ VE UYGULAMA POTANSİYELİ

Blok zincir teknolojisinin tedarik zinciri alanındaki uygulanabilirliği, özellikle çok aktörlü, sıkı regülasyonlara tabi ve yüksek izlenebilirlik gereksinimi taşıyan sistemlerde somutlaşmaktadır. Bu bağlamda, teknik kapasitesi kadar kurumsal ölçeğe uyarlanabilirliğiyle öne çıkan platformların analizi kritik bir ihtiyaç hâline gelmiştir. Hyperledger Fabric, bu gereksinimlere doğrudan cevap veren, açık kaynaklı ve kurumsal düzeyde uygulanabilir bir altyapı sunmaktadır. Bu bölümde, Fabric'in mimarisi, bileşenleri ve bu çalışmadaki uygulama potansiyeli ayrıntılı biçimde ele alınmaktadır.

4.1. Hyperledger Projesinin Genel Yapısı ve Kurumsal Konumlandırması

Blok zincir teknolojisinin ilk ortaya çıkışı, Bitcoin ile özdeşleşen, herkese açık ve anonim işlem yapısına dayalı sistemler üzerinden olmuştur. Ancak bu yapıların yüksek regülasyon gerektiren sektörlerde kullanımının sınırlı kalması; özellikle işlem gizliliği, kimlik yönetimi ve izin kontrollü erişim gibi ihtiyaçlar çerçevesinde alternatif yaklaşımların geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Bu gereksinimlere yanıt olarak, 2015 yılında Linux Foundation tarafından başlatılan Hyperledger Projesi, kurumsal uygulamalar için tasarlanmış açık kaynak kodlu ve izinli blok zincir teknolojilerinin geliştirilmesini hedeflemiştir (Linux Foundation, 2025). Hyperledger, yalnızca teknik bir platform değil; aynı zamanda yasal, organizasyonel ve yönetişimsel boyutları kapsayan çok aktörlü bir ekosistem olarak konumlandırılmaktadır. Bu yönüyle Hyperledger, dağıtık defter teknolojisinin kurumsal ölçekte uygulanabilirliğini destekleyen ve sektörel çeşitliliğe uyum sağlayan bir çatı proje niteliği taşımaktadır.

Proje kapsamında geliştirilen sistemler, kripto para birimlerinden farklı olarak, madencilik, açık token ekonomisi gibi unsurlar içermez; bunun yerine, ölçeklenebilirlik, işlem gizliliği, veri bütünlüğü ve erişim kontrolü gibi kurumsal önceliklere odaklanır.

Hyperledger'ın geliştirme felsefesi, blok zincir teknolojisini yalnızca bir para transfer aracı değil; aynı zamanda kurumsal süreçlerin dijitalleştirilmesini mümkün kılan bir veri yönetim altyapısı olarak ele alır (Androulaki vd., 2018).

Zaman içerisinde Hyperledger çatısı altında geliştirilen projeler farklı teknik ihtiyaçlara, kullanım senaryolarına ve endüstriyel taleplere göre çeşitlenmiştir. Başlangıçta yalnızca birkaç temel platformdan oluşan yapı, bugün itibarıyla çerçeve (framework) ve araç (tool) olmak üzere iki ana gruba ayrılan onlarca bileşenden oluşan bir ekosisteme dönüşmüştür. Bu projelerden bazıları aktif olarak geliştirilmeye devam ederken, bazıları ise kullanımda azalma, teknik sınırlılıklar veya işlevsel tekrarlar nedeniyle "end-of-life" (EOL) statüsüne alınarak arşivlenmiştir. Örneğin, veri işlem performansına odaklanan Hyperledger Sawtooth platformu 2024 itibarıyla arşivlenmiş; Ethereum uyumlu akıllı sözleşme motoru olan Hyperledger Burrow ise 2022 yılında resmi olarak destek dışı bırakılmıştır. Benzer şekilde, uygulama geliştirme sürecini sadeleştirmeyi amaçlayan Hyperledger Composer 2020 yılında durdurulmuş, Quilt gibi defterler arası değer transferi sağlayan projeler ise kullanım yaygınlığının sınırlı kalması nedeniyle sona erdirilmiştir (Linux Foundation, 2025).

Buna karşın Hyperledger Fabric, Indy, Besu ve Iroha gibi projeler hâlen aktif olarak geliştirilmeye devam etmekte olup; Cacti, Bevel, FireFly ve AnonCreds gibi yeni projeler de değişen teknoloji gereksinimlerine yanıt vermek üzere ekosisteme entegre edilmiştir. Bu gelişmeler, Hyperledger'ın yalnızca teknik altyapı açısından değil, aynı zamanda yönetişim ve sürdürülebilirlik bağlamında da adaptif ve stratejik bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

Hyperledger projeleri, yalnızca tekil bir çözüm değil; farklı mimari yapıların, sektör ihtiyaçlarının ve uygulama senaryolarının uyarlanabildiği çok yönlü, esnek ve ölçeklenebilir çözümler sunmaktadır (Hyperledger Foundation, 2025). Böylece kamu kurumlarından özel sektöre, bankalardan sağlık sistemlerine kadar geniş bir yelpazede blok zincir uygulamaları mümkün hâle gelmektedir.

Hyperledger projeleri, yalnızca teknik işlevlerine göre değil; sistem mimarisi içinde üstlendikleri rol temel alınarak da sınıflandırılmaktadır. Bu doğrultuda projeler genel olarak üç ana kategori altında incelenmektedir: (1) temel blok zincir altyapısını sağlayan "frameworks" (çerçeveler), (2) bu altyapılarla entegre çalışan ve sistem işleyişini destekleyen "tools" (araçlar), (3) farklı blok zincir sistemleri arasında veri ve işlem

geçişine imkân tanıyan “entegrasyon çözümleri”. Bu sınıflandırma, Hyperledger ekosisteminin çok katmanlı ve modüler yapısını anlamayı kolaylaştırmakta; her bir bileşenin sistem bütünlüğü içindeki işlevini belirginleştirmektedir. Aşağıda her bir kategori altında yer alan öne çıkan projeler, teknik özellikleri ve kullanım alanlarıyla birlikte sunulmaktadır (Hyperledger Architecture Working Group, 2017; LF Decentralized Trust, 2025; Yewale, 2018).

1. Frameworks (Temel Blok Zincir Altyapıları): Bu grup, sistemin çekirdek işlevlerini yürüten, dağıtık defterlerin tutulduğu, işlemlerin işlendiği altyapı projelerini içerir.

- Hyperledger Fabric: İzinli yapısı ve modüler mimarisi ile kurumsal uygulamalar için geliştirilen bir blok zincir platformudur. IBM ve Digital Asset gibi kuruluşların katkısıyla Hyperledger çatısı altında geliştirilmiştir. Platform, zincir kodu adı verilen akıllı sözleşmeleri Go, Java ve JavaScript gibi farklı dillerle yazmaya olanak tanırken; esnek mimarisi sayesinde ağ katılımcıları, konsensüs mekanizması ve veri erişim kuralları özelinde özelleştirilebilir yapıdadır. Raft ve Kafka gibi konsensüs algoritmalarını destekleyen Fabric, gizlilik, performans ve ölçeklenebilirlik önceliklerini gözeten bir tasarıma sahiptir.
- Hyperledger Sawtooth: İşlem mantığını çekirdek defterden ayıran esnek bir mimariye sahip bir platformdur. Intel’in liderliğinde geliştirilen Sawtooth; PoET, Raft ve PBFT gibi çeşitli konsensüs algoritmalarını destekleyerek ölçeklenebilirlik ve paralel işlem yürütme kapasitesi sağlar. IoT ve büyük veri gibi yoğun veri akışı gerektiren alanlara hitap eden platform, modüler yapısıyla özelleştirilebilir uygulamalara olanak tanımıştır. Ancak 2024 yılı itibarıyla aktif geliştirme süreci durdurulmuş ve proje arşivlenmiştir
- Hyperledger Indy: Dijital kimlik yönetimine odaklanan bir dağıtık defter platformudur. Özellikle merkezsiz kimlik doğrulama (Decentralized Identity – DID) ve kullanıcıların kendi kimlik bilgilerini kontrol etmesini sağlayan "self-sovereign identity" prensibine uygun olarak tasarlanmıştır. Indy, kimlik bilgilerini kriptografik yöntemlerle korur ve RBFT (Redundant Byzantine Fault Tolerance) algoritmasını kullanır. Kamu ve kurumsal dijital kimlik projelerinde altyapı sağlar.
- Hyperledger Iroha: Mobil ve gömülü uygulamalar için tasarlanmış, kullanım kolaylığı sağlayan bir blok zincir çerçevesidir. Japon Soramitsu firması tarafından geliştirilmiştir. Basit ve anlaşılır komut setine sahiptir; ayrıca rol tabanlı izin sistemi,

çoklu-imza desteği ve Yet Another Consensus (YAC) adı verilen konsensüs algoritmasıyla güvenli işlem yönetimi sunar. Mobil bankacılık ve ödeme sistemlerinde tercih edilmektedir.

- Hyperledger Besu: Ethereum ile uyumlu, izinli bir blok zincir platformudur. ConsenSys tarafından geliştirilip Hyperledger'a entegre edilmiştir. Ethereum Virtual Machine (EVM) ve Solidity akıllı sözleşmelerini destekler; PoW, PoA ve IBFT (Istanbul Byzantine Fault Tolerance) gibi farklı konsensüs algoritmalarını kullanabilir. Kurumsal ortamlarda Ethereum uyumlu uygulamalar geliştirmek isteyen finans kurumları için uygundur.
- Hyperledger Grid: Tedarik zinciri yönetimi alanında blok zincir tabanlı uygulamalar geliştirmek için oluşturulmuş modüler bir araç setidir. Grid, ürün izlenebilirliği, parti yönetimi, varlık doğrulama ve tedarikçi kayıt sistemleri gibi uygulama alanlarına yönelik veri modelleri, referans mimariler ve akıllı sözleşme bileşenleri sunar. Platform, özellikle Sawtooth ve Fabric gibi altyapılarla uyumlu şekilde çalışmak üzere tasarlanmıştır. Geliştirici ekipler, Grid sayesinde tedarik zincirine özel uygulamaları daha hızlı prototipleme ve test etme imkânı bulur.
- Hyperledger Burrow: Ethereum uyumlu akıllı sözleşmeleri çalıştırabilen ilk Hyperledger platformlarından biridir. Tendermint konsensüs motorunu temel alarak hızlı işlem onayı sağlamayı amaçlamıştır. EVM desteği sunan Burrow, sadeleştirilmiş dağıtım yapısıyla dikkat çekmiştir. Ancak Ethereum uyumluluğu alanında Hyperledger Besu'nun daha geniş kapsamlı bir çözüm sunması nedeniyle proje 2022 itibarıyla destek dışı bırakılmıştır.

2. Tools: Destekleyici Araçlar ve Performans Bileşenleri: Bu gruptaki projeler, sistemin görselleştirilmesi, performans ölçümü, dağıtımı ve yönetimi gibi işlevleri üstlenir.

- Hyperledger Caliper: Blok zincir platformlarının performansını ölçmek amacıyla geliştirilen bir açık kaynaklı kıyaslama aracıdır. Kullanıcılar, Caliper ile farklı platformların işlem hızı (Transactions Per Second-TPS), gecikme süresi (latency), sistem kullanımı gibi performans metriklerini test senaryoları altında karşılaştırabilir. Fabric, Besu, Sawtooth gibi çeşitli blok zincir sistemleri için destek sunan bu araç, özellikle ağ ölçeklendirme planlamalarında, uygulama optimizasyonlarında ve akademik araştırmalarda kullanılmaktadır.

- Hyperledger Explorer: Blok zincir ağlarını izlemek ve analiz etmek için geliştirilen bir web tabanlı görselleştirme platformudur. Kullanıcılar, Explorer arayüzü üzerinden bloklar, işlemler, kimlikler, ağ yapıları ve zincir kodu geçmişi gibi verilere erişebilir. Platform; şeffaflık, denetlenebilirlik ve kullanıcı deneyimi açısından önemli avantajlar sunar. Denetim gerektiren kurumsal sistemlerde işlem takibi ve sistem bütünlüğünün korunması için etkin bir araç olarak değerlendirilmektedir.
- Hyperledger Avalon: Blok zincir dışı işlem yürütme (off-chain compute) ve gizlilik odaklı veri işleme ihtiyaçlarına yönelik olarak geliştirilen bir güvenli işlem platformudur. Confidential Computing Consortium (CCC) ile iş birliği içinde geliştirilen Avalon, işlem verilerini zincir dışında işleyerek hem gizliliği artırır hem de zincir üzerindeki işlem yükünü azaltır. Özellikle sağlık verisi analitiği, finansal işlem doğrulama ve AI modellerinin gizlilik içinde çalıştırılması gibi alanlarda kullanım potansiyeline sahiptir.
- Hyperledger Bevel: Blok zincir ağlarının kurumsal ortamlarda güvenli, ölçeklenebilir ve otomatik biçimde kurulmasını ve yönetilmesini sağlayan bir sistem otomasyon aracıdır. Bu yapı, özellikle Hyperledger Fabric, Besu ve Indy gibi platformların hızlı ve standartlara uygun şekilde kurulumunu mümkün kılmakta; yazılım geliştirme sürecinde sıkça kullanılan sürekli entegrasyon ve sürekli dağıtım (CI/CD) yöntemleriyle uyumlu çalışmaktadır. Bevel sayesinde yeni katılımcıların ağa eklenmesi, yapılandırma ayarlarının yönetilmesi ve dağıtım süreçlerinin tekrarlanabilir ve izlenebilir biçimde yürütülmesi sağlanmaktadır.
- Hyperledger FireFly: Kurumsal düzeyde Web3 uygulamaları geliştirmek için oluşturulmuş tam yığın (full-stack) bir platformdur. FireFly; akıllı sözleşmelerin yönetimi, tokenizasyon, veri paylaşımı, mesajlaşma altyapısı ve çok taraflı işlem yönetimi gibi temel işlevleri tek bir entegre yapı içinde sunar. Hem izinli blok zincirler hem de geleneksel IT sistemleriyle entegre çalışabilen platform, özellikle tedarik zinciri yönetimi, dijital hak yönetimi ve kurumsal token çözümleri için uygundur. Kurumlara blok zincir tabanlı uygulamaları daha hızlı, güvenli ve standartlara uygun biçimde geliştirme olanağı sunar.
- Hyperledger AnonCreds: Kullanıcıların kimlik bilgilerini ifşa etmeden güvenli şekilde doğrulamasını sağlayan gizlilik odaklı bir dijital kimlik altyapısıdır. Sıfır Bilgi İspatı (Zero Knowledge Proof- ZKP) teknolojisine dayalı olan AnonCreds, doğrulanabilir

kimlik bilgisi yapısını destekler. Hyperledger Indy ve Aries projeleri ile çalışarak, bireylerin kimlik bilgileri üzerinde tam kontrole sahip olduğu "self-sovereign identity" yaklaşımını ileri taşır. Özellikle regülasyona tabi alanlarda dijital kimlik doğrulamanın güvenliğini artırmak ve veri sızıntılarını engellemek için stratejik bir çözüm sunar.

- Hyperledger Aries: Merkezsiz kimlik yönetimi ve dijital cüzdanlar için araçlar ve protokoller sağlar. Özellikle Hyperledger Indy ile entegre çalışarak kullanıcı dostu kimlik yönetimi uygulamalarının geliştirilmesini kolaylaştırır.
- Hyperledger Ursa: Ortak kriptografik algoritma ve yöntemleri içeren standart bir kriptografi kütüphanesidir. Blok zincir geliştiricilerine güvenilir ve yeniden kullanılabilir kriptografik bileşenler sunar, böylece platformlar arasında güvenlik standartlarını yükseltir.

3. Entegrasyon Çözümleri: Zincirler Arası Birlikte Çalışabilirlik: Bu projeler, farklı blok zincir sistemlerinin birbirleriyle etkileşim kurmasına, veri ve işlem aktarımı yapmasına olanak tanır.

- Hyperledger Cacti: Farklı blok zincir ağları arasında güvenli ve birlikte çalışabilir işlem yürütmeyi amaçlayan bir entegrasyon platformudur. Özellikle Ethereum, Hyperledger Fabric, Quorum ve Corda gibi heterojen sistemler arasında veri paylaşımı, token transferi ve durum senkronizasyonu gibi zincirler arası işlemleri mümkün kılar. Modüler yapısı sayesinde yeni blok zincir ağları kolaylıkla sisteme entegre edilebilir. Kurumsal sistemler için zincirler arası köprüleme (cross-chain bridging) mekanizmaları sunan Cacti, dağıtık sistemlerde birlikte çalışabilirliği artırarak dijital varlıkların farklı ağlar arasında güvenli şekilde hareket etmesini sağlar.
- Hyperledger Quilt: Interledger Protocol (ILP) entegrasyonuyla farklı defter sistemleri arasında değer aktarımını mümkün kılmak üzere tasarlanmıştır. Özellikle sınır ötesi ödemeler ve farklı ödeme sistemlerinin entegrasyonu gibi alanlarda kullanıma sunulan Quilt, zincirler arası birlikte çalışabilirliği sağlamaya yönelik erken dönem girişimlerden biri olmuştur. Ancak yeterli kullanım ve katkı sağlanamaması nedeniyle 2022 yılı itibarıyla proje geliştirme süreci durdurulmuştur.

Hyperledger projelerinin mimari tasarımında dikkat çeken temel ilkelerden biri, birlikte çalışabilirlik (interoperability) ve katmanlı entegrasyon yetkinliğidir. Örneğin, Hyperledger Fabric üzerine inşa edilen bir sistemde performans ölçümüne ihtiyaç

duyulması hâlinde Caliper entegre edilebilirken; sistem denetimi ve ağ izleme gibi ihtiyaçlar için Explorer gibi araçlardan yararlanılabilmektedir (Babu vd., 2024; Agbeyangi vd., 2024). Bu yapısal bütünlük sayesinde Hyperledger projeleri, yalnızca bağımsız çözümler değil; aynı zamanda birbirini tamamlayan modüller olarak değerlendirilebilmektedir. Böylece hem teknik geçişkenlik sağlanmakta hem de çok aktörlü, çok katmanlı kurumsal sistemlerde dinamik uygulama senaryoları oluşturulabilmektedir.

Açık kaynaklı geliştirme modeli ile küresel ölçekte benimsenen Hyperledger, yalnızca teknik bir blok zincir çatısı değil; aynı zamanda dijital dönüşüm süreçlerine kurumsal düzeyde katkı sunan stratejik bir altyapı olarak konumlanmaktadır (Milicevic vd., 2021). Özellikle yüksek düzenleme gerektiren sektörlerde Hyperledger bileşenleri, veri güvenliği, erişim denetimi, ölçeklenebilirlik ve denetlenebilirlik gibi kritik ihtiyaçlara çözüm sunmaktadır. Bu yönüyle Hyperledger, blok zincir teknolojisinin somut ve sürdürülebilir biçimde sektörel uygulamalara entegre edilmesini mümkün kılan öncü bir mimari modeldir (Güçlü, 2019).

Bu bileşenlerin temel özellikleri ve uygulama alanları aşağıdaki Tablo 4.1’de özetlenmiştir. Söz konusu tablo, Hyperledger projelerinin mimari çeşitliliğini ve farklı işlevsel rollerini sistematik biçimde sınıflandırarak, kurumsal blok zincir ekosisteminin bütüncül yapısını ortaya koymaktadır.

Tablo 4.1. *Hyperledger projeleri: teknik özellikleri ve uygulama alanları*

Proje Adı	Kapsam ve Amaç	Öne Çıkan Özellikler	Kullanım Alanları
Frameworks (Temel Platformlar)			
Hyperledger Fabric	İzinli, Modüler Yapıda Kurumsal Blok Zincir Platformu	Akıllı Sözleşme Desteği, Kimlik Yönetimi, Erişim Denetimi	Tedarik Zinciri, Finans, Sağlık
Hyperledger Sawtooth	Paralel İşlem Kapasitesine Sahip, Esnek Mimari (Pasif Durumda)	Poet, PBFT, Raft Desteği, Paralel İşlem Yapısı	Iot, Enerji, Büyük Veri Sistemleri
Hyperledger Indy	Merkeziyetsiz Kimlik Doğrulama Platformu	Self-Sovereign İdentity, RBFT Konsensüs Algoritması	Kimlik Doğrulama, E-Devlet Sistemleri
Hyperledger Iroha	Mobil ve Gömülü Sistemler İçin Blok Zincir Platformu	YAC Algoritması, Rol Tabanlı Erişim, Düşük Sistem Gereksinimi	Mobil Uygulamalar, Küçük Ölçekli Sistemler
Hyperledger Besu	Ethereum Uyumlu Hibrit Blok Zincir İstemcisi	EVM Desteği, Pow/Poa/IBFT Algoritmaları	Finansal Uygulamalar, Hibrit Ağlar
Hyperledger Grid	Tedarik Zincirine Özel Modüler Uygulama Altyapısı	Veri Modeli, Akıllı Sözleşme Modülleri, Tedarik Zinciri Odaklı	Gıda, İlaç, Lojistik, Üretim
Hyperledger Burrow	EVM Tabanlı Akıllı Sözleşme Yürütme Platformu (EOL)	Tendermint Tabanlı Hızlı İşlem Onayı, EVM Uyumluluğu	Akıllı Sözleşme Uygulamaları
Destekleyici Araçlar ve Yönetim Bileşenleri			
Hyperledger Caliper	Blok Zincir Platformları İçin Performans Kıyaslama Aracı	TPS, Latency, Throughput Metrikleri	Akademik ve Endüstriyel Test Senaryoları
Hyperledger Explorer	Ağ Görselleştirme ve İşlem İzleme Aracı	Web Arayüzü, İşlem ve Blok Görselleştirme	Kurumsal Ağ İzleme, Sistem Denetimi
Hyperledger Avalon	Off-Chain İşlem ve Veri Gizliliği Altyapısı	Veri Gizliliği, Trusted Compute, Performans Artışı	Sağlık Verisi Analizi, Finansal İşlem Gizliliği
Hyperledger Bevel	Ağların CI/CD ile Otomatik Kurulumu	Fabric, Besu, Indy İçin Devops Entegrasyonu	Blok Zincir Ağı Kurulumu, Sistem Entegrasyonu
Hyperledger FireFly	Kurumsal Web3 Uygulama Geliştirme Platformu	Akıllı Sözleşme Yönetimi, Veri Paylaşımı, Token Yönetimi	Tedarik Zinciri, Dijital Hak Yönetimi, Token Uygulamaları
Hyperledger AnonCreds	ZKP Destekli Dijital Kimlik Altyapısı	ZKP, Doğrulanabilir Kimlik Bilgileri, Gizlilik	Regülasyon Uyumlu Dijital Kimlik Sistemleri

Tablo 4.1. *Hyperledger projeleri: teknik özellikleri ve uygulama alanları (devamı)*

Proje Adı	Kapsam ve Amaç	Öne Çıkan Özellikler	Kullanım Alanları
Frameworks (Temel Platformlar)			
Hyperledger Aries	Kimlik Doğrulama ve Dijital Cüzdan Araçları	DID Desteği, Kullanıcı Merkezli Kimlik Doğrulama	Merkeziyetsiz Dijital Kimlik ve Kimlik Paylaşımı
Hyperledger Ursa	Ortak Kriptografik Algoritma Kütüphanesi	Standart Kriptografik Bileşenlerin Yeniden Kullanımı	Platformlar Arası Güvenlik Altyapısı
Zincirler Arası Entegrasyon Projeleri			
Hyperledger Cacti	Zincirler Arası Birlikte Çalışabilirlik Altyapısı	Farklı Zincirler Arası Veri ve İşlem Transferi	Kurumsal Sistem Entegrasyonu, Zincirler Arası Transfer
Hyperledger Quilt	Interledger Protokolü ile Ödeme Entegrasyonu (EOL)	Ödeme Sistemleri Arasında Değer Aktarımı	Bankacılık, Sınır Ötesi Ödemeler

Kaynak: Tablo yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 4.1'de özetlenen veriler, Hyperledger çatısı altındaki projelerin yalnızca teknik farklılıklarını değil; aynı zamanda kurumsal blok zincir sistemleri için sundukları fonksiyonel çeşitliliği ve stratejik esnekliği de ortaya koymaktadır. Projeler, farklı ihtiyaç ve kullanım senaryolarına hizmet edecek şekilde; temel altyapı sağlayan platformlardan (Fabric, Besu, Grid) performans ve kimlik yönetimi araçlarına (Caliper, AnonCreds, Aries), zincirler arası birlikte çalışabilirliği mümkün kılan çözümlere (Cacti, Quilt) kadar geniş bir yelpazeye yayılmaktadır.

İzinli ağ yapıları, özelleştirilebilir konsensüs algoritmaları, akıllı sözleşme esnekliği, kimlik doğrulama ve off-chain işlem yetenekleri gibi özellikler sayesinde Hyperledger projeleri, sadece teknik sistemler değil; aynı zamanda yüksek regülasyonlu, çok aktörlü kurumsal ortamlarda sürdürülebilir dijital dönüşüm modelleri olarak değerlendirilmektedir. Özellikle Fabric, Indy, Besu ve FireFly gibi projeler; kamu yönetimi, tedarik zinciri, sağlık, finans ve Web3 uygulamaları gibi alanlarda geniş çaplı entegrasyon ve uygulama potansiyeli taşımaktadır.

Bu bağlamda, Hyperledger ekosistemi; yalnızca mevcut teknolojik gereksinimlere çözüm sunmakla kalmamakta, aynı zamanda gelecek vadeden bir blok zincir standardı olarak sektörel uygulamaların temel yapı taşlarından biri hâline gelmektedir.

Hyperledger Fabric, özellikle modüler mimarisi, ölçeklenebilir yapısı ve kanal bazlı veri gizliliği mekanizmaları sayesinde kurumsal uygulamalar arasında en yaygın şekilde benimsenen Hyperledger platformudur. Ancak kurumsal blok zincir uygulamaları yalnızca Hyperledger çatısıyla sınırlı değildir. Corda, Quorum ve Ripple gibi alternatif çözümler de farklı sektörlerde, özellikle finans, lojistik ve ödeme sistemleri gibi alanlarda kullanılmaktadır. Bu nedenle, bir sonraki bölümde Hyperledger Fabric'in bu platformlarla teknik ve yapısal düzeyde karşılaştırmalı bir analizi sunulacaktır.

4.2. Alternatif Kurumsal Blok Zincir Platformları: Corda, Quorum ve Ripple

Bu bölümde ele alınan Corda, Quorum ve Ripple platformları, Hyperledger çatısı dışında geliştirilmiş olmalarına karşın, kurumsal blok zincir uygulamaları alanında yaygın biçimde benimsenen ve Hyperledger Fabric ile benzer kullanım senaryolarına sahip yapılardır. Her biri izinli ağ mimarisi temelinde tasarlanmış olan bu platformlar; veri güvenliği, işlem performansı, sistem entegrasyonu ve düzenleyici uyumluluk gibi kurumsal kriterler açısından karşılaştırılabilir alternatiflerdir (Appinventiv, 2023). Bu kapsamda, söz konusu sistemlerin birlikte değerlendirilmesi, Fabric'in sektörel ve teknik bağlamdaki konumunu çok boyutlu bir bakış açısıyla analiz etmeyi mümkün kılmaktadır.

Kurumsal blok zincir teknolojilerinin gelişimiyle birlikte, farklı sektörlerin ihtiyaçlarına göre özelleştirilmiş çok sayıda platform geliştirilmiştir. Bu noktada yalnızca teknik kapasite değil; veri gizliliği, işlem hacmi, erişim kontrolü ve yasal uyumluluk gibi çeşitli kriterler, platform seçimini etkileyen temel faktörler hâline gelmiştir.

Söz konusu üç alternatif platformun tarihsel ve sektörel arka planı da karşılaştırma açısından önemli bir referans noktasıdır.

- Corda, 2016 yılında finansal kurumların ihtiyaçları doğrultusunda R3 konsorsiyumu tarafından geliştirilmiş; özellikle akıllı sözleşme tabanlı yapısı ve işlem gizliliğine verdiği öncelik ile öne çıkmıştır (R3, 2020).
- Quorum, JPMorgan tarafından 2017 yılında Ethereum'un kurumsal ihtiyaçlara uyarlanmasıyla oluşturulmuş; özel ağ yapısı ve izinli işlem desteği ile dikkat çekmiştir (ConsenSys, 2022).
- Ripple ise 2012 yılında Ripple Labs tarafından geliştirilmiş ve esas olarak sınır ötesi ödeme sistemlerine odaklanmıştır. XRP tabanlı transfer protokolüyle finansal

kurumlar arasında hızlı değer aktarımı sağlamayı hedeflemektedir (Ripple Labs, 2021).

Kurumsal blok zincir platformları genel olarak izinli yapılar üzerine kuruludur. Bu sistemlerde yalnızca yetkilendirilmiş katılımcılar işlem gerçekleştirebilir ve veri okuyabilir. Bu yönüyle, şeffaflık ve mutlak merkeziyetsizlik ilkesine dayanan izinsiz sistemlerden (örneğin Bitcoin ve Ethereum) belirgin şekilde ayrışırlar. İzinli sistemler, yüksek işlem kapasitesi, özelleştirilebilir güvenlik mekanizmaları ve kurumsal denetime uygun altyapılarıyla kamu ve özel sektör uygulamaları açısından daha elverişli çözümler sunmaktadır.

Tablo 4.2, kurumsal (izinli) ve genel amaçlı (izinsiz) blok zincir platformlarını; teknik kapasite, veri gizliliği, enerji verimliliği ve regülasyon uyumu gibi kriterler doğrultusunda sistematik olarak karşılaştırmaktadır. Analize yalnızca Fabric, Corda, Quorum ve Ripple gibi kurumsal çözümler değil; aynı zamanda Ethereum ve Bitcoin gibi yaygın izinsiz sistemler de dahil edilmiştir. Böylece kurumsal ihtiyaçlara odaklanan çözümlerle, merkeziyetsizlik, düşük işlem maliyeti ve kamuya açık kullanım gibi önceliklere sahip sistemler arasındaki farklılıklar çok boyutlu bir bakışla değerlendirilmiştir.

Bu karşılaştırmalı analiz, Hyperledger Fabric'in kurumsal bağlamda neden öncelikli bir platform olarak değerlendirildiğini ortaya koymakta ve diğer sistemlerin güçlü ile sınırlı yönlerini sistematik biçimde sunmaktadır.

Tablo 4.2. *Blok zincir platformlarının teknik ve yönetsel kriterler açısından karşılaştırması*

Özellik	**Hyperledger Fabric**	**Corda**	**Quorum**	**Ripple**	**Ethereum**	**Bitcoin**
Ağ Türü	İzinli	İzinli	İzinli (EVM tabanlı)	İzinli	İzinsiz	İzinsiz
Konsensüs Mekanizması	Kafka, Raft, vb.	Notary	IBFT, Raft	Ripple Protocol	PoS (önce PoW)	PoW
Akıllı Sözleşme Dili	Chaincode (Go/Java)	Flow/Kotlin	Solidity (EVM)	Yok (ön tanımlı)	Solidity	Script (sınırlı)
Token Kullanımı	İsteğe bağlı	Yok	Opsiyonel	XRP zorunlu	Zorunlu (ETH)	Zorunlu (BTC)
Veri Gizliliği	Yüksek (kanal yapısı)	Yüksek	Orta-Yüksek	Düşük-Orta	Düşük	Düşük
TPS (İşlem Hızı)	3.000+ (optimizasyon)	~1.000	~300+	1.500+	~15-20	~7
İşlem Kesinliği Süresi	Anında	Anında	Saniyeler	4-5 saniye	1-2 dakika	~60 dakika
Enerji Tüketimi	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük	Orta	Çok yüksek
Entegrasyon Yeteneği	Yüksek (ERP/CRM uyumlu)	Orta	Orta	Orta	Sınırlı	Yok
Regülasyon Uyumu	Yüksek (KYC/AML vb.)	Yüksek	Orta	Orta	Düşük	Düşük
Kullanım Alanı	Tedarik Zinciri, Sağlık	Finans	Finans, Tedarik	Ödeme Sistemleri	DeFi, NFT, DApp	Dijital Para

Kaynak: Bu tablo, yazar tarafından oluşturulmuş olup, ilgili platformların teknik dökümantasyonları ve güncel kaynaklardan derlenmiştir.

Tablo 4.2'de sunulan karşılaştırmalı analiz, Hyperledger Fabric'in yalnızca kurumsal rakipleri olan Corda, Quorum ve Ripple'a karşı değil; aynı zamanda genel amaçlı ve izinsiz blok zincir sistemleri olan Ethereum ve Bitcoin'e kıyasla da teknik ve yönetsel açıdan önemli avantajlara sahip olduğunu göstermektedir. İşlem hızı, veri gizliliği, regülasyon uyumu ve kurumsal entegrasyon kapasitesi gibi temel parametrelerde Fabric diğer platformlara göre daha gelişmiş bir yapı sunmaktadır.

Corda ve Quorum, belirli sektörlerde etkili çözümler üretmekle birlikte; tedarik zinciri gibi çok aktörlü, yüksek işlem hacmine sahip ve sürekli denetim gerektiren sistemlerde Hyperledger Fabric'in modüler yapısı ve kanal tabanlı veri yönetimi daha esnek ve güvenli bir çözüm sunar. Öte yandan, Ethereum ve Bitcoin gibi izinsiz sistemler merkeziyetsizlik ve açıklık ilkeleri açısından önem taşırken; işlem kesinliği süresi, enerji tüketimi ve veri gizliliği konularında kurumsal kullanım için ciddi sınırlılıklar barındırmaktadır.

Hyperledger Fabric'in, kamu-özel iş birliklerine açık yapısı, yasal düzenlemelere uyum yeteneği ve gerçek zamanlı operasyonel denetim kapasitesi ile kurumsal platformlar arasında öncelikli tercih hâline gelmesi, onu yalnızca teknik bir çözüm değil; stratejik bir altyapı bileşeni olarak da konumlandırmaktadır. Bu bağlamda, bir sonraki bölümde Fabric'in mimari yapısı, teknik bileşenleri ve kurumsal sistemlerle entegrasyon potansiyeli detaylı olarak ele alınacaktır.

4.3. Hyperledger Fabric: Mimari Yapısı, Teknik Bileşenleri ve Kurumsal Uyum Kapasitesi

Hyperledger Fabric, kurumların kendi özel blok zincir sistemlerini güvenli ve esnek biçimde oluşturmasını sağlayan, izinli ve modüler yapıya sahip bir dağıtık defter platformudur. Kurumsal gereksinimlere yanıt verebilmek amacıyla tasarlanmış olan Fabric, işlem tutarlılığı, veri gizliliği ve entegrasyon kolaylığı gibi özellikleriyle regülasyona açık sektörlerde önemli bir alternatif haline gelmiştir (Androulaki vd., 2018). Fabric'in teknik yapısı, işlem modeli, mimari bileşenleri ve performans boyutu üzerinden çok katmanlı biçimde yapılandırılmıştır.

4.3.1. İşlem Modeli: Execute–Order–Validate Yaklaşımı

Hyperledger Fabric'in geleneksel blok zincir sistemlerinden ayrılan en önemli yapısal farklılıklarından biri, işlemleri ağa işleme yöntemidir. Bitcoin ve Ethereum gibi kamuya açık blok zincirlerde kullanılan geleneksel "order–execute" modeli, işlemleri önce sıraya

koyar (order) ardından her düğümde bu işlemleri sırayla çalıştırır (execute). Bu yaklaşım, basit sistemlerde yeterli olsa da çok taraflı ve karmaşık kurumsal yapılarda deterministik olmayan sonuçlar, işlem çakışmaları ve gizlilik sorunları gibi zorluklara neden olabilir.

Hyperledger Fabric bu sorunları aşmak için execute–order–validate olarak adlandırılan üç aşamalı bir işlem modelini benimsemiştir (Cachin, 2016). Bu model, işlemlerin önce simüle edilmesini, ardından sıralanarak blok hâline getirilmesini ve nihayetinde sistemdeki tüm katılımcılar tarafından doğrulanarak blok zincir defterine eklenmesini sağlar. Her aşama aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır (Ruan vd., 2020).

1. Execute (Çalıştırma Aşaması)

Bu aşama, işlemin henüz deftere işlenmeden önce, ağdaki yetkili eş düğümler (endorsing peers) tarafından simülasyon amacıyla çalıştırıldığı aşamadır. İşlem önerisi istemci (client) uygulama tarafından oluşturularak belirli eş düğümlere gönderilir. Eş düğümler, ilgili chaincode'u (akıllı sözleşme kodu) çalıştırır ve işlemin sonucu olan "okuma–yazma seti"ni (read-write set) oluşturur. Bu işlem, defteri değiştirmez; sadece "işlem bu şekilde yürütülürse ne olurdu?" sorusuna verilen bir simülasyon yanıtıdır. Elde edilen sonuçlar, dijital olarak imzalanır ve istemciye geri gönderilir.

2. Order (Sıralama Aşaması)

İstemci, onaylayıcı düğümlerden (endorsers) aldığı dijital imzaları bir araya getirerek işlem paketi oluşturur ve bunu sıralayıcı düğüme (orderer) gönderir. Bu bileşen, işlemleri sıraya koyarak bloklar oluşturur. Orderer düğümü, Kafka, Raft gibi konsensüs algoritmaları ile blok sıralamasını gerçekleştirir. Bu aşama sistemdeki işlemlerin kayıt sırasını belirleyerek deterministik bir blok yapısı oluşturur. Burada da defter henüz güncellenmez.

3. Validate (Doğrulama Aşaması)

Oluşturulan bloklar, sıralayıcı tarafından ağdaki tüm eş düğümlere gönderilir. Her düğüm, gelen blok içindeki işlemleri kendi başına doğrular. Bu doğrulama şu iki adımdan oluşur:

- Endorsement Check: İşlemin, belirlenen onay politikalarına (endorsement policy) uygun şekilde imzalanıp imzalanmadığı kontrol edilir.
- Read–Write Set Check: Execute aşamasında oluşan veriler hâlâ geçerli mi? Bu kontrol edilir. Eğer araya başka bir işlem girmişse işlem geçersiz sayılır (conflict check).

Doğrulanan işlemler deftere yazılır ve world state (güncel durum) veritabanı güncellenir. Blok bu şekilde zincire eklenmiş olur.

4.3.2. Ağ Yapısı (Network Structure)

Hyperledger Fabric, çok aktörlü kurumsal yapılara uygun, görev ayrımına dayalı ve modüler ağ mimarisi sunar; bu yapı katılımcılar arasında güvenli ve izlenebilir veri alışverişine olanak tanır. Bu ağ yapısı; katılımcılar arasında güvenli, izlenebilir ve yüksek performanslı veri alışverişine olanak sağlarken, her bileşenin farklı işlevlere sahip olması nedeniyle görev ayrımı ilkesine dayalı bir yapıya sahiptir. Fabric ağının işleyişi; eş düğümler (peers), sıralayıcılar (orderers), istemciler (clients) ve sertifika yetkilisi (CA) gibi temel bileşenler tarafından sağlanır (Hyperledger Fabric Documentation, 2025).

a) Peer (Eş Düğüm)

Peer'lar, Hyperledger Fabric ağındaki en kritik bileşenlerden biridir. Her eş düğüm, blok zincirin bir kopyasını tutar ve işlemleri doğrulama, saklama ve world state'in güncellenmesinden sorumludur. Peer'lar iki temel türde işlev görebilir:

- Endorsing Peer: İşlem önerilerini çalıştırır ve simülasyon sonuçlarını imzalayarak istemciye geri gönderir.
- Committing Peer: Doğrulanmış blokları ledger'a işler ve world state'i günceller.

Bu roller aynı düğümde birleştirilebileceği gibi ayrı makinelerde de yapılandırılabilir. Peer'lar, aralarında sürekli veri paylaşımını ve tutarlılığı sağlamak için gossip protokolü üzerinden iletişim kurar. Bu yapı, ağın ölçeklenebilirliğini ve senkronizasyon kabiliyetini artırır.

b) Orderer (Sıralayıcı Düğüm)

Orderer bileşeni, Fabric ağının konsensüs katmanını temsil eder. Farklı eş düğümlerden gelen işlem tekliflerini alır, bunları kronolojik sıraya göre düzenler ve blok hâline getirerek tüm ağdaki peer'lara dağıtır. Hyperledger Fabric, madencilik veya zorluk çözme gibi süreçlere gerek duymadığı için daha hafif ve enerji verimli konsensüs algoritmalarına sahiptir. Orderer bileşeni aşağıdaki protokolleri destekler:

- Kafka: Mesaj kuyruklarıyla çalışan bir sıralama sistemi (destekten kalkmıştır).
- Raft: Daha modern ve yerleşik lider-temelli bir sıralama algoritmasıdır.
- BFT-SMaRt (deneysel): Bizans hata toleranslı sistemler için uygulanabilir.

Orderer bileşeni, blok zincir sistemlerinde veri tutarlılığı ve deterministik işlem sıralaması için kritik rol oynar.

c) Client (İstemci)

Client bileşeni, ağdaki kullanıcılar veya dış uygulamalar tarafından kullanılan bir arayüzdür. İstemci, bir işlem önerisi oluşturur ve onu eş düğümlere gönderir. İşlemin onaylanmasının ardından sıralayıcıya iletilmesini sağlar. Client'lar genellikle uygulama katmanında çalışan SDK'lar (örneğin Fabric SDK for Node.js, Java, Go) ile sistemle etkileşim kurar. Bu yapı sayesinde dış sistemlerle Fabric ağı arasında uygulama–ağ bütünlüğü sağlanır.

d) Certificate Authority (CA – Sertifika Yetkilisi)

Hyperledger Fabric, ağ katılımcılarını tanımlamak için klasik kullanıcı adı–şifre sistemi yerine, dijital sertifikalar kullanır. Bu sertifikalar, Fabric CA tarafından oluşturulur ve dağıtılır. CA bileşeni şu işlevleri yerine getirir:

- Katılımcılara X.509 tabanlı dijital kimlik atama,
- Sertifikaların süreli geçerlilik, yetki seviyesi ve erişim kısıtlamalarını belirleme,
- Sertifika iptali ve yenileme işlemlerini yönetme.

CA sistemi, ağdaki tüm işlemlerin yetkilendirilmiş aktörler tarafından yapılmasını sağlar. Bu da sistemin güvenliğini ve regülasyonlara uyum kapasitesini doğrudan artırır.

4.3.3. Veri Yapısı (Data Structure)

Hyperledger Fabric'in veri yapısı, hem geçmiş işlemlerin kalıcı olarak saklanmasını hem de ağın mevcut durumunun anlık olarak erişilebilir olmasını sağlayan iki temel bileşenden oluşur: Blockchain (işlem geçmişi) ve World State (mevcut durum verisi). Bu ikili yapı hem veri bütünlüğünü hem de sistem performansını dengelemeyi amaçlayan hibrit bir veri yönetim mimarisi sunar (Aggarwal ve Kumar, 2021; Hyperledger Foundation, 2020).

a) Ledger (Kayıt Defteri)

Fabric ağında tüm işlemler, değiştirilemez bloklar hâlinde kayıt altına alınır. Bu kayıtlar iki bölümden oluşur:

- Blockchain: İşlemler, sıralı bloklar şeklinde ve yalnızca eklenebilir formatta saklanır. Her blok; işlem verisi, önceki bloğun hash değeri, zaman damgası ve diğer meta verileri içerir. Bu yapı, zincirin bütünlüğünü ve değiştirilemezliğini sağlar.
- World State: Sistemin belirli bir anda sahip olduğu güncel verileri temsil eder. Bu yapı sayesinde, her işlem için tüm zinciri taramak gerekmez; örneğin stok miktarı ya da hesap bakiyesi gibi değerler doğrudan erişilebilir biçimde tutulur.

Bu iki yapı birbirini tamamlayıcıdır: blockchain, geçmişin doğruluğunu garanti ederken; world state, anlık performansı ve işlem verimliliğini artırır.

b) State Database (Durum Veritabanı)

World State'in veritabanı düzeyinde yönetimi için Fabric, iki temel veritabanı altyapısını destekler:

- LevelDB: Anahtar-değer çifti (key–value pair) tabanlı, hafif ve yüksek hızlı bir veritabanıdır. Daha az kaynakla çalışır, karmaşık sorgular gerektirmeyen uygulamalar için uygundur.
- CouchDB: JSON tabanlı veri modeli ile doküman bazlı sorgulara olanak tanır. Karmaşık filtreleme, dizinleme ve veri modelleme işlemleri için uygundur. Özellikle gelişmiş raporlama ve çok kriterli veri analizi yapan sistemlerde tercih edilir.

Durum veritabanı seçimi, uygulamanın ihtiyaç duyduğu veri modeli karmaşıklığı ve performans kriterlerine göre yapılmalıdır.

c) Channel (Kanal) Yapısı

Hyperledger Fabric, veri izolasyonuna olanak sağlayan kanal mimarisi ile öne çıkar. Kanal, ağda yalnızca belirli katılımcıların erişebileceği özel bir defter alanıdır. Her kanal, bağımsız bir ledger ve world state içerir. Böylece:

- Her bir kanal kendi işlemlerini izole biçimde yürütür,
- Diğer kanallardan veri gizlenir,
- Kurumlar arasında hassas bilgi paylaşımı güvenle yönetilebilir.

Bu yapı, çok taraflı anlaşmalarda yalnızca ilgili tarafların veri alışverişine katılmasını sağlar.

d) Private Data Collections (Özel Veri Koleksiyonları)

Kanal yapısına ek olarak, daha ince ayarlı gizlilik gerektiren durumlar için Fabric, Private Data Collection adı verilen bir özelliğe sahiptir. Bu yapıyla:

- Veriler, genel deftere yazılmaz; yalnızca yetkili peer'lar tarafından erişilebilecek şekilde saklanır.
- Diğer düğümler yalnızca bu verilerin "hash" değerini görür.
- Bu sayede veri bütünlüğü korunur ama içerik gizli kalır.

Private Data Collections, özellikle müşteri verisi, fiyat teklifleri veya sözleşme detayları gibi hassas bilgilerin yönetilmesinde kullanılır.

4.3.4. Akıllı Sözleşme Yapısı (Chaincode)

Hyperledger Fabric, ağ üzerindeki işlem mantığını tanımlamak ve kurumsal iş kurallarını uygulamak amacıyla akıllı sözleşmeleri (smart contracts) kullanır. Fabric terminolojisinde bu yapı, "chaincode" olarak adlandırılır. Chaincode, belirli bir işlem gerçekleştiğinde otomatik olarak çalıştırılan ve ağdaki durum verisini güncelleyen uygulama mantığına sahip kod bloklarıdır. Bu yapı, Fabric mimarisinde uygulama katmanının temel bileşeni olarak konumlandırılır (Hyperledger Foundation, 2020).

a) Chaincode Nedir ve Nasıl Çalışır?

Chaincode, ağdaki eş düğümler üzerinde çalıştırılan, belirli iş kurallarını ve işlem mantığını içeren kod parçacığıdır. İstemci uygulaması tarafından bir işlem önerisi başlatıldığında, bu öneri chaincode tarafından simüle edilir. Simülasyonun çıktısı, işlem sonucunun deftere nasıl yansıyacağını belirleyen okuma–yazma setidir. Chaincode'un çalışması, execute–order–validate modelinin "execute" aşamasında gerçekleşir. Bu nedenle chaincode, ağın deterministik çalışması, veri tutarlılığı ve kurallara bağlılık gibi işlevler açısından kritik bir rol oynar.

b) Chaincode'un Yazıldığı Diller

- Fabric, chaincode geliştirmeyi kolaylaştırmak amacıyla genel amaçlı programlama dillerini destekler. Geliştiriciler, Go, Java ve JavaScript / TypeScript dillerde akıllı sözleşmeler yazabilir.

Bu durum, kurumsal bilgi teknolojileri altyapılarının mevcut dil ve geliştirme ortamlarıyla Fabric'i entegre etmesini kolaylaştırmakta; aynı zamanda yazılım geliştirme ve bakım süreçlerini hızlandırmaktadır.

c) Chaincode Yaşam Döngüsü (Lifecycle)

Hyperledger Fabric, chaincode'un sistemde nasıl geliştirileceğini, yükleneceğini, onaylanacağını ve güncelleneceğini açıkça tanımlayan bir chaincode yaşam döngüsü modeline sahiptir. Bu süreç dört temel aşamadan oluşur:

1. Tanımlama (Package): Chaincode yazılır, test edilir ve paketlenir.
2. Kurulum (Install): Chaincode, ilgili eş düğümlere yüklenir.
3. Onay (Approve): Katılımcı kuruluşlar, chaincode'u onaylar.
4. Başlatma (Commit): Onaylanan chaincode, ağa dahil edilerek aktif hâle getirilir.

Bu yapı, her kurumun kendi chaincode stratejisini ayrı ayrı kontrol edebilmesine olanak tanır ve çok aktörlü yapılarda esneklik sağlar. Ayrıca chaincode versiyonlama desteği sayesinde, uygulamalar güncellenebilir ve sürdürülebilir şekilde yönetilebilir.

d) Chaincode'un Sistemdeki Rolü

Fabric'te chaincode sadece işlem yürütmekle kalmaz; aynı zamanda:

- Mevcut durum verisini (world state) günceller,
- İşlem doğrulama kurallarını uygular (örneğin yetkili kullanıcı kontrolü),
- Kurumsal iş akışlarını kod ile temsil eder,
- Dış sistemlerle entegrasyon için arayüz olarak işlev görür.

Bu yapı sayesinde, blok zincir uygulamaları klasik yazılımlara entegre edilebilir hâle gelir.

4.3.5. Hyperledger Fabric'te Tamamlayıcı Teknik Yapılar (Ek Bileşenler)

Hyperledger Fabric'in mimarisi yalnızca temel işlem modeli, ağ yapısı ve veri bileşenlerinden ibaret değildir. Platformun yüksek performans, güvenlik ve kurumsal entegrasyon özelliklerini sürdürülebilir kılan bazı tamamlayıcı teknik bileşenler de sistem mimarisi içinde kritik bir rol oynamaktadır. Mimarinin bütüncül işleyişinde kritik rol oynayan dört tamamlayıcı yapı aşağıda açıklanmıştır. (Yewale, 2018; Hyperledger Foundation, 2025).

a) Varlıklar (Assets)

Hyperledger Fabric ağında işlem gören tüm değerler "varlık (asset)" olarak tanımlanır. Varlıklar, somut (ürün, belge, mülk, araç) ya da soyut (hak, lisans, fikri mülkiyet) nitelikte olabilir. Fabric sisteminde varlıklar, anahtar–değer (key–value) çiftleri şeklinde tanımlanır ve mevcut durum veritabanında (world state) saklanır.

Bu yapı sayesinde varlıkların durumu, sistemdeki chaincode'lar tarafından doğrudan sorgulanabilir ve yönetilebilir. Örneğin, bir ilaç kutusunun parti numarası, üretim tarihi ve dağıtım durumu gibi bilgileri bir varlık nesnesi olarak takip edilebilir. Varlıkların esnek veri modeli, farklı sektörlere yönelik özel uygulamaların oluşturulmasına olanak sağlar.

b) Üyelik Hizmeti Sağlayıcısı (Membership Service Provider – MSP)

Fabric'in izinli yapısında her katılımcı, ağda belirli roller ve yetkilerle tanımlanır. Bu erişim kontrolü MSP tarafından yönetilir. MSP; kullanıcılara, düğümlere ve kuruluşlara ait dijital kimlikleri tanımlar ve kimlik doğrulamasını sağlar. Bu kimlikler, Fabric CA tarafından oluşturulan X.509 sertifikalarına dayanır.

MSP, hangi kullanıcının hangi işlemleri gerçekleştirme yetkisine sahip olduğunu belirler. Örneğin, yalnızca bir tedarikçi kuruluşun belirli kanala erişmesini, belirli chaincode'ları çalıştırabilmesini veya özel veri koleksiyonlarına ulaşabilmesini MSP aracılığıyla sınırlandırmak mümkündür. Bu yapı, regülasyonlara uyum ve veri sorumluluğu açısından temel güvenlik katmanlarından biridir.

c) İletişim Güvenliği: Taşıma Güvenliği Katmanı (Transport Layer Security-TLS)

Hyperledger Fabric, ağdaki düğümler arası veri iletişiminin güvenliğini sağlamak için TLS protokolünü kullanır. TLS, ağ üzerindeki mesajların üçüncü şahıslar tarafından izlenmesini, değiştirilmesini veya taklit edilmesini engelleyen şifreleme tabanlı bir güvenlik katmanıdır.

Fabric'te TLS iki düzeyde uygulanabilir:

- One-way TLS: Yalnızca sunucu kimlik doğrulaması yapar.
- Mutual TLS: Hem istemci hem sunucu birbirlerinin kimliğini doğrular.

Mutual TLS kullanımı, özellikle hassas ve yüksek güvenlik gerektiren sektörlerde önerilmektedir. Bu katman sayesinde sistemdeki tüm iletişim kanalları, dış tehditlere karşı yüksek koruma altına alınır.

d) İzleme ve Performans Araçları: Explorer ve Caliper

Fabric'in teknik altyapısını yalnızca kurmak değil, aynı zamanda izlemek ve değerlendirmek de kurumsal operasyonların bir parçasıdır. Bu amaçla iki önemli araç kullanılmaktadır:

- Hyperledger Explorer: Blok zincir ağındaki bloklar, işlemler, düğümler ve akıllı sözleşme durumu gibi verileri kullanıcı dostu bir arayüzle görselleştirir. Ağ üzerindeki etkinliklerin izlenmesini ve denetimlerin kolaylaştırılmasını sağlar.
- Hyperledger Caliper: Fabric ağına ait işlem hızı, gecikme süresi, başarı oranı ve kaynak kullanımı gibi performans metriklerini ölçmek için kullanılan bir test aracıdır. Caliper, farklı yapılandırmaların karşılaştırılması ve performans kısıtlarının tespiti için kullanılır.

Bu araçlar, Fabric'in sadece kurulum aşamasında değil, işletme sürecinde de optimize edilmesine ve sürdürülebilirliğine katkı sunar.

4.3.6. Hyperledger Fabric'te İşlem Akışı (Transaction Flow)

Hyperledger Fabric'in mimari bileşenleri ve teknik altyapısı önceki bölümlerde detaylı şekilde açıklanmıştır. Ancak bu bileşenlerin sistem içinde nasıl birlikte çalıştığı, işlemlerin başlangıçtan sonlandırılmasına kadar nasıl bir yol izlediği açıklanmadan mimari bütünlük tamamlanmış sayılmaz. Bu bağlamda, execute–order–validate modeli temel alınarak, bir işlemin Fabric ağı içinde nasıl gerçekleştiği aşağıda adım adım sunulmaktadır (Xu vd., 2021; Yewale, 2018).

Adım-1: İşlem Önerisinin Gönderilmesi

İstemci (client) uygulaması, gerçekleştirmek istediği işlemi işlem önerisi (transaction proposal) hâlinde eş düğümlere gönderir. Bu öneri, çalıştırılacak chaincode fonksiyonunu ve kullanılacak parametreleri içerir. Bu aşamada deftere herhangi bir veri yazılmaz; sadece teklif yapılır.

Adım-2: Simülasyon ve Onaylama

İlgili eş düğümler, chaincode'u çalıştırarak işlemi simüle eder. Bu simülasyon, işlemin sistemde gerçekleştirilmesi hâlinde ne olacağını belirler. Sonuç olarak bir okuma–yazma seti oluşur ve bu çıktı dijital olarak imzalanarak istemciye gönderilir. Bu, işlemin sistem kurallarına uygun olduğunu kanıtlayan teknik bir ön değerlendirmedir.

Adım-3: Onayların Toplanması ve Sıralayıcıya İletim

İstemci, yeterli sayıda eş düğümden imzalı onay aldıktan sonra işlem paketini sıralayıcı düğüme iletir. Sıralayacı düğüm, işlemleri sıraya koyarak bloklar oluşturur. Raft gibi bir konsensüs algoritmasıyla bu bloklar ağ genelinde tutarlı şekilde sıralanır.

Adım-4: Blokların Dağıtımı ve Doğrulama

Oluşturulan bloklar, sıralayıcı tarafından tüm eş düğümlere dağıtılır. Düğümler, her işlem için iki temel doğrulama yapar:

- Endorsement policy'ye uyum,
- World state ile çakışma kontrolü (conflict check).

Geçerli işlemler onaylanır; geçersiz olanlar blok içine alınsa bile işaretlenir ve etkisiz kılınır.

Adım-5: Deftere Yazım ve Mevcut Durum Güncellemesi

Doğrulanan işlemler blok zinciri defterine kalıcı olarak yazılır. Aynı zamanda, işlem sonuçları mevcut durum veri tabanına yansıtılır. Bu sayede sistem hem geçmişin değiştirilemezliğini hem de anlık durumun erişilebilirliğini birlikte sağlar.

4.3.7. Performans ve Kurumsal Uyum Analizi

Hyperledger Fabric'in kurumsal sistemler için uygunluğunu değerlendirebilmek, yalnızca teknik mimarisinin değil; aynı zamanda performans kapasitesi, regülasyonlara uyumu ve kurumsal entegrasyon kolaylığının da bütüncül biçimde analiz edilmesini gerektirir. Bu bölümde, Fabric'in ölçeklenebilirlik, işlem kesinliği, enerji verimliliği, veri gizliliği ve uyum standartları açısından sunduğu avantajlar detaylandırılmaktadır.

a) İşlem Hacmi ve Performans Kapasitesi

Hyperledger Fabric, işlem başına kesinlik sağlama, madencilik gerektirmeyen konsensüs algoritmaları ve paralel işlem işleme kabiliyeti sayesinde yüksek işlem hacimlerini destekleyebilmektedir. Yapılan akademik ve endüstriyel testlerde Fabric'in 3.000'den fazla TPS kapasitesine ulaşabildiği rapor edilmiştir (Das vd., 2025).

Fabric'in işlem modeli, bloklar oluştuktan sonra işlemlerin eş zamanlı doğrulanmasını mümkün kılar. Böylece hem işlem gecikme süresi azaltılır hem de işlem kesinliği

(finality) anında sağlanır. Çatallanma (fork) riski bulunmaması, özellikle finans ve tedarik zinciri gibi işlem bütünlüğünün kritik olduğu sistemlerde önemli bir avantajdır.

b) Enerji Verimliliği ve Operasyonel Sadelik

Fabric, konsensüs algoritması olarak Raft veya Kafka gibi madencilik içermeyen yöntemleri kullandığı için Bitcoin gibi iş ispatı (PoW) tabanlı sistemlere kıyasla son derece düşük enerji tüketimine sahiptir (Khan vd., 2025). Bu yapı aşağıdaki gibi avantajlar sunar.

- Daha az kaynak tüketimi,
- Daha çevre dostu kurulum,
- Kurumsal bütçelere uygun operasyonel maliyet,

Aynı zamanda sistem çatallanmadığı için işlem tekrarlarının yaratacağı kaynak israfı da önlenmiş olur.

c) Gizlilik, Erişim Denetimi ve Regülasyon Uyumu

Hyperledger Fabric'in izinli yapısı, her katılımcının dijital kimlik ile tanımlanmasını ve yetkilendirilmiş rollerle sınırlı erişim kurallarına tabi olmasını sağlar. Bu kapsamda sistem; MSP ile kullanıcı tanımlama ve rol atama, TLS protokolü ile ağ iletişim güvenliği, kanal yapısı ve özel veri koleksiyonları ile hassas veri koruması gibi özellikleriyle, kişisel verilerin korunması, finansal denetim ve sektörel regülasyonlara uyum açısından güçlü bir altyapı sunar.

d) Entegrasyon Kolaylığı ve Esneklik

Fabric, yaygın programlama dilleri olan Go, Java ve JavaScript ile geliştirilebilen chaincode yapısına sahiptir. Ayrıca, dış sistemlerle veri alışverişini sağlayan REST tabanlı servis arayüzleri (API'ler) ve geliştiricilerin ağa erişim sağlayabilmesini kolaylaştıran yazılım geliştirme kitleri (SDK'lar) ile sunulmaktadır (Androulaki vd., 2018). Bu yapı, mevcut kurumsal sistemlerle özellikle ERP, CRM ve tedarik zinciri yazılımlarıyla entegrasyonu kolaylaştırmaktadır. Modüler mimarisi sayesinde ise farklı konsensüs algoritmaları, kimlik doğrulama sistemleri ve veritabanı türleriyle birlikte çalışabilmekte, böylece teknolojik esneklik ve uzun vadeli sürdürülebilirlik açısından önemli bir avantaj sunmaktadır.

Kurumsal ölçekte blok zincir teknolojilerinin benimsenebilmesi için yalnızca işlem hızı ve enerji verimliliği yeterli değildir. Kimlik doğrulama, veri gizliliği, erişim kontrolü ve denetlenebilirlik gibi özellikler, regülasyona tabi sektörlerde teknolojik altyapının seçiminde belirleyici kriterler hâline gelmiştir. Hyperledger Fabric, bu bağlamda sadece teknik değil; aynı zamanda yönetsel ve hukuki uyum boyutlarıyla da kapsamlı çözümler sunmaktadır. Tablo 4.3'te, Fabric'in kurumsal uyumluluk kriterleri açısından sunduğu avantajlar sistematik biçimde özetlenmektedir.

Tablo 4.3. *Hyperledger fabric'in kurumsal uyum boyutunda sağladığı özellikler*

Uyum Alanı	**Fabric'in Sağladığı Çözüm**
Kimlik ve Erişim Kontrolü	Dijital Sertifikalar, MSP Yapısı, Kullanıcı Rol Yönetimi
Veri Gizliliği	Kanal Mimarisi, Özel Veri Koleksiyonları, TLS İletişim Güvenliği
Regülasyon Uygunluğu	KYC/AML (Müşteri Tanıma ve Kara Para Aklamayı Önleme) Uyumu, İzlenebilirlik, İşlem Kaydı Bütünlüğü
Güncellenebilirlik	Chaincode Versiyonlama ve Yaşam Döngüsü ile Sözleşme Yönetimi
Denetlenebilirlik	Explorer ve Log Tabanlı İzleme Araçlarıyla Denetim Kolaylığı

Kaynak: Tablo yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 4.3'te yer alan kurumsal uyum kriterleri, Hyperledger Fabric'in yalnızca bir blok zincir platformu değil, aynı zamanda kurumsal dijital yönetişim aracı olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Katılımcıların dijital olarak tanımlanması, hassas verilerin sınırlı erişimle korunması ve işlemlerin izlenebilirliği gibi özellikler, Fabric'i tedarik zinciri, finans, sağlık ve kamu sektörleri gibi yüksek regülasyon baskısı altındaki alanlar için öne çıkarmaktadır. Ayrıca chaincode yaşam döngüsü ve modüler yapı sayesinde, sistem esnek biçimde güncellenebilir ve kurumlara özel hale getirilebilir. Bu yönüyle Fabric, yalnızca teknik uyum değil, aynı zamanda yasal ve operasyonel bütünlük açısından da güçlü bir uyum çerçevesi sunmaktadır.

4.3.8. Hyperledger Fabric'in Avantajları ve Sınırlılıkları

Hyperledger Fabric'in kurumsal uygulamalarda hızla benimsenmesinin temel nedeni, sunduğu esnek mimarinin yüksek işlem kapasitesi, veri güvenliği ve yasal uyumluluk gibi önceliklerle uyumlu biçimde çalışabilmesidir (Zanfino, 2024). Bununla birlikte, her dağıtık sistem gibi Fabric'in de teknik sınırlamaları ve operasyonel zorlukları mevcuttur (Toumia vd., 2021; Al Salih, 2024). Bu kapsamda, platformun güçlü ve zayıf yönleri, farklı kurumsal senaryolara göre analitik biçimde değerlendirilmiştir.

a) Temel Avantajlar

1) İzinli Ağ Yapısı ve Kimlik Yönetimi: Fabric, her katılımcının dijital sertifikalarla tanımlandığı, kimlik doğrulamanın merkezi otoriteler aracılığıyla sağlandığı izinli bir yapıya sahiptir. Bu özellik, regülasyona tabi sektörlerde "Müşterini Tanı" (KYC – Know Your Customer) ve "Kara Para Aklamayı Önleme" (AML – Anti-Money Laundering) gibi yasal uyum koşullarını desteklemektedir.

2) Veri Gizliliği ve Mahremiyet: Kanal yapısı ve özel veri koleksiyonları, hassas verilerin yalnızca yetkili taraflar arasında paylaşılmasına imkân tanır. Bu sayede ticari sırlar ve müşteri bilgileri gibi hassas veriler yüksek düzeyde korunur.

3) Görece Yüksek Performans ve Anlık İşlem Kesinliği: Madencilik gerektirmeyen konsensüs algoritmaları sayesinde Fabric, düşük gecikme süresiyle yüksek işlem kapasitesine ulaşabilir. İşlemler kesinlik kazandığında değiştirilemez hâle gelir, çatallanma yaşanmaz. Ancak, günümüzde bazı rakip platformlar da benzer performans düzeylerine ulaşmaya başladığı için bu avantaj görece alana dönüşmektedir.

4) Esnek Akıllı Sözleşme Geliştirme: Chaincode'lar Go, Java, JavaScript gibi genel dillerle yazılabilir. Bu durum, mevcut kurumsal yazılımlarla entegrasyonu kolaylaştırır ve yazılım geliştirme sürecini hızlandırır.

5) Modülerlik ve Uyarlanabilirlik: Fabric, konsensüs algoritması, veri yapısı, kimlik hizmeti ve veritabanı gibi bileşenlerin özelleştirilebildiği modüler bir mimari sunar. Bu da farklı sektörler ve operasyonel ihtiyaçlar için özelleştirilmiş sistemlerin oluşturulmasına olanak tanır.

b) Temel Sınırlılıklar

1) Teknik Karmaşıklık ve Öğrenme Eğrisi: Fabric'in ağ kurulumu, kanal yönetimi, düğüm konfigürasyonu ve sertifika süreçleri hâlâ ileri düzey teknik uzmanlık gerektirir. Son yıllarda geliştirilen Fabric Operator, Bevel gibi araçlar bu eşiği düşürmüş olsa da sistemin üretim ortamına geçirilmesi hâlâ uzman ekiplerce yürütülmelidir.

2) Bizans Hata Toleransı (BFT) Eksikliği: Fabric'in varsayılan konsensüs mekanizmaları (Raft, Kafka), sadece çökme hatalarına karşı dayanıklıdır. Kötü niyetli aktörlerin bulunduğu senaryolarda tam BFT sağlayan yapılar için harici çözümler gereklidir.

3) Ölçeklenebilirlik ve Yönetim Zorlukları: Fabric performans açısından güçlü olsa da kanal sayısı ve özel veri koleksiyonlarının artmasıyla birlikte ağın yönetim karmaşıklığı ve kaynak tüketimi artmaktadır. Özellikle geniş ölçekli çok kuruluşlu uygulamalarda bu durum operasyonel yük doğurabilmektedir.

4) Token Uyumunun Sınırlılığı: Fabric, temelinde kripto varlık üretimine dayalı bir yapıya sahip değildir. Tokenizasyon süreçleri harici modüller (örneğin Fabric Token SDK, FireFly) ile mümkündür; ancak bu yetenek, Ethereum gibi yerleşik token ekonomisine sahip platformlara kıyasla daha az olgundur. Bu durum, özellikle DeFi benzeri uygulamalarda kısıtlayıcı olabilir.

Hyperledger Fabric'in mimari yapısı ve teknik bileşenleri, bu bölümde avantaj ve sınırlılık boyutlarıyla birlikte değerlendirilmiştir. Tablo 4.4, kurumsal uygulamalarda öne çıkan güçlü yönleri ve dikkat edilmesi gereken sınırlayıcı faktörleri sistematik biçimde özetlemektedir. Bu yapı, teknik karar vericiler ve stratejik planlayıcılar için yol gösterici bir çerçeve sunmaktadır.

Tablo 4.4. *Hyperledger fabric'in kurumsal avantajları ve sınırlılıkları*

Kategori	Özellik	Açıklama
Avantajlar	İzinli Ağ ve Kimlik Yönetimi	Katılımcılar Tanımlıdır; İşlemler İzlenebilir, Regülasyon Uyumludur.
	Gizlilik ve Veri Mahremiyeti	Kanallar ve Özel Veri Koleksiyonları ile Hassas Veri Yalnızca Yetkili Taraflara Açıktır.
	Yüksek Performans ve Kesinlik	Madencilik Yoktur; Anlık İşlem Kesinliği ile Yüksek TPS Değeri Sunar.
	Esnek Akıllı Sözleşmeler	Genel Programlama Dilleriyle Yazılır; Mevcut Kurumsal Yazılımlara Kolayca Entegre Olur.
	Modülerlik ve Uyarlanabilirlik	Konsensüs, Kimlik ve Veritabanı Modülleri Özelleştirilebilir.
Sınırlılıklar	Teknik Karmaşıklık	Ağ Kurulumu ve Yönetimi Karmaşıktır; Uzmanlık Gerektirir.
	Sınırlı BFT Desteği	Varsayılan Algoritmalar Kötü Niyetli Saldırılara Karşı Sınırlı Tolerans Sağlar.
	Performans Eşiği	Çok Yüksek Ölçeklerde İşlem Performansı Düşebilir; Kaynak Kullanımı Artar.
	Token Uyum Eksikliği	Token Ekonomileriyle Doğal Uyumlu Değildir; Harici Entegrasyon Gerekir.

Kaynak: Tablo yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 4.4, Hyperledger Fabric'in özellikle kimlik yönetimi, veri gizliliği, işlem hızı ve kurumsal entegrasyon alanlarında sunduğu yüksek düzeyli avantajları ortaya koymaktadır. Ancak aynı zamanda sistem kurulumu ve bakımındaki teknik karmaşıklık, sınırlı BFT toleransı ve token ekonomileriyle doğal entegrasyon eksikliği gibi noktalar, uygulama sürecinde dikkatle değerlendirilmesi gereken sınırlılıklar olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle kurumların Fabric'i tercih ederken sadece teknik avantajlara

değil; altyapı yeterliliği, insan kaynağı, kullanım senaryoları ve uzun vadeli bakım stratejilerine göre karar vermesi gerekmektedir. Yüksek regülasyonlu ve çok aktörlü ortamlarda bu avantajlar öne çıkarken, kamuya açık ve esnek uygulamalar için başka platformların tercih edilmesi gerekebilir.

Hyperledger Fabric'in sunduğu teknik ve yapısal avantajlar, özellikle çok aktörlü, düzenleyici uyum gerektiren ve hassas veri yönetimi içeren kurumsal uygulamalarda belirgin biçimde öne çıkmaktadır. Bu çerçevede bir sonraki bölümde, söz konusu platformun yüksek güvenlik ve şeffaflık gerektiren bir alan olan ilaç tedarik zincirine entegrasyon potansiyeli ayrıntılı biçimde değerlendirilecektir.

BEŞİNCİ BÖLÜM

İLAÇ TEDARİK ZİNCİRİNDE BLOK ZİNCİR UYGULAMALARI VE TÜRKİYE İÇİN HYPERLEDGER FABRİC TABANLI BİR YAKLAŞIM ÖNERİSİ

Dijital dönüşüm, özellikle sağlık ve ilaç sektörlerinde şeffaflık, veri bütünlüğü ve güvenli erişim gibi temel ihtiyaçları daha da görünür hâle getirmiştir. Bu bağlamda, blok zincir teknolojisinin dağıtık yapısı ve değiştirilemez kayıt yeteneği, tedarik zincirinin yeniden yapılandırılması için güçlü bir çözüm alternatifi sunmaktadır. Bu bölümde, ilaç tedarik zincirinde blok zincir temelli uygulama örnekleri ele alınmakta ve Hyperledger Fabric platformunun Türkiye özelinde bu alana nasıl entegre edilebileceğine ilişkin bir yaklaşım önerisi sunulmaktadır. Küresel projelerden elde edilen bulgular ışığında, mevcut sistemlerin değerlendirilmesi ve olası yeniden tasarım gereklilikleri tartışılmaktadır.

5.1. Hyperledger Fabric'in İlaç Tedarik Zincirinde Kullanım Potansiyeli

İlaç tedarik zinciri, çok sayıda aktörün katılımıyla yürütülen, yüksek düzeyde regülasyon gerektiren ve kamu sağlığı açısından stratejik öneme sahip çok katmanlı bir sistemdir. Bu sistemin etkin biçimde işlemesi, yalnızca ürünlerin doğru zamanda ve doğru yerde bulunabilirliğini sağlamakla kalmaz; aynı zamanda sahtecilik, stokçuluk, ruhsat dışı satış ve ilaç kıtlığı gibi yapısal risklerin önlenmesinde de kritik rol oynar. Ancak mevcut birçok sistemde karşılaşılan temel sorunlardan biri, bilgi akışının parçalı, sınırlı erişimli ve gecikmeli biçimde gerçekleşmesidir.

Bu noktada Hyperledger Fabric'in sunduğu izinli, modüler ve özelleştirilebilir blok zincir mimarisi; ilaç tedarik zincirinde şeffaflık, izlenebilirlik, veri güvenliği ve işlem performansı açısından yüksek dönüşüm potansiyeli taşımaktadır. Platform, hem veri mahremiyetini koruyabilen kanal tabanlı yapısı hem de akıllı sözleşmeler ile kurala bağlı süreçleri otomatikleştirme yeteneği sayesinde çok paydaşlı sağlık sistemleri için uyumlu bir çözüm sunmaktadır.

İlaç tedarik zincirinde karşılaşılan yapısal sorunlara yönelik olarak Hyperledger Fabric'in sunabileceği çözümleri daha sistematik biçimde değerlendirebilmek amacıyla, tablo 5.1'de bu platformun potansiyel katkı sağlayabileceği başlıca fonksiyonel alanlar özetlenmektedir. Her bir alan, ilaç tedarik zincirinin farklı katmanlarında görülen ihtiyaçlara doğrudan yanıt verebilecek biçimde teknik ve yönetişimsel katkılar sunmaktadır.

Tablo 5.1. *Hyperledger fabric'in ilaç tedarik zincirine katkı sağladığı fonksiyonel alanlar*

Fonksiyonel Alan	Açıklama
Veri İzlenebilirliği ve Şeffaflık	İlaçların Üretimden Son Kullanıcıya Kadar Tüm Hareketleri Blok Zincire Kaydedilir ve Değiştirilemez.
Kanal Yapısı ile Gizlilik ve Veri Paylaşımı	Paydaşlar Arası Veri Yalnızca İlgili Taraflarca Görülebilir. Ticari Mahremiyet Korunur.
Akıllı Sözleşmeler ile Otomasyon ve Güvenlik	Koşula Bağlı Süreçler Otomatik Hale Gelir; Hata ve Müdahale Riski Azalır.
Veri Bütünlüğü ve Denetim Kolaylığı	Tüm İşlemler Zaman Damgalı ve Değiştirilemez Olduğu İçin Denetim Kolaylaşır.
Kamu-Özel İş Birliği ve Regülasyonlara Uyum	Kamu Kurumları ile Özel Firmalar Güvenli Veri Alışverişi Yapabilir.
Uluslararası İş Birlikleri	Ülkeler Arası İş Birlikleri Veri Mahremiyetini Koruyarak Yürütülebilir.
Ölçeklenebilirlik ve Performans Yönetimi	Yüksek İşlem Hacmine Uygun; Paralel İşlem Altyapısı ile Büyütülebilir.

Kaynak: Tablo yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 5.1'de yer alan fonksiyonel alanlar, Hyperledger Fabric'in yalnızca teknik bir altyapı değil, aynı zamanda yönetişimsel ve sistemik bir dönüşüm aracı olarak değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. Platformun sunduğu şeffaf işlem kayıtları, kanal yapısı ile veri izolasyonu, akıllı sözleşmeler yoluyla süreç otomasyonu gibi yetenekler, ilaç tedarik zincirinde karşılaşılan sahtecilik, izlenebilirlik eksikliği, manuel müdahale ve veri güvenliği gibi sorunlara doğrudan çözüm sunmaktadır. Ayrıca, sistemin modüler yapısı ve yüksek işlem kapasitesi sayesinde, yalnızca ulusal düzeyde değil, uluslararası iş birliğine açık, genişleyebilir ve denetlenebilir dijital tedarik zinciri modelleri geliştirmek de mümkün hâle gelmektedir.

5.2. İlaç Tedarik Zincirinde Blok Zincir Temelli Küresel Uygulama Örnekleri

Blok zincir teknolojisi, ilaç tedarik zincirinde yalnızca teorik bir potansiyel değil; aynı zamanda dünya genelinde farklı kurumsal ve ulusal aktörler tarafından pratikte uygulamaya geçirilmiş çözümler olarak da karşımıza çıkmaktadır. Bu çözümler, sahtecilik önleme, ruhsatlandırma süreçlerinin dijitalleştirilmesi, hasta güvenliğinin sağlanması, soğuk zincir takibi ve ürün hareketlerinin gerçek zamanlı izlenmesi gibi çok boyutlu hedefler doğrultusunda geliştirilmektedir.

Bu bölümde, 2016–2021 döneminde başlatılmış veya pilot düzeye ulaşmış öncü projeler Tablo 5.2'de, 2022 sonrası güncellenmiş ya da yeni başlatılmış genişletilmiş uygulamalar ise Tablo 5.3'te sistematik olarak sınıflandırılmıştır. Her iki tablo, blok zincir temelli çözümlerin teknolojik altyapıları, kapsamları, başarı düzeyleri ve uygulama bölgeleri açısından karşılaştırmalı biçimde analiz edilmesine imkân tanımaktadır.

5.2.1. İlk Dönem Uygulamalar (2016–2021)

Blok zincir teknolojisinin ilaç tedarik zincirine entegrasyonu, özellikle 2016–2021 yılları arasında çeşitli pilot uygulamalar ve deneysel projelerle somut hâle gelmeye başlamıştır. Bu dönemde başlatılan uygulamalar; sahte ilaçlarla mücadele, klinik araştırmalarda veri güvenliği, soğuk zincir izlenebilirliği ve ruhsatlandırma süreçlerinin dijitalleştirilmesi gibi çok boyutlu hedefler etrafında şekillenmiştir.

Aşağıda yer alan Tablo 5.2, bu erken dönem projeleri; uygulama bölgeleri, kullanılan blok zincir altyapıları, kapsadıkları süreçler ve güncel durumları açısından sistematik biçimde özetlemektedir. Tabloda yer alan bilgiler, sonraki sayfalarda ayrıntılı olarak açıklanacak olan projelerin karşılaştırmalı bir çerçevesini sunmaktadır.

Tablo 5.2. *Blok zincir temelli ilaç tedarik zinciri uygulamaları: küresel proje örnekleri*

Proje Adı	Ülke / Bölge	Başlangıç Yılı	Blok Zincir Altyapısı	Kapsadığı Süreçler	Mevct Durum (2025)	Kaynak
IBM ve Moderna Pilot	ABD	2021	Hyperledger Fabric	Aşı Takibi, Dağıtım Zinciri İzleme	Pilot, Kapandı	IBM Newsroom, (2021)
PharmaLedger	AB	2020	Quorum (Ethereum), OpenDSU	Epı, Klinik Onam, Sahtecilik Önleme, Iot	Pilot Tamamlandı, Dernekleşti	Innovative Health Initiative, (2020)
UAE Sağlık Blok Zinciri	BAE	2020	Özel Ağ	Ruhsat Kayıtları, İlaç Bilgi Sistemi	Aktif	HealthManagement.org, (2020)
eZTracker (Zuellig Pharma)	Asya-Pasifik	2019	SAP Blockchain (Hyperledger)	Ürün Doğrulama, Aşı İzleme, Sahtecilik Tespiti	Aktif	SAP, (2019).
CSecure (Bayer-VeChain)	Çin	2019	VeChainThor (ToolChain)	Klinik Araştırma Lojistiği	Pilot Tamamlandı	Coindesk, (2020).
MediConnect	Birleşik Krallık / Zimbabve	2019	Stratis	Reçete Takibi, Reçete İstismarı Önleme, Sahte Ürün Tespiti	Pilot, Kısmen Aktif	EIN Presswire, (2021)
PhUN (IBM/Merck/Walmart)	ABD	2019	Hyperledger Fabric (tahmini)	DSCSA Uyumu, Soğuk Zincir, Geri Çağırma	Pilot, Ticarileşmedi	Merck ve Co (2019).
Trace Histories (TraceLink)	ABD	2019	Özel (Quorum/Fabric Karışımı)	DSCSA Uyumu, Geri Çağırma, Veri Paylaşım Standartları	Üretim Ortamında Değil	TraceLink. (2019).
BI ve IBM Klinik Pilot	Kanada	2019	Hyperledger Fabric	Klinik Veri Bütünlüğü, Hasta Onamı, Denetim İzi	Pilot Tamamlandı	IBM Canada Newsroom, (2019)
FarmaTrust (Moğolistan Pilot)	Moğolistan / İngiltere	2018	Ethereum + AI/Big Data	Ulusal Takip, Eczane Seviyesi Denetim, Veri Analizi	Pilot Tamamlandı	FarmaTrust, (2018)
MediLedger	ABD	2017	Ethereum (İzinli)	Sahiplik Takibi, Ürün İadesi, Fiyat/Sözleşme Yönetimi	Aktif	Chronicled ve The LinkLab, (2017).
Blockpharma	Fransa	2017	Ethereum	Son Kullanıcı Doğrulama, QR Kod ile Sahtecilik Kontrolü	Pasif	OPTEL Group, (2021)
Modum	İsviçre	2016	Ethereum + Hyperledger	Soğuk Zincir İzleme, Iot Entegrasyonu	Satın Alındı (Roambee)	KPMG, (2020).

Tablo 5.2'de sunulan projeler, blok zincir teknolojisinin ilaç tedarik zinciri bağlamında nasıl farklı ihtiyaçlara yanıt verebilecek şekilde uygulandığını ortaya koymaktadır. MediLedger (ABD) gibi projeler regülasyon uyumu ve ulusal güvenlik boyutuyla öne çıkarken, PharmaLedger (AB) projesi veri şeffaflığı, klinik süreç yönetimi ve çok paydaşlı yönetişim modeli açısından dikkat çekmektedir.

eZTracker (Asya-Pasifik) gibi uygulamalar, tüketicilerin satın aldıkları ilaçların orijinalliğini mobil uygulama aracılığıyla kendilerinin doğrulayabildiği kullanıcı odaklı çözümler sunmaktadır. TraceLink, BI ve IBM gibi projeler sektörel dönüşüme referans oluşturmuş ancak tam ölçekli uygulamaya geçememiştir.

Projelerin başarı düzeyleri incelendiğinde, ortak özellik olarak şu faktörlerin belirleyici olduğu görülmektedir:

- Regülasyon desteği,
- Çok paydaşlı yönetişim modeli,
- Blok zincir mimarisinin uygunluğu (izinli sistemler),
- Kurumsal adaptasyon kapasitesi.

Öte yandan birçok projenin yalnızca pilot aşamada kalması, blok zincir teknolojisinin hâlâ bazı yapısal, finansal ve mevzuatsal engellerle karşı karşıya olduğunu göstermektedir.

Tablo 5.2 de yer alan projelerin ortak yönleri ve çeşitlenen uygulama alanları, blok zincir teknolojisinin ilaç tedarik zincirinde çok yönlü bir çözüm potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Ancak her proje, farklı teknolojik tercihler, regülasyon bağlamları ve paydaş yapıları çerçevesinde geliştirilmiştir. Bu nedenle, tablo verilerinin ötesine geçerek seçilen projelerin ayrı ayrı incelenmesi hem teknolojik mimarilerin hem de stratejik yaklaşımların daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayacaktır. Aşağıda, uygulama kapsamı, geliştirici kurumları, kullanılan blok zincir altyapısı ve elde edilen çıktılar bakımından öne çıkan bazı projeler detaylı biçimde sunulmaktadır.

❖ **MediLedger Projesi (ABD, 2017)**

Amaç ve Kapsam

MediLedger projesi, Amerika Birleşik Devletleri'nde uygulamaya konan İlaç Tedarik Zinciri Güvenlik Yasası doğrultusunda, ilaçların üretimden hastaya ulaşana kadar olan

süreçlerinin tam izlenebilirliğini sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Proje, özellikle sahte ilaçlarla mücadele, ürün iade süreçlerinin iyileştirmesi ve orijinallik doğrulaması gibi kritik hedeflere odaklanmıştır.

Paydaşlar ve Geliştirici Kurumlar

Projenin liderliğini San Francisco merkezli Chronicled şirketi üstlenmiştir. Pfizer, Roche, Novartis, Walmart gibi önemli ilaç üretici ve dağıtıcıları dahil olmak üzere 25'ten fazla büyük ölçekli firma katılımcı olarak yer almaktadır.

Teknolojik Altyapı

İzinli Ethereum altyapısı üzerine kurulan sistem, ağdaki tüm işlemlerin ilgili taraflarca doğrulandığı bir yapı sunmaktadır. Ayrıca, ZKP gibi ileri düzey gizlilik ve güvenlik teknolojileri kullanılmaktadır.

Başarı Durumu

FDA'nın desteklediği pilot uygulamalarda yüksek düzeyde başarı elde edilmiştir. 2025 itibarıyla sektör genelinde yaygın olarak benimsenmiş ve yasal düzenlemelerle entegre hâle gelmiştir.

❖ **PharmaLedger Projesi (Avrupa Birliği, 2020)**

Amaç ve Kapsam

PharmaLedger Projesi, Avrupa Birliği'nin Yenilikçi İlaçlar Girişimi (IMI) kapsamında başlatılmış, sağlık sektöründe dijital dönüşümü destekleyen çok paydaşlı bir girişimdir. Proje, ilaç yaşam döngüsünün tamamını kapsayan dijital çözümler üretmeyi; elektronik ürün bilgisi (ePI), klinik araştırmalarda şeffaflık, hasta onam süreçlerinin dijitalleştirilmesi ve veri paylaşımında güvenli protokoller geliştirmeyi hedeflemiştir.

Paydaşlar ve Geliştirici Kurumlar

Proje, 29 kuruluştan oluşan Avrupa merkezli bir konsorsiyum tarafından yürütülmüştür. Katılımcılar arasında Novartis, Pfizer, AstraZeneca gibi büyük ilaç üreticileri; Guardtime gibi teknoloji sağlayıcıları ve ETH Zürih gibi akademik kurumlar yer almıştır.

Teknolojik Altyapı

PharmaLedger, izinli Ethereum tabanlı Quorum platformu üzerine inşa edilmiştir. Ayrıca OpenDSU (Open Data Sharing Unit) adı verilen bir açık veri paylaşım katmanıyla entegre

çalışarak hem veri güvenliği hem de birlikte çalışabilirlik açısından yüksek standartlar sunmaktadır.

Başarı Durumu

2022 yılı itibarıyla projenin pilot uygulamaları başarıyla tamamlanmış; geliştirilen çözümler açık kaynak olarak yayımlanmıştır. 2025 itibarıyla ePI modülü, Avrupa genelinde birçok ülkede yaygın şekilde kullanılmakta ve sektörel dijital dönüşüm stratejilerinin temel bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir.

❖ **Pharmaceutical Utility Network Projesi (ABD, 2019)**

Amaç ve Kapsam

Pharmaceutical Utility Network (PhUN) projesi, ilaçların üretimden dağıtıma ve son kullanıcıya ulaşana dek olan tüm hareketlerini takip etmeyi, özellikle soğuk zincir koşullarını izlemeyi, geri çağırma süreçlerini hızlandırmayı ve sahte ürün riskini azaltmayı amaçlamaktadır. Proje ayrıca, DSCSA uyumunu sağlayacak şekilde izlenebilirlik altyapısının oluşturulmasını hedeflemiştir.

Paydaşlar ve Geliştirici Kurumlar

Projenin temel geliştiricileri IBM, Merck ve Co., Walmart ve KPMG gibi sektörün önde gelen şirketlerinden oluşmaktadır. ABD FDA'nın desteklediği proje, geniş katılımlı bir konsorsiyum modeliyle yürütülmüştür.

Teknolojik Altyapı

PhUN projesinde Hyperledger Fabric tabanlı izinli blok zincir altyapısı kullanılmıştır. Bu sistem, yüksek işlem doğrulama kapasitesi, özelleştirilebilir veri erişim yapıları ve denetlenebilirlik açısından uygun bir çözüm olarak tercih edilmiştir.

Başarı Durumu

Proje, prototip düzeyinde başarılı bir şekilde uygulanmış ve lojistik süreçlerde dijital dönüşümün mümkün olduğunu göstermiştir. Ancak 2025 itibarıyla ticari ölçekte yaygınlaştırılamamış, daha çok pilot düzeyde kalmış ve sektör farkındalığını artırıcı bir referans modeli olarak değerlendirilmiştir.

❖ **eZTracker Projesi (Asya-Pasifik Bölgesi, 2019)**

Amaç ve Kapsam

eZTracker Projesi, Asya-Pasifik bölgesinde özellikle sahte ilaçların önlenmesi, aşı ve medikal ürünlerin izlenmesi ve soğuk zincir güvenliğinin sağlanması amacıyla geliştirilmiş, son kullanıcı odaklı bir blok zincir çözümüdür. Sistem, tüketicilerin satın aldıkları ürünlerin orijinalliğini doğrudan mobil uygulama üzerinden doğrulayabilmesini sağlayarak sahtecilikle mücadelede kullanıcı katılımını aktif hâle getirmeyi hedeflemiştir.

Paydaşlar ve Geliştirici Kurumlar

Proje, Asya-Pasifik bölgesinin önde gelen ilaç dağıtım firmalarından biri olan Zuellig Pharma tarafından geliştirilmiştir. Sistem, SAP blok zincir çözümleriyle entegre biçimde yürütülmüş; sağlık kurumları, eczaneler ve hastanelerle iş birliği içinde uygulanmıştır.

Teknolojik Altyapı

eZTracker, Hyperledger Fabric tabanlı SAP Blockchain Platformu üzerinde çalışmaktadır. Platform, mobil cihazlarla entegre olacak şekilde tasarlanmış; gerçek zamanlı veri paylaşımı, sıcaklık takibi ve kullanıcı kimlik doğrulaması gibi işlevlerle güçlendirilmiştir.

Başarı Durumu

2025 yılı itibarıyla özellikle COVID-19 aşılarının dağıtımında yaygın olarak kullanılan sistem, tüketici güvenini artıran ve dijital sağlık çözümleri içinde kalıcı yer edinen bir uygulama hâline gelmiştir. Kullanıcı doğrulamalı güvenlik yaklaşımı sayesinde son kullanıcıların da tedarik zincirinin bir parçası hâline gelmesi, projeyi benzersiz kılan unsurlar arasındadır.

❖ **CSecure Projesi (Çin, 2019)**

Amaç ve Kapsam

CSecure Projesi, klinik araştırma süreçlerinde kullanılan ilaçların güvenli lojistik takibini sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Proje, özellikle sahtecilik riskini azaltma, klinik denemelerde kullanılan ürünlerin doğrulanabilirliğini artırma ve dağıtım zinciri boyunca veri bütünlüğünü koruma gibi hedeflere odaklanmıştır.

Paydaşlar ve Geliştirici Kurumlar

Proje, global ilaç firması Bayer'in Çin merkezli operasyonları kapsamında hayata geçirilmiştir. Blok zincir altyapısı sağlayıcısı olarak ise kurumsal çözümler geliştiren VeChain firması tercih edilmiştir. CSecure, Bayer'in sağlık inovasyonu girişimlerinin bir parçası olarak tasarlanmıştır.

Teknolojik Altyapı

CSecure, kurumsal düzeyde uygulamalar için özelleştirilmiş olan VeChainThor (ToolChain) altyapısı üzerinde çalışmaktadır. Sistem, zaman damgalı işlem kayıtları, parti numarası takibi, yetkili kullanıcı erişimi ve QR kod ile doğrulama gibi çok katmanlı güvenlik özellikleri içermektedir.

Başarı Durumu

2020 yılında pilot uygulama olarak başarıyla tamamlanan proje, Bayer'in Çin'de yürüttüğü klinik araştırmalar kapsamında kullanılmaya devam etmektedir. Ancak 2025 itibarıyla sistem tam ölçekli ticari uygulamaya dönüşmemiş, daha çok kurumsal referans modeli olarak konumlanmıştır. Proje, klinik denetim süreçlerinde dijital izlenebilirlik ve gizlilik konularına katkı sağlaması bakımından önemli bir uygulama örneğidir.

❖ **Modum Projesi (İsviçre, 2016)**

Amaç ve Kapsam

Modum Projesi, çevresel koşullara duyarlı ilaçların taşınması ve depolanması süreçlerinde, özellikle sıcaklık, nem gibi parametrelerin izlenmesi yoluyla güvenli taşıma koşullarının sağlanmasını hedeflemiştir. Proje, soğuk zincir lojistiği kapsamında, ilaç kalitesinin nakliye sırasında bozulmadan korunmasını ve izlenebilirliğini artırmayı amaçlamıştır.

Paydaşlar ve Geliştirici Kurumlar

Proje, İsviçre merkezli girişim firması modum.io tarafından başlatılmıştır. Geliştirme sürecinde SAP, DHL, Merck KGaA gibi önemli kuruluşlarla iş birlikleri yapılmış, projenin ölçeklenebilirliği büyük kurumsal ortaklıklarla desteklenmiştir.

Teknolojik Altyapı

Proje ilk etapta Ethereum tabanlı bir sistem olarak geliştirilmiş, ardından kurumsal uyumluluğun artırılması amacıyla Hyperledger Fabric altyapısına geçilmiştir. Sistem, IoT sensörleri ile elde edilen sıcaklık verilerini anlık olarak blok zincir ağına aktarmakta; zaman damgalı ve değiştirilemez kayıtlarla veri güvenliği sağlamaktadır.

Başarı Durumu

Modum Projesi, 2021 yılında küresel IoT tabanlı lojistik takip firması Roambee tarafından satın alınarak daha geniş bir teknoloji ekosistemine entegre edilmiştir. 2025 itibarıyla proje, ilaç lojistiği süreçlerinde çevresel koşulların izlenebilirliği ve veri bütünlüğü sağlama açısından başarılı bir ticarileşme örneği olarak değerlendirilmektedir.

❖ **IBM ve Moderna COVID-19 Aşı İzleme Projesi (ABD, 2021)**

Amaç ve Kapsam

COVID-19 pandemisi sırasında geliştirilen bu proje, Moderna tarafından üretilen mRNA temelli aşıların üretimden nihai kullanım noktasına kadar olan sürecinin dijital izlenebilirliğini sağlamak amacıyla oluşturulmuştur. Özellikle soğuk zincir koşullarının izlenmesi, aşı güvenliğinin artırılması ve lojistik süreçlerin optimize edilmesi hedeflenmiştir.

Paydaşlar ve Geliştirici Kurumlar

Proje, ilaç üreticisi Moderna ve teknoloji firması IBM tarafından ortak yürütülmüştür. IBM'in dijital sağlık çözümleri, lojistik teknolojileri ve blok zincir altyapısı, Moderna'nın dağıtım operasyonlarına entegre edilmiştir.

Teknolojik Altyapı

Sistem, IBM Blok zincir Platform üzerinde geliştirilmiş olup, Hyperledger Fabric altyapısını temel almaktadır. Aşıların sıcaklık, taşıma koşulları ve dağıtım noktalarındaki hareketleri, IoT sensörlerinden gelen verilerle gerçek zamanlı olarak blok zincire kaydedilmiştir.

Başarı Durumu

Proje, 2021 yılında pilot uygulama olarak başarıyla gerçekleştirilmiş ve aşı dağıtımının şeffaflığı ile güvenliği açısından etkili bir dijital model ortaya koymuştur. Ancak 2025

yılı itibarıyla, bu sistem sürekli bir uygulamaya dönüşmemiş, daha çok gelecekteki benzer uygulamalara rehberlik eden bir referans modeli olarak değerlendirilmiştir.

❖ **Birleşik Arap Emirlikleri Sağlık Verisi Blok Zinciri Projesi (BAE, 2020)**

Amaç ve Kapsam

Bu proje, Birleşik Arap Emirlikleri'nde sağlık kurumlarının ruhsat bilgileri, sağlık çalışanlarının yetki ve lisans durumları ve onaylanmış ilaçlara ilişkin resmi kayıtların güvenli bir biçimde yönetilmesini amaçlamaktadır. Hedef, sağlık sektöründe veri tutarsızlıklarının ortadan kaldırılması, yetkilendirme süreçlerinin kolaylaştırılması ve dijital doğrulama mekanizmalarının standartlaştırılmasıdır.

Paydaşlar ve Geliştirici Kurumlar

Proje, BAE Sağlık ve Önleme Bakanlığı (MoHAP) liderliğinde yürütülmüş, Dubai Sağlık Otoritesi ve Abu Dabi Sağlık Departmanı gibi ulusal düzenleyici kurumların ortaklığıyla geliştirilmiştir. Teknolojik altyapı, kamu-özel sektör iş birliği modeliyle oluşturulmuştur.

Teknolojik Altyapı

Blok zincir altyapısı olarak, izinli ve kurumsal düzeyde özelleştirilebilen bir sistem tercih edilmiştir. Yapının temelinde Hyperledger Fabric tabanlı mimari kullanıldığı değerlendirilmektedir. Erişim kontrolü, dijital kimlik doğrulama ve rol bazlı veri erişimi gibi işlevlerle sistem, farklı kurumlar arasında farklı erişim düzeylerinde veri paylaşımına olanak sağlamaktadır.

Başarı Durumu

Proje, 2020 yılında aktif olarak devreye alınmış, 2023 itibarıyla tüm yeni ruhsat başvurularının bu sistem üzerinden yürütülmesi zorunlu hâle gelmiştir. 2025 itibarıyla, BAE sağlık sektörü için resmî ve güvenilir bir dijital veri altyapısı oluşturulmuş; denetim süreçlerinin etkinliği artırılmış ve ruhsatsız faaliyetlerin önüne geçilmiştir.

❖ **Blockpharma Projesi (Fransa, 2017)**

Amaç ve Kapsam

Blockpharma, sahte ilaçların son kullanıcı tarafından tespit edilebilmesini sağlamak amacıyla geliştirilmiş, tüketici odaklı bir blok zincir uygulamasıdır. Sistem, kullanıcıların ilaç ambalajı üzerinde bulunan QR kodu mobil uygulama aracılığıyla tarayarak ürünün

orijinalliğini kontrol etmesini mümkün kılmaktadır. Projenin temel hedefi, sahte ilaçların dolaşımını engellemek ve son kullanıcı bilincini artırmaktır.

Paydaşlar ve Geliştirici Kurumlar

Proje, Fransa merkezli Blockpharma şirketi tarafından geliştirilmiş, sistemin teknolojik altyapısı ise OPTEL Group ile iş birliği içerisinde oluşturulmuştur.

Teknolojik Altyapı

Blockpharma, Ethereum blok zinciri üzerine kurulmuştur. Her ürün için benzersiz bir QR kod oluşturularak, ilacın üretim ve dağıtım geçmişi Ethereum ağına kaydedilmiş; böylece son kullanıcıların bu bilgilere erişmesi sağlanmıştır.

Başarı Durumu

Proje, 2017-2019 yılları arasında önemli bir farkındalık yaratmış ve kullanıcıların sahte ürünlerle mücadelede aktif rol alabileceğini göstermiştir. Ancak 2019 sonrası kurumsal katılımın yetersiz kalması ve ticari ölçekli sürdürülebilirlik sorunu nedeniyle geliştirmenin durduğu ve sistemin pasif duruma geçtiği görülmektedir.

❖ **FarmaTrust Projesi (Moğolistan, 2018)**

Amaç ve Kapsam

FarmaTrust Projesi, ilaçların üretimden eczane rafına kadar olan süreçte tam izlenebilirliğini sağlamak, sahte ürünlerin önüne geçmek ve dağıtım süreçlerini dijitalleştirmek amacıyla geliştirilen bir blok zincir tabanlı çözüm önerisidir. Özellikle Moğolistan gibi gelişmekte olan pazarlarda ruhsatsız ürünlerin denetimi, eczane düzeyinde stok takibi ve risk analizi uygulamalarına odaklanmıştır.

Paydaşlar ve Geliştirici Kurumlar

Proje, Birleşik Krallık merkezli FarmaTrust firması tarafından geliştirilmiş ve Moğolistan hükümeti ile iş birliği içinde yürütülmüştür. Proje, kamu-özel sektör ortaklığı modeliyle, ulusal sağlık altyapılarını güçlendirme amacını taşımıştır.

Teknolojik Altyapı

FarmaTrust sistemi, Ethereum tabanlı blok zincir altyapısı kullanmakta; ayrıca AI destekli büyük veri analitiği bileşenleriyle güçlendirilmiştir. Sistem, riskli ürün gruplarının

tanımlanması ve veri bazlı karar alma mekanizmalarının geliştirilmesini destekleyecek şekilde yapılandırılmıştır.

Başarı Durumu

2019 yılında Moğolistan'da yapılan pilot uygulama, sahte ilaçların tespitinde ve kayıt dışı dağıtımın önlenmesinde önemli başarılar elde etmiştir. Ancak proje, finansal kaynak eksikliği ve kurumsal sürdürülebilirlik sorunları nedeniyle ulusal düzeyde yaygınlaştırılamamış; sınırlı bir başarı elde ederek yerel çözüm düzeyinde kalmıştır.

❖ **MediConnect Projesi (Birleşik Krallık ve Zimbabve, 2019)**

Amaç ve Kapsam

MediConnect Projesi, reçeteli ilaçların uygunsuz kullanımı, reçete istismarı ve sahte ilaçların dolaşımdaki varlığı gibi ciddi halk sağlığı sorunlarına çözüm üretmek amacıyla geliştirilmiştir. Sistem, özellikle çevrimiçi eczaneler üzerinden tekrarlanan reçete teminini önlemek, ilaçların geçerli reçeteyle dağıtımını doğrulamak ve ürün hareketlerini izlenebilir kılmak gibi işlevleri içermektedir.

Paydaşlar ve Geliştirici Kurumlar

Proje, Birleşik Krallık merkezli MediConnect firması tarafından geliştirilmiş hem Birleşik Krallık'taki çevrimiçi eczanelerle hem de Zimbabve sağlık otoriteleriyle iş birliği içinde yürütülmüştür. Sistem, eczacılık zinciri genelinde ortak veri tabanı üzerinden doğrulama prensibiyle çalışacak şekilde kurgulanmıştır.

Teknolojik Altyapı

MediConnect, Stratis platformu üzerinde çalışan izinli bir blok zincir altyapısı kullanmaktadır. Bu altyapı, veri güvenliği, hızlı işlem doğrulama ve hassas sağlık verilerinin korunması gibi temel ihtiyaçlara yanıt vermektedir.

Başarı Durumu

2019 yılında Birleşik Krallık'ta yapılan pilot uygulamalar başarılı sonuçlar vermiştir. Ancak Zimbabve'deki uygulama, ekonomik zorluklar ve sağlık otoritelerinin merkezi veri tabanı tercihleri nedeniyle ulusal düzeyde yaygınlaştırılamamıştır. 2025 itibarıyla proje, Birleşik Krallık'ta sınırlı düzeyde aktif, Zimbabve'de ise pilot düzeyinde kalmıştır.

❖ **Trace Histories Projesi – TraceLink (ABD, 2019)**

Amaç ve Kapsam

Trace Histories Projesi, ABD'de yürürlüğe giren DSCSA kapsamında geliştirilen bir izlenebilirlik çözümüdür. Projenin temel hedefi, ilaçların üretimden tüketiciye kadar tüm hareketlerinin dijital olarak kayıt altına alınması, geri çağırma işlemlerinin hızlandırılması ve farklı paydaşlar arasında güvenli veri paylaşım standartlarının oluşturulmasıdır.

Paydaşlar ve Geliştirici Kurumlar

Proje, izlenebilirlik çözümleri konusunda uzmanlaşmış TraceLink firması tarafından yürütülmüştür. FDA desteğiyle yürütülen proje kapsamında, 22'den fazla ilaç üreticisi, dağıtıcı ve eczane zinciri aktif paydaş olarak yer almıştır.

Teknolojik Altyapı

Trace Histories, Quorum ve Hyperledger Fabric'in özelliklerini harmanlayan özel bir hibrit blok zincir altyapısı üzerine kurulmuştur. Bu yapı hem yüksek işlem güvenliği hem de izinli sistem mimarisine uygun esneklik sağlamaktadır. Projede ayrıca zaman damgalı işlem kayıtları, çoklu erişim katmanları ve uygulama entegrasyon standartları kullanılmıştır.

Başarı Durumu

2019 yılında FDA pilot projesi olarak başarıyla tamamlanan sistem, dijital geri çağırma süreçlerinde etkinlik ve işlem izlenebilirliği sağlama konusunda yüksek performans göstermiştir. Ancak, sektörde mevcut dijital sistemlerin hâlihazırda kullanımda olması, blok zincire geçişteki çekinceler nedeniyle proje üretim ortamında yaygınlaşmamış, daha çok referans model olarak konumlanmıştır.

❖ **Boehringer Ingelheim ve IBM Klinik Araştırma Veri Kayıtları Projesi (Kanada, 2019)**

Amaç ve Kapsam

Bu proje, klinik araştırmalarda kullanılan hasta verilerinin, onam süreçlerinin ve araştırma kayıtlarının dijital, güvenli ve şeffaf bir biçimde tutulmasını sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Temel hedef, veri bütünlüğü, etik uyumluluk, şeffaflık ve çok paydaşlı veri erişim süreçlerinin iyileştirilmesi olarak belirlenmiştir.

Paydaşlar ve Geliştirici Kurumlar

Proje, global ilaç firması Boehringer Ingelheim'in Kanada ofisi ile IBM Kanada'nın dijital sağlık çözümleri birimi iş birliğinde yürütülmüştür. Klinik araştırmalarda dijital dönüşüm sağlayacak bir referans mimari geliştirmek üzere tasarlanmıştır.

Teknolojik Altyapı

Projenin temelinde Hyperledger Fabric tabanlı izinli bir blok zincir altyapısı yer almaktadır. Sistem; hasta onam formlarının zaman damgalı olarak saklanması, veri değişmezliğinin garanti altına alınması ve paydaş bazlı erişim haklarının tanımlanması gibi işlevlerle klinik araştırmalara dijital güvenlik katmanı sunmuştur.

Başarı Durumu

Pilot proje, 2019 yılında Kanada'da yapılan klinik denemeler sırasında uygulanmış ve veri güvenliği, onam izlenebilirliği ve kayıt tutarlılığı bakımından başarı elde etmiştir. Ancak proje daha sonra sürekli bir uygulamaya dönüşmemiş, Boehringer Ingelheim'in dijital stratejilerinde referans model olarak kullanılmıştır. 2025 itibarıyla aktif olarak çalışmamakla birlikte, klinik veri yönetimi alanında öncü bir deneyim olarak değerlendirilmektedir.

5.2.2. Genişleyen Projeler ve Yeni Başlatılan Uygulamalar (2022–2025)

Blok zincir teknolojisinin ilaç tedarik zincirindeki erken dönem uygulamaları, çeşitli teknik ve yönetişimsel öğrenmeler üretmiş; bu deneyimler 2022 sonrasında daha kapsamlı, regülasyon odaklı ve konsorsiyum temelli projelerin geliştirilmesine öncülük etmiştir. Özellikle DSCSA ve FMD gibi düzenleyici çerçevelerin son uygulama aşamalarına yaklaşıldığı bu dönemde, daha önce yalnızca pilot düzeyde kalan birçok girişim ya genişletilmiş fazlara taşınmış ya da ulusal düzeyde kalıcı dijital çözümlere dönüşmüştür.

Ayrıca, küresel sağlık gündeminin etkisiyle (örneğin COVID-19 sonrası aşı izlenebilirliği), kalkınmakta olan ülkelerde de blok zincir temelli sistemlerin kullanımı artmış; UNICEF, Gavi gibi kurumlar tarafından desteklenen projeler aracılığıyla sahtecilik, soğuk zincir takibi ve tedarik denetimi gibi başlıklarda teknolojik çözümler geliştirilmeye başlanmıştır.

Bu bağlamda, aşağıda sunulan Tablo 5.3, 2022–2025 yılları arasında hayata geçirilen veya daha önceki projelerin genişletilmiş sürümlerini temsil eden uygulamaları; altyapı

tercihleri, uygulama kapsamı ve başarı durumları açısından sınıflandırmaktadır. Bu projeler, blok zincir tabanlı izlenebilirlik sistemlerinin hem teknolojik olgunluk hem de kurumsal entegrasyon açısından nasıl evrildiğini somut biçimde ortaya koymaktadır.

Tablo 5.3. *2022-2025 dönemi genişletilmiş veya yeni başlatılan blok zincir projeleri*

Proje Adı	Ülke / Bölge	Başlangıç Yılı	Blok Zincir Altyapısı	Kapsadığı Süreçler	Mevct Durum (2025)	Kaynak
DSCSA 2023-2024 Genişletilmiş Pilotları (MediLedger)	ABD	2023	İzinli Ethereum (MediLedger Network)	Uçtan Uca İzlenebilirlik, DSCSA Uyumu, Ürün İadesi ve Finansal Mutabakat	Uygulamaya Geçiş Aşamasında	FDA, (2023)
PharmaLedger Association	AB	2023	Quorum + OpenDSU	Epı (Elektronik Ürün Bilgisi), Klinik Onam, Veri Bütünlüğü, Çok Paydaşlı Veri Paylaşımı	Dernekleşti, Yaygınlaşmakta	PharmaLedger Association, (2023a, 2023b,2023c)
EBSI (European Blockchain Services Infrastructure) Sağlık Fazı	AB	2023	İzinli/Hibrit (AB standartlarına uyumlu)	Sınır Ötesi Sağlık Verisi Paylaşımı, E-Reçete, İlaç Lojistiği Senaryolarının Araştırılması	Pilot Aşamasında	EBSI-VECTOR. (2024)
Roche ve Genentech Tedarikçi Yönetimi Pilot	ABD	2023	Özel Platform	Üretici-Tedarikçi Sözleşme Yönetimi, Otomatik Ödeme, Akıllı Sözleşme Tabanlı Envanter Doğrulama	Kapalı Pilot Devam Etmekte	Roche, (2023)
SAP ATTP Blockchain Modülleri	Küresel (AB/Asya ağırlıklı)	2022	Hyperledger Fabric / SAP Blockchain	Seri Numaralama, Uçtan Uca İzlenebilirlik, DSCSA ve FMD Uyumu	Ticari Uygulama Aşamasında	SAP. (2025)
Gavi ve UNICEF Küresel Aşı Tedarik Pilotları	Gelişmekte Olan Ülkeler	2022	Farklı Platformlar (Fabric / Stellar)	Sahte Aşı Engelleme, Soğuk Zincir/Iot Takibi, Düşük ve Orta Gelirli Ülkelerde İzlenebilirlik	Pilot Raporlama Sürecinde	UNICEF Innovation, (2023)
Janssen ve Chronicled Sözleşme/Pricing Pilotu	ABD	2022	İzinli Ethereum (MediLedger Network)	Fiyatlandırma, Sözleşme Yönetimi, Geri Ödeme (Chargeback) Süreçleri ve Otomasyon	Pilot Genişletildi	Chronicled, (2023)
Hindistan Eczaneler Birliği (AIOCD) Pilot Projesi	Hindistan	2022	İzinli Blok Zincir (çeşitli denemeler)	Eczane Düzeyinde Sahte İlaç Tespiti, Seri Numaralama, Tedarik Zinciri Denetimi	Eyalet Bazlı Pilotlar Devam Etmekte	National Informatics Centre, Govt. of India. (2023).
Tatmeen (MoHAP)	BAE	2022	(Tahminen Hyperledger)	Ulusal İlaç Takibi, Sahtecilik, QR Doğrulama	Aktif	Ministry of Health and Prevention - UAE, (2021)

Tablo 5.3'te yer alan projeler, blok zincir teknolojisinin ilaç tedarik zincirinde yalnızca pilot düzeyde kalan deneysel uygulamalardan çıkarak, daha olgun, regülasyon destekli ve sektör çapında ölçeklenebilir sistemlere evrildiğini göstermektedir. ABD merkezli DSCSA 2023–2024 genişletilmiş pilotları, ürün iadesi, fiyatlandırma otomasyonu ve finansal mutabakat gibi işlevleri içeren entegre bir izlenebilirlik yapısı sunarken; Avrupa Birliği'nde PharmaLedger Projesi, elektronik ürün bilgisi (ePI) ve klinik onam süreçlerinin standartlaştırılması amacıyla bir dernek yapısına dönüşmüş ve Avrupa genelinde yaygınlaşmaya başlamıştır.

SAP ATTP platformunun blok zincir modülleri, özellikle Asya ve Avrupa'da DSCSA ve FMD uyumunu sağlayacak şekilde ticari bulut çözümleri sunarken; Janssen ve Chronicled iş birliği, sözleşme ve geri ödeme süreçlerinde otomasyonu hedefleyen örnek bir model olarak dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, Gavi ve UNICEF tarafından geliştirilen pilot uygulamalar, gelişmekte olan ülkelerde sahte aşılarla mücadele ve soğuk zincir güvenliği için düşük maliyetli blok zincir altyapılarının kullanımını yaygınlaştırmayı amaçlamaktadır.

Avrupa Komisyonu öncülüğündeki EBSI Sağlık Fazı, sınır ötesi e-reçete ve ilaç lojistiği uygulamalarının test edildiği erken aşama bir altyapı sunarken; Roche ve Genentech gibi büyük ilaç firmaları da tedarikçi yönetiminde akıllı sözleşme tabanlı sistemleri denemektedir. Hindistan'da yürütülen AIOCD pilotları ise eczane düzeyinde sahte ürün tespiti ve seri numaralama kontrolleri için bölgesel çözümler üretmektedir.

5.2.3. Küresel Uygulama Örneklerinin Toplu Değerlendirmesi

2016–2025 döneminde blok zincir teknolojisinin ilaç tedarik zincirinde kullanımına yönelik geliştirilen projeler, yalnızca teknik açıdan değil; aynı zamanda yönetişim modeli, regülasyon uyumu ve kurumsal iş birliği düzeyi bakımından da çeşitlilik göstermektedir. Bu bölümde, önceki iki tabloda sunulan uygulama örnekleri bölgesel, yapısal ve stratejik boyutlarıyla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, 2022 sonrası projeler yalnızca teknik geliştirmeler değil; regülasyon uyumu, kurumsal yönetişim ve birlikte çalışabilirlik gibi stratejik bileşenler bakımından da daha bütüncül çözümler ortaya koymakta; blok zincirin sağlık sektöründeki sürdürülebilir entegrasyonuna dair güçlü bir zemin oluşturmaktadır. Bu örnekler, 2022 öncesindeki bazı projelerin yalnızca pilot aşamada kalmasına rağmen, sektörde blok zincir teknolojisine olan ilginin azalmadığını; bilakis regülasyonların ve

konsorsiyum tabanlı yapının olgunlaşmasıyla adım adım ilerlediğini göstermektedir. Böylece, ilaç tedarik zincirinde blok zincir kullanımının halen gelecek vaat eden bir alan olduğu ve kurumsal düzeyde "tam adaptasyon" sürecine doğru hız kazandığı söylenebilir.

Aşağıdaki değerlendirme, incelenen projelerin bölgesel özellikleri, teknik mimarileri ve kurumsal başarı kriterleri üzerinden yapılan karşılaştırmalı bir çözümlemedir. Söz konusu uygulamalar, blok zincir teknolojisinin ilaç tedarik zincirinde sunduğu potansiyelin farklı coğrafi, yapısal ve teknolojik modellerle nasıl hayata geçirildiğini ortaya koymaktadır. Amerika Birleşik Devletleri, Avrupa Birliği, Asya-Pasifik ve Orta Doğu bölgelerinde geliştirilen örnek uygulamalar hem sahte ilaçlarla mücadele hem de şeffaflık, izlenebilirlik, hasta güvenliği ve veri bütünlüğü açısından önemli katkılar sunmaktadır. Ancak bu projelerin başarı düzeyleri; kullanılan altyapıların uygunluğu, regülasyonlara entegrasyon kabiliyeti ve paydaşlar arası iş birliği düzeyine bağlı olarak farklılık göstermektedir.

Projelerin coğrafi dağılımları ve stratejik odakları şu şekilde özetlenebilir:

- ABD merkezli projeler (MediLedger, TraceLink, Pharmaceutical Utility Network): Regülasyon odaklıdır; genellikle FDA gibi düzenleyici kurumların desteğiyle DSCSA gibi yasal zorunluluklara entegrasyon hedeflenmiştir.
- Avrupa projeleri (PharmaLedger, Modum): Çok aktörlü konsorsiyumlar üzerinden yürütülmüştür; klinik araştırmalarda hasta onam süreçleri, elektronik ürün bilgisi paylaşımı ve veri şeffaflığı gibi dijital dönüşüm başlıklarına odaklanılmıştır.
- Asya-Pasifik projeleri (eZTracker, CSecure): Tüketici odaklı çözümler ön plandadır; sahte ürünlerin son kullanıcı düzeyinde doğrulanması ve mobil uygulama entegrasyonu gibi işlevler öne çıkar.
- Orta Doğu projeleri (Tatmeen, BAE Sağlık Verisi Blok Zinciri): Ulusal sağlık otoriteleri tarafından yönetilen kamu temelli sistemlerdir; merkeziyetçi mimari ile kamu-özel iş birliğini dijital güven altyapısıyla desteklemektedir.

Teknolojik altyapı açısından değerlendirildiğinde, Ethereum tabanlı sistemler (MediLedger, FarmaTrust, Modum), daha açık ve esnek yapı sunmaları nedeniyle tercih edilmiştir. Buna karşılık, Hyperledger Fabric tabanlı projeler (eZTracker, IBM ve Moderna, Tatmeen), özellikle veri gizliliği, yetkilendirme kontrolü ve rol bazlı erişim gibi kurumsal ihtiyaçları karşılamada öne çıkmaktadır. TraceLink gibi hibrit yapı kullanan

projeler, farklı blok zincir platformlarının avantajlarını birleştirme yaklaşımıyla hareket etmiştir. Öte yandan, platformlar arası birlikte çalışabilirlik, veri sahipliği ve yetkilendirme yapılarının standartlaştırılması, günümüzde hâlâ blok zincir tabanlı sistemlerin karşı karşıya olduğu önemli teknik ve yapısal zorluklar arasında yer almaktadır.

Uygulama alanları bakımından incelendiğinde, projelerin ilaç tedarik zinciri izlenebilirliği, klinik araştırma güvenliği, ruhsatlandırma ve denetim süreçleri, reçete istismarıyla mücadele ve çevresel koşulların takibi gibi geniş bir yelpazeye yayıldığı görülmektedir. Ancak projelerin önemli bir kısmı, pilot aşamayı geçememiş; ulusal ya da küresel düzeyde sürdürülebilir ve yaygın çözümlere dönüşememiştir. MediConnect ve FarmaTrust gibi girişimler, teknik olarak güçlü olmalarına rağmen, finansal kaynak eksikliği, mevzuat uyumu zorlukları ve sektörel adaptasyon problemleri nedeniyle sınırlı başarı göstermiştir. Buna karşılık, PharmaLedger ve Tatmeen gibi projeler, güçlü kurumsal destek, regülasyonlarla yüksek uyum ve etkin yönetişim sayesinde daha kalıcı ve etki yaratan çıktılar üretmeyi başarmıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, blok zincir tabanlı uygulamaların başarısı yalnızca teknik mimarideki yeniliklerle değil; aynı zamanda yönetişim modeli, paydaşlar arası koordinasyon ve regülasyon entegrasyonu gibi stratejik unsurlarla da doğrudan ilişkilidir. Teknolojik altyapı, başarı için önemli bir ön koşul olmakla birlikte; esas belirleyici olan unsur, bu altyapının sektörel gereksinimlerle, operasyonel süreçlerle ve kullanıcı odaklı çözüm anlayışıyla ne ölçüde bütünleşebildiğidir. İlaç tedarik zincirinin çok aktörlü ve yüksek regülasyonlu yapısı, blok zincir sistemlerinin yalnızca güvenli ve dağıtık olmakla yetinmeyip, aynı zamanda standartlaşma, birlikte çalışabilirlik ve kurumsal uyarlanabilirlik gibi yetenekleri de güçlü biçimde sunmalarını zorunlu kılmaktadır.

Blok zincir teknolojisinin küresel ölçekteki başarı örnekleri, izlenebilirlik ve güvenlik gibi kritik sorunlara çözüm sunabildiğini göstermektedir. Bu küresel deneyimlerin ışığında, Türkiye'nin mevcut ilaç izleme altyapısı olan İlaç Takip Sistemi (İTS)'nin yapısı, sınırlılıkları ve blok zincir tabanlı yeniden tasarım gerekliliği izleyen bölümde kapsamlı biçimde analiz edilecektir.

5.3. Türkiye'deki İlaç Takip Sistemi (İTS) ile Blok Zincir Tabanlı Yapıların Karşılaştırılması ve Uygulama Gerekliliği

Blok zincir tabanlı sistemlerin sağlık sektörüne entegrasyonu üzerine yürütülen değerlendirmelerin ardından, bu bölümde Türkiye'de mevcut durumda kullanılan İlaç Takip Sistemi teknik, yönetişimsel ve operasyonel boyutlarıyla analiz edilmektedir. İlk olarak İTS'nin genel yapısı tanıtılacak; ardından karşılaşılan sınırlılıklar ve dijital zafiyetler ortaya konacaktır. Devamında, Hyperledger Fabric tabanlı blok zincir altyapısının İTS için bir alternatif mimari olarak sunabileceği katkılar değerlendirilecek ve karşılaştırmalı analizlerle sistemin yeniden yapılandırılabilirliği tartışılacaktır. Böylece, Türkiye'nin mevcut dijital sağlık altyapısının blok zincirle evrilme potansiyeli, örnek uygulamalar ve stratejik gerekçeler doğrultusunda bütüncül bir yaklaşımla ele alınacaktır.

5.3.1. Türkiye'de İlaç Takip Sistemi: Genel Yapı ve İşleyiş

Türkiye, ilaçların izlenebilirliğini sağlama konusunda dijitalleşme adımlarını erken atan ülkelerden biri olarak, 2010 yılında uygulamaya koyduğu İTS ile bu alanda öncü konumunu sürdürmektedir. Sağlık Bakanlığı'na bağlı TİTCK tarafından yönetilen sistem, ilaçların üretim veya ithalatından tüketiciye ulaşana kadar geçen tüm aşamaları kapsayan uçtan uca bir dijital izlenebilirlik altyapısı sunmaktadır (Parmaksiz vd., 2020:431-432).

İTS, her bir ilacın kutusu üzerine yerleştirilen DataMatrix (karekod) sistemi sayesinde, ürünlerin benzersiz şekilde tanımlanmasına olanak tanımaktadır. Bu sayede ilaçların üretim, dağıtım ve tüketim süreçleri boyunca gerçekleştirdikleri tüm hareketler merkezi bir sistem aracılığıyla kayıt altına alınmakta ve izlenebilmektedir. Sistemin sunduğu bu yapı sayesinde üreticiler, ecza depoları, eczaneler, hastaneler ve vatandaşlar dahil olmak üzere tüm paydaşlar, ilaç hareketlerini anlık olarak takip edebilmekte; böylece sahte ilaç riski azalmakta, ruhsatsız ürünlerin tespiti kolaylaşmakta ve kamu denetimi güçlenmektedir (TİTCK, 2020).

Bu yönüyle İTS, yalnızca Türkiye ölçeğinde değil, uluslararası platformlarda da referans gösterilen dijital izlenebilirlik modellerinden biri hâline gelmiştir. Ancak yapısal mimarisi itibarıyla merkeziyetçi olması, sistemin artan dijital gereksinimlere yanıt verip veremeyeceği sorusunu da beraberinde getirmektedir.

Sistemin teknik işleyişi açısından değerlendirildiğinde, İTS veri yapısı, her tedarik zinciri aktörünün kendi işlem adımı sonrasında sisteme bilgi girmesi esasına dayanmaktadır.

Üretici firmalar, ilaç kutularına ait GTIN, seri numarası, üretim tarihi, son kullanım tarihi gibi tanımlayıcı bilgileri sisteme tanıtırken; ecza depoları transfer ve kabul bildirimlerini, eczaneler ise satış, iade ya da miat bildirimi gibi verileri sistem aracılığıyla Sağlık Bakanlığı sunucularına iletmektedir. Bu bildirimler, aktörlerin kendi stok ve ERP sistemleri ile İTS arasında kurulan web servisleri üzerinden, çoğunlukla otomatikleştirilmiş şekilde gerçekleşmektedir.

Tablo 5.4. *İTS sisteminde tedarik zinciri aktörleri tarafından gerçekleştirilen veri giriş süreçleri*

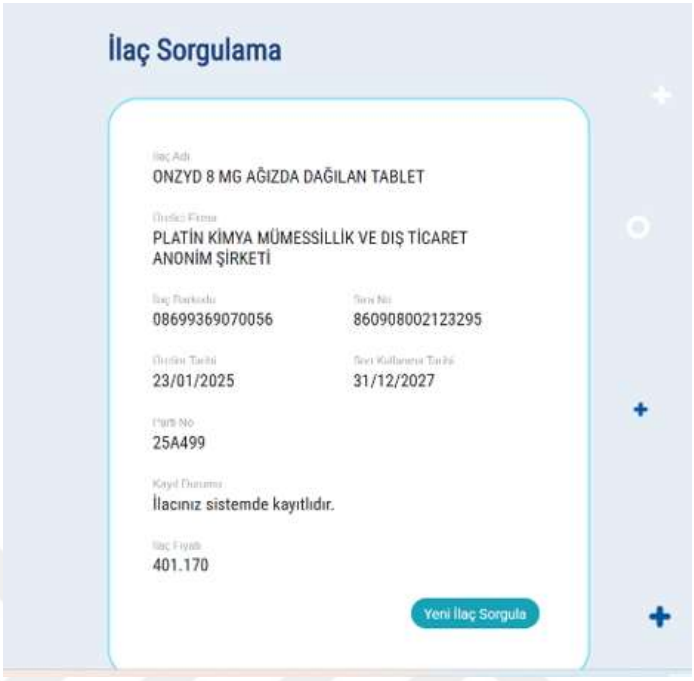
Tedarik Zinciri Aktörü	**İşlem Türü**	**Sisteme Girilen Bilgi Alanları**	**Bildirim Yöntemi**
Üretici Firma	Üretim Bildirimi	GTIN (Ürün Tanımı), Seri Numarası, Üretim Tarihi, Son Kullanım Tarihi, Üretici Kodu	ERP Üzerinden İTS Entegrasyonu (Web Servisi)
Ecza Deposu	Transfer/Kabul Bildirimi	Gönderen–Alıcı Depo Bilgisi, İşlem Tarihi, Ürün Barkodu ve Seri Numarası	Otomatik Sistem Bildirimi
Eczane	Satış ve İade Bildirimi	Seri Numarası, İşlem Zamanı, Reçete Bilgisi (Varsa), Satış–İade Kodları	Manuel ya da Eczane Yazılımı Entegrasyonu
Sağlık Bakanlığı	Geri Çağırma/Toplatma	Etkilenen Ürün Grubu, SN Aralığı, Uyarı Kategorisi, Resmî Açıklama	Merkezî Kamu Müdahalesi

Kaynak: İts.gov.tr

Yukarıdaki tablo 5.4, İTS sisteminin temel olarak kayıt temelli bir bildirim mantığına dayandığını göstermektedir. Sisteme girilen veriler, işlemi gerçekleştiren kurumun beyanına dayalı olarak kaydedilmekte; bu nedenle verilerin doğruluğu, tutarlılığı ve zamanlaması kurumların iç denetim süreçlerine ve merkezi otoritenin kontrolüne bağlıdır.

İTS sisteminin kullanıcı arayüzü üzerinden yapılan bir ilaç sorgulaması şekil 5.1'de örneklenmiştir.

Şekil 5.1. *İTS üzerinden ilaç sorgulama portalı (its.gov.tr /its/ilac_sorgula)*



Bu ekran yalnızca ürünün kimlik ve temel kayıt bilgilerini (ilaç adı, üretici firma, barkod, üretim ve son kullanım tarihi, fiyat bilgisi, kayıt durumu) göstermektedir. Ancak ürünün tedarik zinciri boyunca geçtiği taşıma aşamaları, nakliye sırasında sıcaklık değerleri, kalite kontrol süreçleri ya da işlem geçmişine ilişkin zaman damgalı kayıtlar son kullanıcıya sunulmamaktadır. Bu durum, sistemde kayıtlı olan verilerin kapsamı ile kullanıcıya açılan bilgilendirme düzeyi arasındaki farkı ortaya koymaktadır.

Tablo 5.5. *İTS sorgulama ekranında sunulan ve sunulmayan bilgi türleri*

Sorgulama Ekranında Gösterilen Bilgiler	**Eksik Olan Kritik Bilgiler**
İlaç Adı, Barkod, Üretici, Seri Numarası	Taşıma ve Depolama Zinciri Bilgisi
Üretim ve Son Kullanım Tarihi	Soğuk Zincir Sıcaklık Takibi, Taşıma Süresi Gibi Çevresel Veriler
Kayıt Durumu, Fiyat Bilgisi	Kalite Kontrol Raporu, Test Sonucu, Laboratuvar Kodu
	Zaman Damgalı İşlem Sıralamaları

Kaynak: Tablo yazar tarafından oluşturulmuştur.

Bu noktada belirtilmelidir ki, sistemin altyapısı teknik olarak bu tür bilgileri sunabilecek şekilde geliştirilebilir. Ancak bir verinin kullanıcıya gösterilmesi, onun mutlak biçimde doğru, bağımsız olarak doğrulanmış veya değiştirilemez olduğu anlamına gelmemektedir.

Sistemin temel sınırlılığı, girilen verilerin doğruluğunun büyük ölçüde bildirimi yapan kurumların beyanına dayanmasıdır. Mevcut mimaride işlem doğruluğunu bağımsız olarak denetleyen, veriyi çoklu aktörle eşzamanlı teyit eden veya zaman damgalı zincir takibi gerçekleştiren ek bir doğrulama katmanı yer almamaktadır. Dolayısıyla İTS, işlem

geçmişini merkezi bir kayıt sistemi üzerinden kaydeden güçlü bir altyapı sunsa da verinin bütünlüğü ve şeffaf denetimi açısından ek güvence mekanizmaları bakımından sınırlılıklar taşımaktadır. Bu durum, çok aktörlü yapılarda şeffaflık ve güven ihtiyacını gündeme getirmekte; dağıtık mimarilerin sağlayabileceği katkıları daha anlamlı kılmaktadır. Blok zincir tabanlı bir sistemde ise her işlem, kim tarafından ne zaman yapıldığıyla birlikte dijital olarak imzalanır, zaman damgası ile bloklara yazılır ve çoklu taraf onayı gerektirir. Bu yapı, yalnızca veriyi göstermekle kalmaz, aynı zamanda verinin geçmişine dair güvence sağlar. Dolayısıyla blok zincir mimarileri, mevcut merkezi sistemlerin güçlü yanlarını tamamlayıcı nitelikte olup, özellikle işlem geçmişinin doğrulanabilirliği ve veri bütünlüğünün korunması açısından ilave katkılar sunabilmektedir.

Sonuç olarak, İTS mevcut haliyle izlenebilirliği önemli ölçüde sağlasa da ilaçların taşıma sırasında güvenli koşullarda muhafaza edilip edilmediği, etkinliğini kaybedip kaybetmediği gibi halk sağlığı açısından kritik soruları yanıtlamakta sınırlı kalabilmektedir. Bu nedenle yalnızca sistemin kullanıcıya hangi bilgileri sunduğu değil, aynı zamanda bu bilgilerin ne ölçüde güvenilir ve denetlenebilir olduğu da yeniden değerlendirilmelidir.

5.3.2. İTS'nin Sınırlılıkları ve Güncel Dijital Riskler

İTS, sunduğu dijital izlenebilirlik olanaklarına rağmen, yapısal olarak merkezi bir mimariye sahiptir. Sistemdeki tüm veriler Sağlık Bakanlığı'nın denetiminde bulunan tek bir merkezi veritabanında toplanmakta; kontrol ve denetim süreçleri bu merkez üzerinden yürütülmektedir. Bu yapı, aşağıda sıralanan teknik, yönetişimsel ve operasyonel sınırlılıkları beraberinde getirebilmektedir:

- Merkezi veri zafiyeti

İTS'nin mevcut yapısı, tekil hata noktalarına bağımlılık riski barındırmaktadır. Bu durum, sistemsel çökme, siber saldırı veya veri bozulması gibi senaryolarda tüm tedarik zincirinde işlevsellik sorunları yaratabilir. Türkiye genelinde 378 eczaneyi kapsayan bir anket çalışmasında, eczacıların %37,1'i sistemin kesintisiz çalışmadığını ve geliştirilmesi gerektiğini belirtmiştir (Bulut ve Bilgener, 2022:5). Bu tür merkezi yapılar, sistem güvenliği açısından kırılganlıklar doğurabilmektedir.

- Veri manipülasyonu riski

Merkezi yapı nedeniyle sistem içindeki veri akışı tek bir otoritenin kontrolündedir. Bu durum, içeriden veya dışarıdan yapılabilecek müdahalelerin fark edilmesini ve doğrulanmasını güçleştirebilir. Aynı çalışmada, eczacıların %9,1'i sistemin bir yaptırım aracı olarak kullanılmaması gerektiğini belirterek, merkezi yapıdan kaynaklanan potansiyel denge sorunlarına işaret etmiştir. Verinin yalnızca bir merkezden kontrol edilmesi, şeffaflık ve hesap verebilirlik ilkeleriyle tam olarak örtüşmeyen sonuçlara yol açabilmektedir.

- Süreç şeffaflığı eksikliği

İTS, her paydaşa yalnızca kendi erişim düzeyinde veri görme olanağı sunmaktadır. Örneğin bir eczane, ecza deposundaki stokları görememekte, bu da karar alma süreçlerinde eksik bilgiye dayalı hareket edilmesine neden olabilmektedir. Aynı ankette, %9,1'lik eczacı grubu bu durumdan doğrudan rahatsızlık duyduğunu ifade etmiştir. Parmaksiz vd. (2020:436) tarafından yapılan çalışmada da sistemin zaman zaman kesintiye uğraması veya erişim sorunları yaşaması nedeniyle eczanelerin hastalara ilaç satışını gerçekleştiremediği ve bunun operasyonel zorluklar doğurduğu belirtilmiştir. Süreç verilerinin izole edilmesi, sistem genelinde koordinasyon ve kriz yönetimini zayıflatabilmektedir.

- Zincir dışı aktör riski

Sistemin, kayıt dışı üreticiler, ruhsatsız ürün hareketleri veya yasa dışı ithalat süreçlerini doğrudan tespit etme kapasitesi sınırlıdır. Resmî sisteme dahil olmayan aktörlerin izlenmesi teknik olarak mümkün değildir. Bu durum, sistemin yasal olmayan hareketleri engelleme işlevini zayıflatmakta ve riskli ürünlerin zincire sızma ihtimalini artırmaktadır.

- Uluslararası entegrasyon eksikliği

İTS yalnızca ulusal ölçekte çalışan bir sistemdir. İthal ilaçlar veya sınır ötesi lojistik süreçler açısından mevcut yapı, DSCSA veya FMD gibi sistemlerle birlikte çalışabilirlik göstermemektedir. Bu eksiklik, Türkiye'nin ilaç lojistiğinde küresel standartlara uyum sağlama kapasitesini sınırlayabilmektedir.

- Kalite güvencesi sınırlılığı

İTS, ürün hareketlerini izleyebilmekte; ancak ürün kalitesine ilişkin doğrulama veya kontrol işlevi sunmamaktadır. Sistem içinde takip edilen bir ürünün kalitesi düşük olsa dahi, bunu fark edecek bağımsız bir kalite kontrol katmanı mevcut değildir. Parmaksiz

vd. (2020:437), bu durumun özellikle üretim ve ithalat süreçlerinde standart dışı ürünlerin sistem içinde yer alabilmesine yol açabileceğini vurgulamaktadır.

- İlaç güvenliğine ilişkin çevresel veri eksikliği

Sistemin mevcut yapısında, ürünlerin kayıtlı olması yeterli görülmekte; taşıma ve depolama sürecinde sağlık koşullarına uygun muhafaza edilip edilmediğine dair izleme veya alarm mekanizmaları bulunmamaktadır. Özellikle aşılar, biyolojik ilaçlar, insülin gibi ısıya duyarlı ürünlerde sıcaklık, nem, ışık ve süre gibi faktörler doğrudan ürün kalitesini etkileyebilmektedir. Bu tür veriler İTS içinde ne izlenebilmekte ne de kayıt altına alınabilmektedir. Dolayısıyla ürün barkodu sistemde görünse bile, bu ilacın fiziksel bütünlüğüne dair kesin bir güvence sunulamamaktadır. Bu eksiklik, halk sağlığı açısından önemli bir risk alanı oluşturmaktadır.

Özellikle soğuk zincir süreçlerinde yaşanabilecek sıcaklık sapmaları, farmasötik etkinliği doğrudan etkileyebilecek düzeydedir. Ancak İTS sisteminde bu tür sapmaların tespiti, alarm üretimi ya da ihlalin sorumlusunu belirlemeye yönelik bir altyapı henüz mevcut değildir. Sistem yalnızca bildirim temelli çalışmakta, olay bazlı çevresel ihlalleri işleyememektedir. Bu durum, özellikle sıcaklık kontrolü gerektiren ürün gruplarında (ör. mRNA aşıları, biyoteknolojik ürünler) yaşanabilecek zincir kırılması gibi senaryoların sistemsel olarak görünmez kalmasına yol açabilmektedir. Böylece ürünün fiziksel taşıma koşulları bozulmuş olsa dahi, sistem onu "teslim edilmiş ve izlenebilir" olarak gösterebilmektedir. Geliştirilen blok zincir tabanlı modelde çözülmesi amaçlanan temel sorunlardan biri, bu tür zincir kırılmalarının gerçek zamanlı kayıt altına alınması ve kurumsal sorumluluk zincirinin daha açık biçimde belirlenebilmesidir.

Yukarıda özetlenen teknik, yönetimsel ve operasyonel sınırlılıklar, işlem hacmiyle doğru orantılı olarak büyüyen bir risk seti doğurmaktadır. Türkiye'de 2023 yılı verilerine göre eczane ve hastane kanallarından 2,76 milyar kutu ilacın hastalara teslim edildiği rapor edilmiştir (T.C. Sağlık Bakanlığı, 2025). Aynı dönemde Amerika Birleşik Devletleri'nde 6,9 milyar kutu ilaç reçete edilmiş olup bu hacim nüfusa uyarlandığında 20,6 birim/kişi düzeyindedir (IQVIA Institute, 2024). Türkiye'nin 30 kutu/kişi yıllık tüketimi, ABD'deki değeri yaklaşık yüzde 50 oranında aşmaktadır. Bu fark, merkezî İTS mimarisinin işlem kapasitesi, veri bütünlüğü ve siber dayanıklılık bakımından orta vadede zorlanabileceğini göstermekte; bu nedenle sistemin dağıtık defter temelli, çok-düğümlü bir yapıyla desteklenmesinin yapısal bir gereklilik olabileceği değerlendirilmektedir.

Bütün bu sınırlılıklar, İTS'nin ağırlıklı olarak kayıt temelli bir izleme işlevi sunduğunu; oysa sağlık sektörünün güncel ihtiyaçlarının veri doğruluğu, işlem şeffaflığı, çoklu aktör denetimi ve fiziksel güvenlik gibi daha gelişmiş yapı taşlarını talep ettiğini göstermektedir. Bir sonraki bölümde, bu gereksinimlerin blok zincir teknolojisi çerçevesinde nasıl karşılanabileceği ve İlaç Takip Sistemi'nin alternatif bir model ile nasıl desteklenebileceği tartışılacaktır.

5.3.3. Blok Zincir ile Yapısal Yeniden Tasarım: Hyperledger Fabric Perspektifi

İTS kaynaklı sınırlılıklar dikkate alındığında, mevcut yapının büyük ölçüde merkezi sunuculara dayalı bir kayıt mekanizması üzerinden veri izleme işlevi sunduğu; ancak işlem güvenliği, denetlenebilirlik ve çevresel kalite kontrol gibi kritik unsurlar açısından belirli sınırlılıklara sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, tedarik zinciri boyunca gerçekleşen tüm işlemlerin güvenli, şeffaf ve müdahaleye kapalı biçimde kaydedilmesine yönelik ihtiyacı giderek daha belirgin hâle getirmektedir.

Bu ihtiyaca cevap verebilecek en güçlü teknolojik seçeneklerden biri, dağıtık defter temelli blok zincir sistemleridir. Blok zincir, işlemleri değiştirilemez bloklar hâlinde kaydederek her birine zaman damgası atar, çoklu aktör onayı gerektirir ve işlem geçmişinin kronolojik olarak izlenebilmesine olanak tanır. Böylece yalnızca kayıt tutmakla kalmaz, aynı zamanda verinin bütünlüğüne ve güvenilirliğine ilişkin dijital bir güvence sağlar.

Blok zincir sistemleri farklı türlerde tasarlanabilmektedir. Ancak sağlık sektörü gibi gizlilik, yetkilendirme ve kurumsal denetim gerektiren alanlarda, izinsiz yapılardan ziyade izne dayalı blok zincir mimarileri öne çıkmaktadır. Bu bağlamda Hyperledger Fabric, modüler tasarımı, kimlik tabanlı erişim kontrolü, özel veri koleksiyonlarını desteklemesi ve ölçeklenebilirliği ile kurumsal düzeyde uygulamalar için en uygun platformlardan biri olarak değerlendirilmektedir.

Hyperledger Fabric mimarisi, klasik blok zincir sistemlerinden farklı olarak execute–order–validate modeline sahiptir. Bu model sayesinde işlemler önce önerilir (execute), ardından sıralanır (order) ve son olarak doğrulanır (validate). Bu yapı sayesinde ağdaki işlem trafiği optimize edilirken, farklı organizasyonlar arası veri ayrıştırması ve gizlilik korunabilir. Fabric'in kanal yapısı sayesinde her iki organizasyon yalnızca kendi işlemlerini görebilir; sistem genelinde şeffaflık ile veri mahremiyeti aynı anda sağlanabilir.

Bu özellikler, İTS sisteminde karşılaşılan üç temel soruna doğrudan çözüm sağlamaktadır:

1. Veri bütünlüğü ve müdahaleye açıklık: Fabric, her işlemi dijital olarak imzalar ve zincire gömülü hâle getirir. Bu sayede geriye dönük değişiklik yapılamaz ve her işlem kaynağına kadar izlenebilir.
2. İzlenebilirlik ve işlem şeffaflığı: Zaman damgalı işlem geçmişi sayesinde ürünün hangi noktadan geçtiği, ne zaman hangi işlemlere tabi tutulduğu ayrıntılı olarak takip edilebilir.
3. Fiziksel taşıma güvenliği ve kalite kontrol: Hyperledger Fabric, dış sistemlerden (örneğin IoT sıcaklık sensörlerinden) gelen verileri akıllı sözleşmeler üzerinden işleyebilir. Bu mekanizma sayesinde ürün taşıma sırasında sıcaklık eşik değerleri aşıldığında durum otomatik olarak blok zincire kaydedilebilir ve gerekli uyarılar üretilebilir.

Önerilen modelde üretici, ecza deposu, eczane ve Sağlık Bakanlığı gibi kurumların her biri sisteme bir organizasyon olarak dâhil edilmekte ve kendi peer node'una sahip olmaktadır. Bu sayede zincir üzerinde gerçekleştirilen tüm işlemler, organizasyonel kimliklerle ilişkilendirilmiş biçimde işlenmekte ve denetlenebilir bir işlem geçmişi oluşmaktadır.

Sonuç olarak, İTS'nin mevcut sınırlılıkları karşısında önerilen Hyperledger Fabric tabanlı yaklaşım, yalnızca teknik bir yenilik değil aynı zamanda yapısal bir dönüşüm ihtiyacına işaret etmektedir. Sistem, verileri kayıt altına almanın ötesinde, işlemlerin nasıl, ne zaman, kim tarafından ve hangi koşullarda gerçekleştirildiğini güvenli şekilde belgelendirmekte; böylelikle hem kamu sağlığı güvenliği hem de dijital denetim kapasitesi bakımından mevcut yapının sunduğu imkânların ötesinde bir işlevsellik sağlamaktadır.

5.3.4. Türkiye İçin Hyperledger Fabric Tabanlı Modelin Uygulanabilirliği ve Stratejik Gerekçeler

Önceki bölümlerde teknik, yönetişimsel ve fiziksel sınırlılıkları ortaya konan İTS, mevcut haliyle önemli işlevler yerine getirse de değişen dijital gereksinimlere ve ilaç güvenliği beklentilerini sınırlı ölçüde karşılayabilmektedir. Bu durum, yalnızca yeni bir teknolojinin gündeme gelmesiyle değil, aynı zamanda sistemin izlenebilirlikten çok daha

fazlasını sağlaması yönündeki yapısal beklentilerle de ilişkilidir. Bu bağlamda, blok zincir teknolojisinin ve özelde Hyperledger Fabric mimarisinin Türkiye koşullarında uygulanabilirliğini değerlendirmek önem taşımaktadır.

Türkiye, dijital sağlık altyapısı bakımından birçok ülkeye kıyasla önemli bir avantaja sahiptir. E-Nabız, E-Reçete, Medula gibi uygulamalar kamu otoritesinin dijital sistem kurma, yönetme ve yaygınlaştırma kapasitesini göstermektedir. Bu deneyim, blok zincir temelli sistemlerin uygulanabilirliğini destekleyen önemli bir zemin sunmaktadır. Ayrıca İTS'nin uzun süredir aktif olarak kullanılması, kamu kurumları ve özel sektörün bu tür sistemlerle çalışma alışkanlığına sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, blok zincir sistemine geçişin sıfırdan kurulum şeklinde değil, mevcut yapının kontrollü ve bütüncül bir biçimde dönüştürülmesi yoluyla yürütülmesini mümkün kılmaktadır.

Bu dönüşüm yalnızca teknik yeterliliğe değil; aynı zamanda aşağıdaki yapısal avantajlara da dayanmaktadır:

- Merkezi karar alma ve uygulama kapasitesinin güçlü olması,
- Sağlık Bakanlığı koordinasyonunda yürütülen yüksek uyumlu projeler,
- Kamusal düzenleme gücünün yüksekliği,
- İTS sisteminin yıllardır sahada test edilmiş ve benimsenmiş olması.

Hyperledger Fabric tabanlı bir sistem bu koşullara uygun olacak şekilde, her tedarik zinciri aktörünün kendi dijital kimliğine ve düğümüne sahip olabileceği bir yapı önerir. Bu yapı sayesinde:

- Veriler sadece merkezî sunucuda değil, yetkilendirilmiş kurumlara ait dağıtık düğümlerde saklanabilir,
- Sistem daha az kesinti riskiyle çalışabilir ve veri kaybı ihtimali azaltılabilir,
- Geri çağırma, ilaç geçerlilik doğrulaması gibi işlemler akıllı sözleşmelerle otomatik hale getirilebilir,
- E-consent, ePI, sıcaklık takibi gibi ileri düzey çözümler sisteme entegre edilebilir.

Türkiye'de faaliyet gösteren ilaç firmalarının büyük çoğunluğunun hâlihazırda ERP sistemleri kullanıyor olması, bu firmaların blok zincir tabanlı mimariye geçişini kolaylaştıracaktır. Aynı şekilde, ecza depoları ve eczaneler gibi diğer aktörlerin de sisteme

uyum göstermesi teknik olarak mümkündür. Bunun yanında, Türkiye'de uzun süredir kullanılan GTIN ve SN gibi tanımlama standartları, blok zincir sistemine entegre edilerek geçiş maliyetini ve uyumsuzluk riskini düşürebilir.

Stratejik olarak bakıldığında, blok zincir temelli yapılar Türkiye'nin sadece iç pazarda değil, uluslararası ilaç tedarik zincirinde de daha güçlü bir konuma ulaşmasına katkı sunabilir. FMD ve DSCSA gibi düzenlemeler dikkate alındığında, Türkiye'nin bu yapılarla birlikte çalışabilir sistemler geliştirmesi, dış ticaret açısından rekabetçiliğini artıracaktır.

Bununla birlikte, blok zincir uygulamalarının sağlık sektöründe küresel düzeyde hâlen sınırlı ölçeklenebilmiş olması bir dikkat noktasıdır. Literatürde yer alan birçok girişimin pilot düzeyde kalmış olması, genellikle teknolojik yetersizlikten değil; finansal sürdürülebilirlik, düzenleyici uyum ve kurumsal adaptasyon gibi dışsal sınırlardan kaynaklanmaktadır.

Bu bağlamda Türkiye, İTS gibi halihazırda kurulu ve çalışan bir sistemin sağladığı avantajı kullanarak geçişi yüksek maliyetli bir reform süreci olmaktan çıkarıp, kademeli ve kontrollü bir dijital dönüşüm süreci olarak yönetme potansiyeline sahiptir. Uluslararası deneyimlerin de gösterdiği üzere, teknolojik uyum kadar mevzuat altyapısı ve kurumsal iş birliği düzeyi de başarının belirleyicisi olmaktadır.

Blok zincir temelli uygulamalardan elde edilen küresel deneyimlerin Türkiye için sınırlayıcı değil; stratejik ve yol gösterici birer referans olarak değerlendirilmesi, bu geçişin daha sağlıklı ve gerçekçi temeller üzerine kurulmasına imkân verecektir. Önerilen yapının mevcut sistemden temel farklarını daha net biçimde ortaya koyabilmek amacıyla bir sonraki bölümde karşılaştırmalı analiz yapılacaktır.

5.3.5. İTS ve Hyperledger Fabric Sisteminin Karşılaştırmalı Analizi

İTS ile Hyperledger Fabric tabanlı blok zincir mimarisinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi, mevcut sistemin teknik sınırlarının daha açık şekilde anlaşılmasına ve alternatif yapının bu sınırlıkları nasıl aşabileceğinin somut biçimde ortaya konmasına imkân tanımaktadır. Aşağıda sunulan tablo 5.6, her iki sistemin mimari yapısı, veri işleme kapasitesi, erişim denetimi, güvenlik mekanizmaları ve otomasyon olanakları açısından temel farklılıklarını sistematik biçimde özetlemektedir.

Tablo 5.6. *İTS ve hyperledger fabric tabanlı sistemlerin karşılaştırması*

Kriter	İTS	Hyperledger Fabric Tabanlı Sistem
Sistem Mimarisi	Merkezi, Tekil Sunucu Temelli	Dağıtık (İzinli), Çok Düğümlü
Veri Saklama	Tüm Veriler Merkezî Sunucuda Tutulur	Her Aktör Verisini Kendi Peer Node'unda Saklar, Zincirle Senkron
Veri Bütünlüğü	Merkezi Kontrolle Değiştirilebilir	Zaman Damgalı, Değiştirilemez, Kriptografik Olarak Korunur
Erişim Denetimi	Rol Bazlı, Merkezî Yetkilendirme	MSP ve Kanal Yapısıyla Dinamik, Kurum Bazlı Yetkilendirme
İzlenebilirlik	Kısıtlı İşlem Geçmişi, Kısmi Şeffaflık	Tüm İşlemler Blok Bazlı Kayıtlı, Eksiksiz İşlem Geçmişi
Veri Güvenliği	Saldırılara Açık Merkezî Yapı	Dağıtık Yapı, Hash ve Dijital İmzayla Yüksek Güvenlik
Uluslararası Uyumluluk	Ulusal Sistemlerle Sınırlı	Yapılandırılabilir Model ile Küresel Standartlara Uyumlu
Gerçek Zamanlı Uyarı	Sınırlı, Merkezden Tetiklenir	Akıllı Sözleşmelerle Otomatik Uyarı ve Tepki Mekanizması
Sahtecilik Tespiti	Karekod Doğrulamasına Dayalı	Çoklu İmza, Zincir İçi İşlem Analizi ve Kurallı Doğrulama
Süreç Otomasyonu	Yok; İşlemler Manuel Yürütülür	Chaincode ile Koşula Bağlı Otomatik İşlem Yürütme

Kaynak: Tablo yazar tarafından oluşturulmuştur.

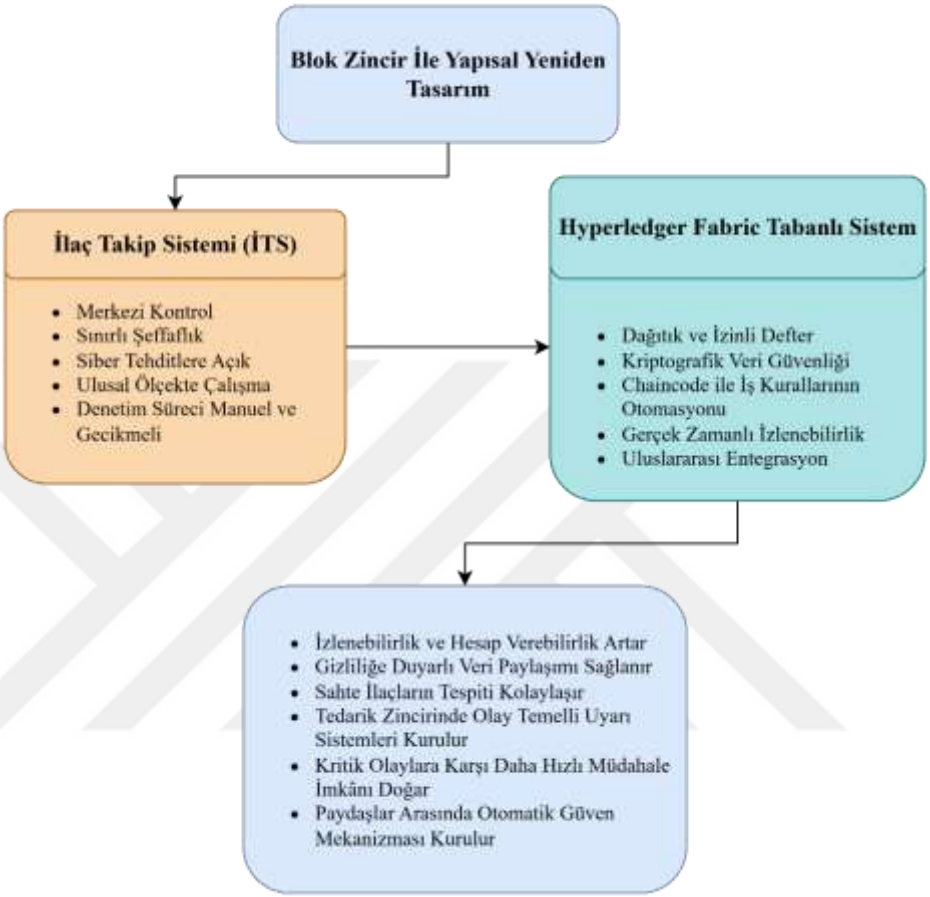
Tablo 5.6'da sunulan kriterler üzerinden yapılan karşılaştırma, İTS'nin belirli izlenebilirlik işlevlerini yerine getirdiğini ancak sistem mimarisi, veri güvenliği, erişim yönetimi ve otomasyon kabiliyeti açısından önemli sınırlılıklara sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle veri bütünlüğünün garanti altına alınamaması, şeffaflık düzeyinin düşük olması ve çok aktörlü yapıların güvenli biçimde koordinasyonunun sağlanamaması, mevcut yapının uzun vadeli sürdürülebilirliği açısından önemli riskler barındırmaktadır. Nitekim literatürde yapılan bir karşılaştırmalı analiz, İTS'nin izlenebilirlik fonksiyonlarını yerine getirmesine rağmen şeffaflık, güvenlik ve esneklik açısından blok zincir tabanlı sistemlerin gerisinde kaldığını ortaya koymuştur (Ayhan vd., 2021).

Buna karşılık Hyperledger Fabric tabanlı mimari, dağıtık ve yetkilendirilmiş yapısıyla yalnızca teknik bir alternatif değil; aynı zamanda işleyiş, güvenlik ve birlikte çalışabilirlik açısından mevcut sistemi geliştirmeye açık bir dijital dönüşüm imkânı sunmaktadır. Akıllı sözleşmeler, kanal bazlı erişim denetimi ve zincir bazlı işlem geçmişi gibi özellikler sayesinde, sistemin hem iç denetim kapasitesi hem de dış paydaşlarla uyum potansiyeli artmaktadır.

İTS'nin bugüne kadar oluşturduğu dijital temel dikkate alındığında, blok zincir tabanlı yapının Türkiye'de uygulanması teknik bir devrimden ziyade, kontrollü bir dijital evrim süreci olarak değerlendirilebilir. Bu geçişin yalnızca kamu otoritesi tarafından değil, özel

sektör ve uluslararası paydaşlar tarafından da desteklenmesi hâlinde, Türkiye'nin sağlık sisteminde daha güvenli, şeffaf ve sürdürülebilir bir yapıya geçişi mümkün olabilecektir.

Şekil 5.2. *İTS'nin blok zincir ile yeniden yapılandırılması*



Türkiye'deki yapı ve Hyperledger Fabric tabanlı sistem önerisinin karşılaştırmalı analizi, yapısal dönüşüm ihtiyacını ve uygulanabilirliği ortaya koymuştur. Ancak bu yaklaşımın özgün katkısını değerlendirebilmek için, literatürde benzer çalışmalarda hangi temaların öne çıktığı, hangi teknolojilerin kullanıldığı ve hangi boşlukların hâlen varlığını sürdürdüğü sistematik biçimde analiz edilmelidir. Bu nedenle sonraki bölümde, blok zincir tabanlı tedarik zinciri uygulamalarına yönelik akademik literatür detaylı olarak incelenecektir.

ALTINCI BÖLÜM

BLOK ZİNCİR TABANLI TEDARİK ZİNCİRİ UYGULAMALARINA YÖNELİK LİTERATÜR ANALİZİ

Blok zincir teknolojisinin son yıllarda birçok alanda yaygınlaşmasıyla birlikte, bu teknolojinin tedarik zincirinde nasıl konumlandığı da giderek daha fazla araştırmanın konusu hâline gelmiştir. Ancak mevcut literatürde, blok zincirin genel mimarisi, kripto varlık temelli kullanımları veya yazılım geliştirici perspektifinden teknik analizlerine odaklanan çok sayıda yayın bulunmakta; bu çalışmalar, çoğu zaman tedarik zincirine özgü yapısal sorunları ele almamaktadır.

Bu çalışma ise yalnızca tedarik zincirine entegre edilen blok zincir çözümlerine odaklanmakta; özellikle ilaç sektörü başta olmak üzere, gıda, tarım, otomotiv ve benzeri alanlarda karşılaşılan somut sorunlara yönelik çözüm önerilerini incelemektedir. Literatürde sıkça vurgulanan sahtecilik, şeffaflık eksikliği, izlenebilirlik yetersizliği, tedarik belirsizlikleri ve veri güvenliği gibi temel sorunların, blok zincir teknolojisi ile nasıl ele alındığı bu bağlamda değerlendirilmiştir. Ayrıca bazı çalışmalarda, tedarik zincirlerinde karşılaşılan kırılganlık, dirençlilik ve kesinti riski gibi konuların blok zincir sistemleriyle nasıl ilişkilendirildiği de analiz kapsamında dikkate alınmıştır.

İncelenen çalışmalar uygulama düzeyinde olmakla birlikte, kuramsal tartışmalarla sınırlı kalan, tedarik zinciri bağlamı dışında kalan ya da yalnızca teknik algoritma geliştirmeye odaklanan yayınlar kapsam dışında tutulmuştur. Literatür değerlendirmesi, yalnızca sorun-çözüm odaklı, tedarik zinciri süreçlerine dokunan blok zincir uygulamalarını içermektedir.

Bu bağlamda, analiz edilen literatür iki ana grupta yapılandırılmıştır:

- İlaç sektöründe yapılan çalışmalar: Sahte ilaçla mücadele, izlenebilirlik, veri bütünlüğü, sıcaklık kontrolü ve şeffaflık gibi ihtiyaçlara blok zincirle getirilen çözümler.

- Diğer sektörlerde yapılan çalışmalar: Gıda, tarım, otomotiv, tekstil ve savunma gibi sektörlerde tedarik zinciri süreçlerine dair çözüm önerileri.

Bölümün devamında, önce ilaç sektörüne yönelik yapılan çalışmalar tablo ve açıklayıcı analizle birlikte sunulacak, ardından diğer sektörlerdeki uygulamalara yer verilecektir.

6.1. Literatürün Derlenme Süreci ve Kapsamı

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen literatür derleme sürecinin temel amacı, blok zincir teknolojisinin tedarik zinciri sistemlerine sunduğu katkıları sektörel bağlamda değerlendirmek ve bu katkıların uygulama düzeyindeki yansımalarını sistematik biçimde analiz etmektir. İnceleme, yalnızca teknolojik altyapılar üzerinden değil; aynı zamanda blok zincirin tedarik zinciri süreçlerinde karşılaşılan yapısal sorunlara, operasyonel darboğazlara ve sistemsel zayıflıklara yönelik sunduğu çözüm önerileri üzerinden yürütülmüştür.

Literatür tarama süreci kapsamında, Scopus, Web of Science ve ScienceDirect veri tabanlarında, 2016–2024 yılları arasını kapsayacak şekilde kapsamlı bir tarama gerçekleştirilmiştir. Kullanılan arama terimleri İngilizce olarak belirlenmiş olup; “blockchain”, “supply chain”, “pharmaceutical supply chain”, “Hyperledger”, “Ethereum”, “smart contract”, “traceability” ve “decentralized ledger” gibi sektör ve teknoloji odaklı anahtar kelimelerin yanı sıra literatürde giderek daha fazla önem kazanan ve özellikle tedarik zinciri yönetiminde sıkça tartışılan “resilience”, “vulnerability” ve “disruption” gibi kavramların, blok zincir uygulamalarıyla nasıl ilişkilendirildiği de incelemeye dahil edilmiştir. Böylece yalnızca teknik düzeyde değil; aynı zamanda süreç güvenliği, yönetişimsel dayanıklılık ve sistem bütünlüğü gibi açılardan da değerlendirilen uygulamalara odaklanılmıştır.

Tüm makaleler tam metinleri üzerinden incelenmiş; içerik düzeyinde analiz edilerek seçilmiştir. Her bir çalışmanın kullandığı teknoloji altyapısı, hedeflediği tedarik zinciri problemi, uygulama düzeyi ve sektörel bağlamı dikkate alınarak değerlendirme kapsamına dâhil edilmiştir. Böylece yalnızca başlık veya özet düzeyinde değil, içerik açısından da bütüncül bir analiz süreci benimsenmiştir.

Bu doğrultuda, yalnızca tedarik zinciri dışı alanlara (örneğin finansal sistemler, dijital kimlik uygulamaları, NFT altyapıları vb.) odaklanan veya sadece teknik algoritma anlatımı yapan, sektörel çözüm sunmayan çalışmalar kapsam dışı bırakılmıştır. Ayrıca nitel veri analizi gibi yöntemlerle yalnızca blok zincirin algısını ölçen ve doğrudan bir

sistem çözümü önermeyen yayınlar da değerlendirmeye alınmamıştır. Dışlama kriteri olarak konferans bildirileri, kitap bölümleri ve ticari raporlar elenmiş; yalnızca hakemli akademik makaleler değerlendirme kapsamına alınmıştır.

Analize dâhil edilen çalışmalar şu iki ana gruba ayrılarak yapılandırılmıştır:

- İlaç sektörü odaklı blok zincir uygulamaları, çalışmanın ana temasını oluşturması nedeniyle ayrı bir başlık altında detaylı olarak incelenmiştir. Bu gruptaki çalışmalarda özellikle Hyperledger ve Ethereum altyapısına sahip uygulamalara öncelik verilmiştir.
- Diğer sektörlere yönelik uygulamalar, gıda, tarım, otomotiv ve benzeri sektörlerdeki örnekleri kapsayacak şekilde derlenmiş ve ayrı bir başlık altında değerlendirilmiştir.

Bu yapı sayesinde, blok zincir teknolojisinin yalnızca teorik düzeyde değil; sektörel gerçeklikler içinde, somut tedarik zinciri sorunlarına karşı nasıl konumlandığı bütüncül biçimde ortaya konulmuştur. Bölümün devamında, her iki kategoriye ait çalışmalar tablo ve açıklayıcı analizlerle sunulmaktadır.

6.2. İlaç Tedarik Zincirine Yönelik Yapılan Çalışmalar

İlaç sektörü, tedarik zinciri yönetimi açısından hem hayati önem taşıyan ürünlerin taşındığı hem de yüksek düzeyde regülasyona tabi olan bir alan olması nedeniyle blok zincir uygulamaları için öncelikli ve stratejik bir örnek alan olarak değerlendirilmektedir. Sahte ilaçların önlenmesi, ilaçların üretimden hastaya kadar olan yolculuğunun izlenebilirliği, sıcaklık ve ortam koşullarının takibi, veri güvenliği ve ilaç erişiminde şeffaflık gibi çok sayıda karmaşık sorun, bu alanda blok zincirin potansiyel çözümlerini öne çıkarmaktadır. Bu teknolojik uygulamaların en dikkat çeken yönlerinden biri, ilaç tedarik zincirindeki kırılganlıkların azaltılmasına, kriz anlarında sürecin yeniden toparlanabilmesine ve sistemin uzun vadeli sürdürülebilirliğine katkı sunmasıdır. Bu bağlamda, çalışmalarda sunulan çözümler; tedarik zinciri risk yönetimi çerçevesine entegre edilerek kırılganlık, dirençlilik ve dayanıklılık boyutları üzerinden değerlendirilmiştir.

Bu kapsamda değerlendirilen çalışmalar, doğrudan ilaç tedarik zinciri bağlamında sistem veya model öneren, uygulama temelli ve teknik çözüm içeren akademik yayınlardan oluşmaktadır. Özellikle Hyperledger Fabric ve Ethereum gibi kurumsal blok zincir altyapılarının kullanıldığı uygulamalar ön planda yer almaktadır. Tablo 6.1'de özetlenen literatür tablosu, ilaç sektörü özelinde geliştirilen blok zincir tabanlı sistemleri;

kullandıkları platformlar, hedefledikleri sorun alanları, uyguladıkları teknik bileşenler ve elde ettikleri çıktılar açısından karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Çalışmalarda öne çıkan uygulama mimarileri, izlenebilirlik düzeyleri, veri güvenliği yaklaşımı ve performans göstergeleri üzerinden sistematik bir yapı kurulmuştur.

Tablo 6.1. *İlaç tedarik zincirinde öne çıkan blok zincir çalışmaları*

Yazar(lar)	Kullanılan Platform	Amaç	Öne Çıkan Özellikler	Sonuçlar ve Katkılar
Sudha, (2024)	Hyperledger Fabric + Sawtooth	Kaynak Tüketimi Açısından İlaç Tedarik Zincirinde Blok Zincir Altyapılarının Karşılaştırılması	- Transfer Chain + Cross Chain Mimarisi - LMDB Tabanlı Hızlı Veri Erişimi - PBFT ve Devmode ile Çiftli Test	- Sawtooth, Fabric'e Göre Daha Az CPU Tüketimiyle Daha Yüksek İşlem Kapasitesi - Kaynak Verimliliği Açısından Tercih Edilen Platform
Dash vd., (2024)	Hyperledger Composer + Caliper	Lojistik Kayıpları Azaltmak ve Sahtecilikle Mücadele İçin SCRM Modeli Geliştirmek	- Katmanlı Composer Mimarisi - Smart Contract + ACL Kontrollü İşlem Modeli - 4 Senaryolu Performans Testleri	- Tüm İşlem Geçmişi İzlenebilir Biçimde Modellenmiş - Caliper ile Yüksek İşlem Hacmi ve Düşük Gecikme Doğrulanmış - Sahteciliği Önleyici Dijital Kanıt Altyapısı Sunmuştur
Mangala vd., (2024)	Filecoin	Farklı Blok Zincir Platformlarının Veri Yükleme/İndirme Performansını Karşılaştırmak	- Dört Katmanlı Mimari - Büyük Veri Destekli Filecoin Entegrasyonu - IPFS ile Hızlı ve Ucuz Dosya Depolama	- Filecoin Büyük Veri İçin Hızlı ve Düşük Maliyetli Çözüm - Zaman ve İşlem Maliyeti Açısından Ethereum ve Bitcoin'i Geride Bırakmıştır
Nawaz vd., (2024)	Hyperledger Sawtooth	Sahte İlaçları Önlemek ve Gerçek Zamanlı İzlenebilirlik Sağlamak	- Poet Konsensüsü - Dinamik QR - Modüler Mimari, Quantum Güvenli Off-Chain İletişim - REST API Entegrasyonu	- Gerçek Zamanlı İzlenebilirlik - %82 Başarı Oranı Performans Testleri - Quantum Saldırılarına Karşı Güvenlik
Jha vd., (2023)	Hyperledger Fabric	Sahte İlaçların Önlenmesi ve İlaç Hareketlerinin Uçtan Uca Takibi	- Kimlik Doğrulamalı Özel Ağ Yapısı - Akıllı Sözleşmelerle İşlem Otomasyonu - Dağıtık Defter Mimarisi	- Gerçek Zamanlı İzleme, Güvenli Veri Yönetimi - Çoklu Organizasyon Yapısıyla İşlem Süresi ve Gecikme Düşürülmüştür
Bapatla vd., (2023)	Ethereum + Smart Contract	Sahte İlaçların Önlenmesi ve Ürünlerin Lot ve Birim Düzeyinde İzlenebilirliğinin Sağlanması	- Smart Contract Adresi + Ürün Seri No - RBAC Erişim Kontrolü - IPFS ile Veri Paylaşımı - Etkileşimli Etiketleme	- Ürün Bazında Benzersiz İzlenebilirlik - Etiketleme Maliyetlerinde Düşüş - DSCSA ve PDMA ile Uyum, IPFS ile Hasta Bilgilendirme
Perumalsamy ve Kaliyamurthy (2023)	Hyperledger Fabric + Derin Öğrenme	Sahtecilik Riskine Karşı Güvenli Takip ve İlaç Öneri Sistemi Geliştirme	- Hyperledger Tabanlı İzleme - Derin Öğrenme ile İlaç Tavsiye Modülü	- Üretimden Tüketime Kadar İzlenebilirlik - Öneri Sisteminde Yüksek Doğruluk ve Performans
Shanthi ve Kaliyamurthy (2023)	Hyperledger Fabric + Karar Ağaçları+ Optimizasyon	Güvenli İlaç Öneri Sistemi Oluşturmak ve Tedarik Sürecini İzlemek	- Yetkili Erişim ile Güvenli İzleme - Karar Ağaçlarıyla Öneri Geliştirme - En İyi Ayarların Otomatik Belirlenmesi	- %96,6 Doğrulukla Başarılı İlaç Önerisi - Tedarik Zinciri Etkin Biçimde İzlenmiştir
Tahmasbzadeh ve Kabirirad (2023)	Hyperledger Besu	Güvenli Veri Saklama ve İlaçların Doğrulanabilir Takibi	- Blok Zincir Dışı Depolama - Gizlilik Korumalı İşlemler - Yetkili Erişim Yapısı	- Zincir Üzerindeki Yük Azaltılmış - Veri Güvenliği ve İzlenebilirlik Güçlendirilmiştir
Crosslan vd., (2023)	Janus (Özel Çoklu Quorum Tabanlı Blok Zincir)	İlaç Tedarik Zincirinde Ürün Geçmişini Güvenli Tutmak, Sahteciliği Önlemek	- Çoklu-Quorum Yapısı - Hologram Etiketleme - Fiziksel-Dijital Doğrulama Entegrasyonu, 2/3 Oylama	- Adil, Ölçeklenebilir ve Saldırılara Dayanıklı - Sahte Ürün Tespiti ve Güvenli Dağıtım Sağlanmıştır
Gomasta vd., (2023)	Hyperledger Fabric	Bangladeş'te Sahte İlaçları Önlemek ve Tedarik Zincirini Güvenli Hâle Getirmek	- On-Chain + Off-Chain Mimari - ECC + SHA256 + Çift İmza Doğrulama - Çok Seviyeli Yönetişim Yapısı	- İzlenebilirlik, Ölçeklenebilirlik, Şeffaflık ve Bütünlük - 33% Node Saldırısına Karşı Dayanıklı Yapı Geliştirilmiştir

Tablo 6.1. *İlaç tedarik zincirinde öne çıkan blok zincir çalışmaları (devamı)*

Yazar(lar)	Kullanılan Platform	Amaç	Öne Çıkan Özellikler	Sonuçlar ve Katkılar
Munasinghe ve Halgamuge (2023)	Hyperledger Fabric	COVID-19 Aşılarının İzlenebilirliğini Sağlamak ve Sahtecilikleri Önlemek	- Dört Akıllı Sözleşme (Kayıt, Stok, Konum, Sınır Yetkilendirme) - IPFS Destekli Saklama	- Gerçek Zamanlı Konum Takibi - Sınır Geçiş Yetkilendirmesi - Regülasyon Uyumu ve Yüksek Şeffaflık; Farklı Sektörlere De Uyarlanabilir
Sharma ve Rohilla (2023)	Hyperledger Fabric + Makine Öğrenimi	İlaç Keşfi Sürecinde Katkıların Güvenli Paylaşımı, Doğrulanması ve Takibi	- SHA-256 + Inchıkey ile Kimlikleme - Zincir Dışı Veri Depolama - Zincir Kod Modülleri	- 365 TPS'ye Kadar İşlem Kapasitesi - Düşük Kaynak Kullanımıyla Güvenli ve İzlenebilir Keşif Ağı - ML ile Veriler Analiz Edilmiştir
Abdallah ve Nizamuddin (2023)	Ethereum + Smart Contract	Online Satışta Şeffaflık, Sahteciliğin Önlenmesi ve Iot ile İzlenebilirliğin Sağlanması	- Iot Destekli Konteyner Sensörleri - MQTT ile Veri İletimi - Akıllı Sözleşmeyle Ödeme ve İhlal Tespiti	- İlaç Teslim Süreci Şeffaf Hale Gelmiş - Tüketici Doğrulama Sistemi Kurulmuş - İhlal Durumunda Sözleşmeyle Geri Ödeme Uygulanmıştır
Dave vd., (2022)	Hyperledger Fabric	Farmasötik Ürünlerin Takibi ve Sahtecilik Riskinin Azaltılması	- Yetkilendirme Tabanlı Erişim - Raft Konsensüsü - Akıllı Sözleşme ile İşlem Doğrulama	- Zaman Damgalı, Geri İzlenebilir İşlem Zinciri - Yetkisiz Erişim Engellenmiş - İşlem Güvenliği Artırılmış
Agrawal vd., (2022)	Hyperledger Composer	Geri Çağırma Süreçlerini İzlenebilir, Hızlı ve Güvenli Hâle Getirmek	- İleri-Geri Yönlü Zincir Modeli - Matematiksel Maliyet-Zaman Analizleri - Rol Bazlı Erişim ve Akıllı Sözleşme	- İlaç Geri Çağırma Süreçleri Başarıyla Modellenmiş - Hyperledger Composer ile Tam İzlenebilir İşlem Geçmişi
Babu vd., (2022)	Hyperledger Fabric + Caliper	Güvenli, İzlenebilir ve Yüksek İşlem Kapasiteli Tedarik Zinciri Sistemi Geliştirme	- ECDSA ile Kimlik Doğrulama - TLS Güvenliği - Mongodb + SHA-256 ile SDI Veri Koruması - Caliper Performans Testi	- 1024 TPS İşlem Kapasitesi - Yazma İşlemlerinde Ortalama 3.85 Sn Gecikme - Okuma İşlemlerinde 1.65 Sn Gecikme - Yüksek Güvenlik ve Performans
Lopez vd., (2022)	Hyperledger Fabric	COVID-19 İçin Temel İlaçların Şeffaf, Güvenli ve İzlenebilir Şekilde Dağıtımını Sağlamak	- Docker Üzerinde Fabric 2.0 - Couchdb, Çok-Kanallı Yapı - Go Dilinde Akıllı Sözleşme	- Sahteciliğin Azaltılması ve Süreç Şeffaflığı - Tedarik Zinciri Performansında İyileşme - Prototip Başarıyla Test Edilmiştir
Mani vd., (2022)	Hyperledger Fabric + Caliper	İlaç Sahteciliğini Önlemek ve Şeffaf, İzlenebilir Bir Tedarik Zinciri Oluşturmak	- Zincir Dışı IPFS + Zincir Üstü Couchdb - QR Kod ile Ürün Takibi - Akıllı Sözleşmeler, Rol Bazlı Erişim - Caliper ile Performans Testi	- Ürün Yaşam Döngüsü Boyunca İzlenebilirlik - Sahte Ürünler Tespit Edilmiş - Yüksek Başarı ve Düşük Gecikme Ölçülmüştür
Padmavathi ve Rajagopalan (2022)	Hyperledger Fabric + Hyperledger Caliper	Sahte İlaçları Önlemek ve İlaçların İzlenebilirliğini Sağlamak; Ayrıca Stok Takibini Optimize Etmek	- Execute-Order-Validate Modeli - Akıllı Sözleşmeler - Sıcaklık/Konum Takibi - Caliper Performans Ölçümü	- %96 Başarı Oranı, 95 TPS'ye Kadar Hız - Düşük Kaynak Kullanımıyla Yüksek İzlenebilirlik - Tüm Aktörler İçin Erişim Kontrollü Yapı
Bali vd., (2021)	Hyperledger Fabric	Sahte İlaçları Önlemek ve İlaç Sahipliğini İzlenebilir Kılmak	- Akıllı Sözleşmelerle Sahiplik Transferi - Yalnızca Üretici Kayıt Yetkisi - JS Chaincode, Üç Algoritmalı İzleme Sistemi	- Üreticiden Tüketiciye Tüm Hareketler İzlenmiş - Sahtecilik Riski Azaltılmış - IBM Blok Zincir Platformu ile Gerçek Sistem Entegrasyonu Önerilmiştir

Tablo 6.1. *İlaç tedarik zincirinde öne çıkan blok zincir çalışmaları (devamı)*

Yazar(lar)	Kullanılan Platform	Amaç	Öne Çıkan Özellikler	Sonuçlar ve Katkılar
Uddin vd., (2021)	Hyperledger Fabric + Hyperledger Besu	İlaç Tedarik Zincirinde Sahteciliği Önleyecek İzlenebilir Mimariler Geliştirme	- Zincir Kodu ile İşlem Doğrulama, Özel Kanal Yapısı - İzinli Gruplar, Özel İşlemler, IPFS Entegrasyonu	- Gizlilik, Güvenlik, Şeffaflık ve Ölçeklenebilirlik Sağlayan İki Mimari - Avantajları Karşılaştırmalı Olarak Sunulmuştur
Liu vd., (2021)	Hyperledger Fabric	Akıllı Takip ve İzleme ile Sahte İlaçları Önlemek ve Şeffaflığı Artırmak	- 5 Katmanlı Mimari - PBFT Mutabakatı - Akıllı Sözleşme ile Kalite ve Risk Yönetimi	- Gerçek Veriyle Test Edilmiş, Yüksek İzlenebilirlik ve Güvenlik - 200kb Blok Boyutu Optimum Bulunmuştur
Thejaswini vd., (2021)	Ethereum + Hyperledger Fabric + Caliper	Sahte İlaçları Önlemek ve Her Adımda Doğrulama Sağlamak	- Encrypted QR Kod - Go Dilinde Akıllı Sözleşme - Caliper Performans Analizi, Ganache Tabanlı Özel Ethereum	- Uçtan Uca İzlenebilirlik - Sahtecilik Tespiti Artmış - Hasta ve Eczacıya Dijital Doğrulama İmkânı
Kumiawan vd., (2020)	Hyperledger Fabric	Endonezya'daki Sağlık Merkezlerinde Sahte İlaçları Önlemek ve Veri Güvenliğini Artırmak	- Chaincode ile Sipariş Takibi - REST API Erişimi - Jmeter ile Performans Testi	- Get İşlemleri Hızlı, Post İşlemlerinde Gecikmekte - Düşük Kaynakla Yüksek Verim - Performans ve Güvenlik Artmıştır
Raj vd., (2019)	Hyperledger Fabric	Sahte İlaçları Önlemek ve Tedarik Zincirinde İzlenebilirliği Sağlamak	- EPC ile Dijital Mülkiyet - Akıllı Sözleşmeler - Ruhsatlı Ağ Yapısı, Sahiplik Aktarımı Algoritması	- Mülkiyet Temelli Doğrulama Protokolü - İlaç Yaşam Döngüsü Boyunca Blok Zincir İzlenebilirliği - Sahte İlaç Tespiti Yapılmıştır
Sinclair vd., (2019)	Hyperledger Composer	DSCSA Yönetmeliğine Uyumlu İzleme Sistemi Geliştirme	- Katılımcı Tanımı - İşlem Kayıtları - Erişim Kontrolü, Senaryo Tabanlı Prototipleme	- DSCSA Uyumu İçin Prototip Geliştirilmiş - Güvenlik ve Erişim Kontrolü Başarıyla Modellenmiştir
Jamil vd., (2019)	Hyperledger Fabric	Akıllı Hastane Ortamında Sahte İlaçları Önlemek ve Reçeteye Dayalı İlaç Takibini Güvenli Hâle Getirmek	- Elektronik Reçete, Hasta-Doktor Eşleşmesi - Akıllı Sözleşme ile Erişim Kontrolü - REST API Tabanlı Dağıtım Yapısı	- Tüm Yaşam Döngüsü Boyunca İzlenebilirlik - Sahtecilik Önlenmiş - Caliper Testlerinde Yüksek TPS ve Düşük Gecikme
Sylim vd., (2018)	Hyperledger Fabric + Ethereum	Sahte ve Kalitesiz İlaçların Dağıtım Zincirinde Tespiti İçin İzlenebilir ve Doğrulanabilir Bir Sistem Geliştirme	- RFID + GTIN Tabanlı İzleme - GS1 Pedigree Standardı - FDA Doğrulamalı Akıllı Sözleşmeler, DFS Entegrasyonu	- FDA Merkezli Doğrulama ile Sahtecilik Önlenmiş - Eksik/Hatalı/ Yetkisiz Girişimler Anlık Tespit Edilmiştir
Tseng vd., (2018)	Gcoin Blockchain	Tayvan'da Sahte İlaçları Önlemek İçin İzlenebilirlik ve Denetim Modeli Geliştirmek	- Çok Paydaşlı İzinli Ağ - QR Kodlu İlaç Kimliği - Çoklu İmza ile Açık Veri Modeli	- Gcoin ile İzlenebilirlik Sağlanmış - Denetim Yükü Azaltılmış - Her Düzeyde Anlık Takip ve Müdahale İmkânı Sunulmuştur

Tablo 6.1, ilaç tedarik zincirine yönelik blok zincir uygulamalarını ele alan ve literatürde öne çıkan 30 akademik çalışmanın karşılaştırmalı analizine dayanmaktadır. İncelenen çalışmalar; platform tercihleri, teknik uygulama düzeyleri, entegrasyon biçimleri ve çözüm hedefleri açısından çeşitlilik göstermekte; sahtecilik önleme, izlenebilirlik, veri güvenliği ve sistem bütünlüğü gibi temel alanlara odaklanmaktadır.

İncelenen sistemlerin büyük çoğunluğu, kurumsal blok zincir çözümlerinden Hyperledger Fabric tabanlı mimarileri tercih etmiş; bunun yanında Ethereum, Hyperledger Besu, Gcoin, Filecoin, Hyperledger Sawtooth gibi alternatif altyapılar da çeşitli senaryolarda kullanılmıştır. Yalnızca izlenebilirlik değil, aynı zamanda akıllı öneri sistemleri, ilaç geri çağırma mekanizmaları, sahiplik ispatı, hasta merkezli doğrulama sistemleri gibi işlevsel modüllerle desteklenen çok sayıda örnek çalışma dikkat çekmektedir. Bu bağlamda aşağıda maddeler halinde sunulan analizler, blok zincir temelli sistemlerin ilaç tedarik zinciri bağlamında hangi teknolojileri, hangi amaçlarla ve ne ölçüde başarıyla kullandığını göstermektedir.

- **Platform Tercihleri**

Tabloda yer alan 30 çalışmanın büyük bölümü, izinli blok zincir altyapısı sunan Hyperledger Fabric platformunu temel alarak sistemlerini yapılandırmıştır. Hyperledger Fabric'in özellikle erişim kontrolü, modüler yapı sunması, kurumsal veri yönetimine uygunluğu ve yüksek işlem kapasitesi sağlayabilmesi, bu tercihlerin temel nedenleri arasında yer almaktadır. Fabric tabanlı sistemler arasında bazı çalışmalar sadece temel izlenebilirlik işlevlerine odaklanırken, bazıları daha gelişmiş performans ölçümleri (örneğin Caliper ile test edilmiş mimariler) ya da kapsamlı kullanıcı yetkilendirme ve veri bütünlüğü sistemleri önermiştir.

Bununla birlikte, Hyperledger Besu, Sawtooth, Composer ve Ethereum tabanlı örnekler de alternatif olarak değerlendirilmiştir. Örneğin, Hyperledger Besu'nun gizlilik ve esneklik odaklı mimarisi, bazı projelerde IPFS (InterPlanetary File System – dağıtık dosya sistemi) ve Orion (özel işlemler için kullanılan gizlilik protokolü) gibi bileşenlerle entegre edilmiş, veri gizliliği ve zincir dışı veri yönetimi ihtiyaçlarına yönelik çözümler geliştirilmiştir. Yine Ethereum tabanlı sistemlerde özellikle akıllı sözleşmelerin esnekliği ön plana çıkarken; Filecoin ve Gcoin gibi daha az yaygın platformlar ise veri depolama güvenliği ve kamuya açık şeffaflık modelleri gibi özel amaçlara yönelik kullanılmıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, izinli ağlara duyulan güven, regülasyon uyumu ve kurumsal ölçekte yönetim kolaylığı, literatürde Hyperledger Fabric'in en sık tercih edilen platform olmasını sağlamıştır. Alternatif çözümler ise daha çok veri gizliliği, zincir dışı depolama ve merkeziyetsizlik düzeyi artırma gibi özel teknik gereksinimlere cevap verebilmek amacıyla tercih edilmiştir.

- **Hedeflenen Problemler**

İlaç tedarik zincirinde blok zincir tabanlı sistemlerin geliştirilmesinin temel motivasyonu, sahtecilik, izlenebilirlik eksikliği, veri güvenliği, yetkisiz müdahaleler ve soğuk zincir bozulmaları gibi yapısal problemlerin çözümüne katkı sağlamaktır. İncelenen çalışmalarda en sık karşılaşılan ve doğrudan hedeflenen sorun, sahte ilaçların tedarik zincirine girmesinin engellenmesi olmuştur. Bu amaç doğrultusunda geliştirilen modellerin önemli bir bölümü, ilaca özgü tanımlayıcılar (örn. Elektronik ürün kodu, QR kod, hologram, RFID) aracılığıyla ilacın kaynağının ve geçmişinin doğrulanmasını sağlayan kimlik ispatı ve sahiplik takibi mekanizmaları içermektedir.

Buna ek olarak, birçok çalışmada tüm ürün hareketlerinin zaman damgalı, izlenebilir ve doğrulanabilir şekilde kaydedilmesi hedeflenmiş; böylece hem sağlık otoriteleri hem de nihai kullanıcılar (hastalar) için uçtan uca şeffaf bir sistem önerilmiştir. Özellikle kamu kurumları ve regülasyon otoriteleri açısından değerlendirildiğinde, DSCSA gibi yasal düzenlemelerle uyum sağlamak da literatürde sıkça karşılaşılan bir hedef olarak öne çıkmaktadır.

Bazı sistemler ayrıca soğuk zincir güvenliği, klonlama saldırılarının önlenmesi, hasta güvenliği, geri çağırma süreçlerinin şeffaflaştırılması ve veri manipülasyonuna karşı koruma gibi daha özel problemlere odaklanmıştır. Bu yönüyle çalışmalar yalnızca üretimden dağıtıma kadar olan süreci değil, aynı zamanda son kullanıcıya ulaşan ilacın güvenliğini de sistemin bir parçası hâline getirmiştir.

Özetle, literatürde yer alan çalışmaların büyük çoğunluğu yalnızca veri kayıt altına alma düzeyinde değil, aynı zamanda sistemin işleyişini güvence altına alacak kurallar bütünü (otomatik sahiplik devri, akıllı sözleşmeli kontrat yönetimi, veri bütünlüğü testi) ile blok zincirin sunduğu olanakları hedeflenen sorunlara çözüm olarak uyarlamıştır.

- **Entegrasyon Yapılan Teknolojiler**

İncelenen çalışmalar, blok zincir altyapısını tek başına kullanmak yerine, çoğunlukla yardımcı teknolojilerle entegre ederek daha fonksiyonel ve güvenli sistemler geliştirmeyi hedeflemiştir. Özellikle IoT, yapay zekâ ve onun alt alanlarından makine öğrenimi, QR kod ve RFID tabanlı fiziksel izleme sistemleri, zincir dışı veri saklama çözümleri (özellikle IPFS) ve veri analitiği araçları (ElasticSearch, MongoDB, Python) en yaygın entegrasyon unsurları olarak öne çıkmaktadır.

IoT tabanlı sensörler (örneğin RFID, sıcaklık ölçer, lokasyon takip cihazları), fiziksel ilaç hareketlerinin gerçek zamanlı izlenmesini mümkün kılmakta; bu sensörlerden gelen veriler zincir üzerine yazılarak hem soğuk zincir güvenliği sağlanmakta hem de ürün takibinde uçtan uca görünürlük elde edilmektedir. Bazı modellerde, dağıtım sürecindeki her bir aşama, akıllı cihazlarla doğrulanabilir hâle getirilmiş ve bu doğrulamalar zincir kayıtlarına yansıtılmıştır.

Yapay zekâ ve makine öğrenimi tabanlı sistemler, genellikle öneri sistemleri, sınıflandırma algoritmaları ve kalite puanı tahminleme gibi amaçlarla entegre edilmiştir. Özellikle öneri tabanlı sistemlerde, hasta verisi ya da ilaç özellikleri analiz edilerek sahtecilik olasılığı veya uygun ilaç tavsiyesi yapılmıştır. Bu sistemlerin büyük çoğunluğunda, veri ön işleme ve anlamlandırma aşamalarında Terim Frekansı–Ters Doküman Frekansı (Term Frequency–Inverse Document Frequency – TF-IDF), Archimedes Optimizasyon Algoritması ve Kelime Vektörleştirme Yaklaşımı (Global Vectors for Word Representation – GloVe) gibi yöntemler kullanılarak akıllı ve bağlama duyarlı karar mekanizmaları geliştirilmiştir.

Veri saklama tarafında ise, IPFS, CouchDB, LevelDB gibi dağıtık veya yarı dağıtık veri depolama çözümleri, zincir üzerindeki veri yükünü azaltmak ve ölçeklenebilirliği artırmak amacıyla tercih edilmiştir. Özellikle büyük hacimli verilerin (örneğin klinik deney sonuçları, hasta geri bildirimleri) zincir dışında saklanması, zincir üzerinde ise sadece hash/kimlik gibi doğrulayıcıların tutulması sıkça önerilen bir yöntemdir.

Son olarak, geliştirilen sistemlere kimlik doğrulama ve güvenlik katmanları entegre edilerek hem kullanıcıların hem de işlem ve ürün bilgilerinin güvenilir biçimde doğrulanması sağlanmıştır. Bu kapsamda; hızlı kimlik okuma ve erişim için QR kodlar, ürün bazlı benzersiz tanımlama amacıyla Elektronik Ürün Kodu (Electronic Product Code – EPC), fiziksel güvenlik unsuru olarak hologram etiketler, dijital sertifikalama için X.509 standartları, yetkili erişim kontrolü için OAuth protokolü ve JSON Web Token gibi

kimlik taşıma yapıları kullanılmıştır. Ayrıca, TLS protokolü ile veri iletimi şifrelenmiş ve iletişim kanalı güvence altına alınmıştır. Bu çok katmanlı yapı sayesinde sistemlerin yalnızca teknik işlevleri değil, aynı zamanda kimlik doğrulama, yetkilendirme ve veri güvenliği açısından da bütünsel bir güvenlik çerçevesi sunduğu vurgulanmıştır.

- **Uygulama Düzeyleri**

Tabloda yer alan çalışmalar, blok zincir teknolojisinin ilaç tedarik zincirinde kullanımı açısından farklı uygulama derinliklerine ve teknik olgunluk düzeylerine sahiptir. Bu uygulama düzeyleri üç ana grupta toplanabilir: teorik öneri modelleri, prototip/simülasyon tabanlı sistemler ve tam uygulamalı test ortamlarıyla desteklenen sistemler.

En yaygın uygulama biçimi, gerçek veri kümeleri ya da yapılandırılmış senaryolarla test edilen simülasyon tabanlı prototiplerdir. Örneğin, sahte ilaçların önlenmesi amacıyla geliştirilen birçok sistem, QR kodlu izleme, zincir üstü sahiplik doğrulama ve sensör entegrasyonuyla desteklenmiş senaryolarla test edilmiştir. Özellikle öneri sistemleri ve AI temelli mimarilerde model başarımını değerlendirmek amacıyla University of California, Irvine (UCI) Makine Öğrenimi veri setleri sıklıkla kullanılmış; bu sistemlerin doğruluk oranları ve öneri başarımı ölçülerek yayınlanmıştır.

Gelişmiş test ortamlarına sahip bazı çalışmalar, Hyperledger Caliper gibi performans ölçüm araçlarıyla TPS, gecikme süresi, kaynak kullanımı gibi metrikler üzerinden sistemlerini analiz etmiş, farklı blok boyutları, organizasyon sayısı ve ağ topolojileri altında başarı düzeylerini karşılaştırmalı olarak sunmuştur. Bu yönüyle söz konusu sistemler, yalnızca işlevsellik değil, gerçek operasyonel koşullarda çalışabilirlik ve ölçeklenebilirlik açısından da değerli katkılar sunmaktadır.

Buna karşılık daha kavramsal nitelikte kalan bazı modeller, senaryo tanımları ve algoritma temelli protokoller önermekle birlikte, gerçek veri kullanımı ya da uygulama testlerine yer vermemektedir. Bu tür çalışmalar genellikle sistemin mantıksal işleyişine, rol tanımlarına ve güvenlik mimarilerine odaklanmakta; pratik uygulanabilirliğe dair somut çıktılar sunmamaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, incelenen literatürün büyük bölümü senaryo düzeyinde somutlaşan, işlevsel modülleri test edilmiş sistemlerden oluşmaktadır. Bununla birlikte, gerçek zamanlı saha uygulamalarının ve klinik sistem

entegrasyonlarının sınırlı sayıda olması, bu alandaki en önemli araştırma boşluklarından biri olarak görülmektedir.

- **Sistem Katkıları ve Özgün Yönler**

Literatürde yer alan çalışmalarda blok zincir tabanlı sistemlerin ilaç tedarik zincirine sunduğu katkılar, yalnızca teknik işlevsellik ile sınırlı kalmamakta; aynı zamanda kamu sağlığı, regülasyon uyumu, hasta güvenliği ve kurumsal şeffaflık gibi çok boyutlu çıktılar üretmektedir.

Birçok sistem, sahte ilaçların tedarik zincirine sızmasını önlemek amacıyla kimlik doğrulama, sahiplik takibi ve işlem geçmişinin değiştirilmeden kaydedilmesi gibi temel katkılar sunmaktadır. Bu sistemlerde ilaçlar üretici tarafından kaydedilirken, sonraki tüm aktarımlar izlenebilir hâle getirilmiş; özellikle akıllı sözleşmeler aracılığıyla sahiplik devri ve ödeme işlemleri eşzamanlı hale getirilerek sahtecilik riski azaltılmıştır.

Bazı modeller, hastaların doğrudan sistemle etkileşime geçmesini sağlayarak blok zinciri yalnızca kurumsal düzeyde değil, son kullanıcı düzeyinde de işlevsel hâle getirmiştir. Özellikle QR kod, mobil uygulama ya da web arayüzleri üzerinden ilaç geçmişini kontrol edebilme imkânı, kullanıcı güveni ve hasta bilgilendirmesi açısından önemli bir yenilik olarak değerlendirilmelidir.

Ayrıca geri çağırma, öneri, kalite kontrol, doz ayarı, klinik karar destek gibi işlevsel modüllerle entegre edilen sistemler, klasik izlenebilirlik ötesine geçerek ilaç yaşam döngüsünün tamamına entegre çözümler sunmaktadır. Bazı sistemler, aşı tedariki, klinik deney veri yönetimi, hasta merkezli veri paylaşımı gibi niş konularda yüksek derecede özelleştirilmiş çözümler önererek literatüre özgün katkılar sunmuştur.

Öte yandan, yüksek işlem kapasitesi, düşük gecikme süresi ve kaynak verimliliği gibi performans kriterleri üzerinden test edilmiş sistemler, yalnızca konsept düzeyinde değil, aynı zamanda gerçek operasyonel geçerlilik düzeyinde de değerli bulgular sağlamaktadır. Bu sistemlerin büyük çoğunluğu Hyperledger Fabric altyapısını kullanmakla birlikte, özellikle IPFS, Caliper, Composer ve IoT bileşenleriyle birlikte kullanıldığında tam entegre ve ölçeklenebilir sistem mimarileri ortaya koyabilmiştir. Sonuç olarak, tabloda yer alan çalışmalar, hem mevcut sistemlerin hangi eksiklerini gidermeyi hedeflediğini hem de gelecekteki uygulamalara yön verebilecek teknik ve yönetsel katkıları başarılı

şekilde ortaya koymaktadır. Ancak saha uygulamaları, kullanıcı deneyimi analizi ve yasal uyum testleri gibi alanlarda hâlâ genişletilmeye açık bir araştırma potansiyeli mevcuttur.

- **SCRM Odaklı Literatür Katkıları**

İncelenen akademik çalışmalarda blok zincir teknolojisinin sunduğu teknik olanakların ötesinde, tedarik zinciri risklerinin yönetimi açısından da belirgin katkılar sağladığı gözlemlenmektedir. Bu katkılar, literatürde üç temel kavramsal düzeyde öne çıkmaktadır: kırılganlıkların azaltılması, dirençliliğin artırılması ve sistem dayanıklılığının güçlendirilmesi.

Kırılganlıkların azaltılmasına yönelik katkılar, özellikle sahtecilik, yetkisiz erişim, veri tutarsızlığı ve merkezi yapı bağımlılığı gibi yapısal risklere karşı geliştirilen çözümler aracılığıyla sunulmaktadır. Kimlik doğrulama, sahiplik takibi, zincir dışı güvenli veri saklama ve erişim kontrolü gibi mekanizmalar, sistemin dışsal tehditlere karşı daha az hassas olmasını sağlamaktadır.

Dirençliliği artıran çözümler, sistemin beklenmeyen durumlar karşısında kendini yeniden organize edebilme, alternatif yollarla işlemi sürdürebilme ve kriz yönetimi senaryolarına uygun hareket edebilme kapasitesiyle ilgilidir. Bu kapsamda geliştirilen ilaç geri çağırma sistemleri, öneri algoritmaları, şüpheli işlem uyarı sistemleri ve akıllı sözleşme temelli müdahale mekanizmaları, literatürde dikkat çeken uygulamalar arasında yer almaktadır.

Sistem dayanıklılığına yönelik katkılar ise uzun vadeli performansın sürdürülebilirliği, büyük veri yükü altında bozulmayan işlem güvenliği, düşük gecikme süreleri ve yüksek eşzamanlı işlem kapasitesi gibi yapısal ölçütlerle ilişkilidir. Hyperledger Caliper gibi performans analiz araçlarıyla test edilen sistemlerde, işlem başına maliyet, işlem gecikme süresi ve sistem tepkime zamanları gibi göstergeler üzerinden elde edilen çıktılar, blok zincirin tedarik zinciri süreçlerinde güvenilir ve sürdürülebilir bir altyapı sağlayabileceğini ortaya koymaktadır.

İlaç sektörü odağında gerçekleştirilen bu literatür analizi, blok zincir teknolojisinin yüksek düzenlemeye tabi, hassas ve çok aktörlü bir tedarik yapısında ne ölçüde işlevsel ve esnek çözümler sunabildiğini ortaya koymuştur. İncelenen 30 çalışma, izlenebilirlik, sahtecilik önleme, öneri sistemleri ve güvenli veri paylaşımı gibi alanlarda önemli ilerlemeler sağlandığını göstermektedir. Bu sistemlerin önemli bir bölümü Hyperledger Fabric altyapısını kullanmakla birlikte, Ethereum, IPFS, Gcoin ve diğer alternatif

çözümlerle de desteklenen farklı mimariler mevcuttur. Özellikle akıllı sözleşmeler, IoT entegrasyonu, QR kod ve öneri algoritmaları ile zenginleştirilen modellerin, sektöre hem teknik hem de yönetişimsel düzeyde yenilik getirdiği görülmektedir.

Analiz edilen çalışmalarda blok zincir uygulamaları genellikle sahtecilik ve izlenebilirlik gibi alanlarda etkili çözümler sunmakta, ancak bu çözümler çoğunlukla laboratuvar düzeyinde test edilen prototiplerle sınırlı kalmaktadır. Hyperledger Fabric'in yüksek tercih oranı, kurumsal gereksinimlere yanıt verdiğini gösterirken; regülasyon uyumluluğu, klinik süreçlerle entegrasyon ve hasta merkezli uygulamaların hâlen gelişime açık olduğu dikkat çekmektedir. Gerçek saha uygulamaları azınlıkta olup, çoğu sistem öneri veya simülasyon düzeyinde kalmıştır. Yine de IPFS, Caliper, IoT ve AI entegrasyonlarıyla desteklenen projeler; sadece teknik değil, aynı zamanda yönetişimsel düzeyde de gelecek vaat etmektedir. Literatür, teknolojik olgunluk açısından çeşitlilik içerse de klinik bağlamda sürdürülebilir ve denetlenebilir sistemlere geçiş için daha fazla saha verisine ihtiyaç duyulduğu açıktır.

Bu noktada, blok zincir teknolojisinin yalnızca ilaç sektörüyle sınırlı kalmadığı, gıda, tarım, otomotiv, tekstil gibi farklı sektörlerde de benzer yapısal sorunlara çözüm üretmek amacıyla uygulandığı görülmektedir. İzleyen alt bölümde, bu sektörlerde yürütülen akademik çalışmalar analiz edilerek; platform tercihleri, uygulama düzeyleri ve sektörlere özgü ihtiyaçlar doğrultusunda karşılaştırmalı bir değerlendirme sunulacaktır.

6.3. Diğer Sektörlere Yönelik Yapılan Çalışmalar

Blok zincir teknolojisinin sunduğu izlenebilirlik, şeffaflık, güvenlik ve veri bütünlüğü gibi temel avantajlar, yalnızca ilaç tedarik zinciriyle sınırlı kalmamakta; gıda, tarım, otomotiv, tekstil, elektronik, savunma ve enerji gibi çok çeşitli sektörlerde de giderek artan bir şekilde uygulanmaktadır. Bu sektörlerdeki tedarik zincirleri, çoğu zaman karmaşık, çok aktörlü ve yüksek güven gerektiren yapılardır. Özellikle son yıllarda artan sahtecilik vakaları, kalite güvencesi eksiklikleri ve sürdürülebilirlik baskıları, blok zincirin geleneksel sistemlere alternatif olarak değerlendirilmesine yol açmıştır.

Tablo 6.2, ilaç sektörü dışındaki alanlarda yürütülen blok zincir temelli tedarik zinciri uygulamalarını konu alan ve literatürde öne çıkan 30 akademik çalışmanın sistematik analizine dayanmaktadır. Çalışmalar; kullanılan platformlar, hedeflenen sorunlar, teknik bileşenler, entegre edilen teknolojiler ve sistemlerin sunduğu katkılar açısından karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmiştir. Bu analiz, blok zincir teknolojisinin yalnızca

ilaç tedarik zinciriyle sınırlı kalmadığını; gıda, tarım, otomotiv, enerji, savunma, tekstil ve biyomedikal gibi çok çeşitli sektörlerde farklı ihtiyaçlara cevap verebilecek şekilde uyarlandığını göstermektedir.

Tablo 6.2. *Diğer sektörlerde öne çıkan blok zincir çalışmaları*

Yazar(lar) / Alan	Kullanılan Platform	Amaç	Öne Çıkan Özellikler	Sonuçlar ve Katkılar
Ismail vd. (2024) / **Balık**	Ethereum	Balık Tedarik Zincirinde Kalite, Tür Doğruluğu ve İzlenebilirliği Sağlamak, Sahteciliği Önlemek	- 3 Katmanlı Mimari (Iot, Blockchain, Uygulama) - QAT Cihazıyla %98 Tür Tanıma, %94 Tazelik Ölçümü - 6 Akıllı Sözleşme, QR/RFID Takip	- Tür Sahteciliğini Engelleyen Yapay Zekâ - Şeffaf ve Merkeziyetsiz Kayıt - Maliyet ve Performans Analizi
Tsai ve Shen (2024) / **Çiçek**	Ethereum	Çiçek Tedarik Zincirinde İzlenebilirlik, Kalite Kontrolü ve Ödeme Süreçlerini Otomatikleştirmek	- IPFS ile Ürün Görseli Saklama - MQTT Sensör Verisi, İhlal Anında Geri Ödeme - Slither Güvenlik Analizi	- Normal İşlem Maliyeti Yaklaşık 17 USD, İhlalde 19.37 USD - İzlenebilirlik ve Güvenlikte Geleneksel Yöntemlerden Üstün - Esneklik/Piyasa Benimsemesi Sınırlı
Ligar vd., (2024) / **Kahve**	Ethereum	Java Preanger Arabica Kahvesi Tedarik Zincirinde İzlenebilirlik Sağlamak ve Kahve Çekirdeklerinin Kalitesini Doğrulamak	- Yolov5m ile %99+ Başarıda Kalite Sınıflandırması - QR Kod + Blockchain Entegrasyonu - Hasat–İşleme–İhracat Aşamalarında TZ	- Değiştirilemez İşlem Geçmişi - %98+ Doğrulukla Sistem Testleri - Üreticiden Tüketiciye Uçtan Uca Dijitalleşme
Omar vd., (2024) / **Konaklama Sektörü**	Ethereum	Otel, Restoran ve Kafe Gibi Konaklama İşletmelerinde Gıda Atığını Azaltarak Sürdürülebilirlik Sağlamak	- 4 Akıllı Sözleşme (Kayıt, Sipariş, FB Retailer, Atık Değerlendirme) - IPFS Off-Chain Veri - Ceza/Ödüllendirme Algoritmaları	- Atık ve Bağış Süreçlerinde Zincir Üstü Şeffaflık - Otomatik Ceza Uygulaması - Güvenlik Analizleriyle Yüksek Bütünlük
Kumar vd., (2024) / **Kan**	Hyperledger Fabric + Ethereum	Kan Tedarik Zincirinde İzlenebilirlik, Güvenlik ve Kalite Kontrol Sağlayarak Kan İsrafını Azaltmak	- QR Kodla Kan Verisi, Sıcaklık Sensörleri - Akıllı Sözleşmeler, Şifreli Erişim - Bağışçıdan Hastaya Uçtan Uca Takip	- Bozulma Riski Azaltılmış, Gerçek Zamanlı Uyarı Sistemi - Veri Güvenliği Yüksek - Uçtan Uca Dijitalleşme ile Kan İsrafını Önleme
Dai vd., (2024) / **Tehlikeli Madde**	Hyperledger Fabric	Tehlikeli Madde Tedarik Zincirinde Güvenli Veri Erişimi ve İzlenebilirlik Sağlamak	- Txset Tabanlı İşlem Kümeleri - Zincir Kodla Rol Tabanlı Erişim - Dağıtık Transaction Coordinator	- 214 TPS, Yüksek Eşzamanlılıkta Kararlı - Geleneksel İki Aşamalı Mutabakat Protokollerine Göre Düşük Gecikme, Yüksek İşlem Verimliliği - Artan Güvenlik ve Erişim Kontrolü
Sharma vd., (2024) / **E Atık Yönetimi**	Ethereum	Iot Destekli E-Atık İzleme Sisteminde Gizlilik, Güvenlik ve İşlem Performansını Artırmak	- PBFT + Davranış/Performansa Dayalı İtibar - Dinamik Grup Yapısı, IPFS - 5 Farklı Sözleşme (Kayıt, Sipariş, Atık Yönetimi, İhale, Veri İmha)	- 2000 TPS'e Kadar Hız, Düşük Gecikme - Veri Silme Sertifikası Entegrasyonu - Geleneksel PBFT'ye Kıyasla Önemli Performans Avantajları
Rahaman vd., (2024) / **Gıda İşleme**	Hyperledger Fabric	Gıda İşleme Tedarik Zincirinde Sürdürülebilirlik, Güvenlik ve İzlenebilirlik Sağlamak	- Özel İzinli Ağ, MSP Kimlik Yönetimi - TLS, ZKP, Homomorfik Şifreleme - Akıllı Sözleşmelerle Süreç Otomasyonu	- Uçtan Uca Şeffaflık ve Güvenlik - Sahteciliğe Karşı Direnç - Tüketici Güvenini Artıran İzlenebilirlik
Nowvaratkoolchai vd., (2024) / **Kenevir**	Özel Blok Zincir (Polygon)	Tayland'daki Medikal Kenevir Tedarik Zincirinde İzlenebilirliği, Güvenliği ve Şeffaflığı Sağlamak	- 4 Katmanlı Mimari (TZ, API, İzlenebilirlik, BZ) - Cantrak Tabanlı Kayıt, 5 Akıllı Algoritma - Gaz/Hız Analizi, Ceza Mekanizması	- Hash ID + Zaman Damgasıyla Uçtan Uca Takip - Polygon ile Yüksek Ölçeklenebilirlik, Düşük Maliyet - Yıllık Max ~2946 USD İşlem Gideri, Gelenekselden Üstün
Chen vd., (2023) / **Çay**	Hyperledger Fabric + Caliper	Çay Tedarik Zincirinde Üretim Verilerinin Sahteciliğe Karşı İzlenmesi ve Doğrulanması	- ECDSA, IPFS, Merkle Tree Bütünlüğü - Caliper ile Performans Analizi - Zaman Damgası ve QR Kodlu Takip	- 5000 İşlemde 3930 TPS - Yazma Gecikmesi Max 6.26 S - Veri Bütünlüğü ve Gizlilikte Yüksek Dayanıklılık

Tablo 6.2. *Diğer sektörlerde öne çıkan blok zincir çalışmaları (devamı)*

Yazar(lar) / Alan	Kullanılan Platform	Amaç	Öne Çıkan Özellikler	Sonuçlar ve Katkılar
Xue ve Li (2023) / **Meyve Sebze**	Hyperledger Fabric	Meyve-Sebze Tedarik Zincirinde Yüksek Verimli, Güvenli ve Ölçeklenebilir İzlenebilirlik Sistemi Geliştirmek	- Çok Katmanlı Mimari, Alt Zincir Modeli - Geliştirilmiş Kafka Algoritması - 6 Katmanlı Sistem, 10.000+ Kayıt Testleri	- Tek Zincirli Modellere Göre %90 Daha Hızlı Sorgu - 3 Node Çökse Bile Sistem Kararlı - Yüksek Ölçeklenebilirlik ve Güvenilirlik
Zhang vd., (2023) / **Geri Dönüşüm**	Hyperledger Fabric	Atık Güç Pillerinin İzlenebilir, Güvenli ve Şeffaf Geri Dönüşüm Sürecini Sağlamak	- 4 Katmanlı Mimari - Özel + Federasyon Zinciri - RFID/QR/Bluetooth Destekli Takip	- Çift Zincirle Önemli Ölçüde Artan İşlem Kapasitesi ve Azalan Gecikme - Anlık Gözetim ve Doğruluk - Geri Dönüşüm Süreçlerinde Ölçeklenebilir Şeffaflık
Chen vd., (2023) / **İçecek**	Hyperledger Fabric + Caliper	Alkol Ürünlerinin Üretimden Tüketime Kadar Yasa Dışı Girişlerini Önleyerek Şeffaf, Denetlenebilir ve Güvenli Bir Tedarik Zinciri Yönetimi Sağlamak	- Raft Mutabakatı, ECDSA İmza - IPFS Benzeri Zincir Dışı Yapı - Caliper ile Performans Testleri	- Tüm Aktörler İçin İşlem Bütünlüğü ve Denetim - Tekrar Oynatma Saldırılarına Karşı Korumalı - Şeffaf, Denetlenebilir Alkollü Ürün Zinciri
Farooq vd., (2023) / **Pirinç**	Ethereum + ERC20 Token (Rice Coin)	Pirinç Tedarik Zincirinde İzlenebilirlik, Şeffaflık, Güvenlik ve Fiyat İstikrarını Sağlamak	- Rice Coin (RC) ile Token Ödeme - IPFS'te Şifreli Veri - 8 Katmanlı Sistem, ICO + Dijital Cüzdan	- Blok Süresi 0.035 Dk, 60 TPS Kapasitesi - İşlem Başı ~0.35 USD Maliyet - Günde 14,29 Milyon İşlem, Düşük Gecikme
Alsadi vd., (2023) / **Otomotiv**	Hyperledger Besu	Otonom Araç Tedarik Zincirinde Ürün Sertifikasyonunu Şeffaf, İzlenebilir ve Güvenilir Hale Getirmek	- 3 Aşamalı İzleme: Onboarding, Transit, Handover - IPFS ile Belge Saklama, Poa Konsensüs - Oracle ve Web Arayüz	- %100 İzlenebilirlik, 6 Sn Blok Süresi - Maliyet 0.56–1.90 USD - Slither Güvenlik Testlerini Hatasız Geçmiş
Ekawati vd., (2023) / **Şeker**	Ethereum	Beyaz Şeker Tedarik Zincirinde İşlem Kayıtlarının İzlenebilirliğini Artırmak, Şeffaflığı ve Veri Bütünlüğünü Sağlamak	- QR Kod ile Ürün Takibi - Etherscan Entegrasyonu, Black-Box Test - SDLC Waterfall Yöntemi	- Ropsten'de 12 TPS ile Test - Hash Koduyla Ürün Geçmişine Erişim - Ulusal Çapta Örnek Blok Zincir Uygulaması
Das vd., (2023) /**Akıllı Şehir**	Ethereum + Hyperledger Caliper	Akıllı Şehirler İçin Tarımsal Ürünlerin İzlenebilirliği, Güvenliği ve Şeffaflığını Sağlayan Blok Zincir Tabanlı Gıda Tedarik Sistemi Oluşturmak	- 5 Aktörlü Model (Çiftçi, Üretici, Dağıtıcı, Perakendeci, Tüketici) - Güvenilirlik Puanı Algoritması - Caliper Performans Ölçümü	- 0 Hata ile 550 İşlem - %100 Doğruluklu Sipariş/Geri Bildirim - 0.23–34 Sn Arası Gecikme, Güvenilirlik ve Ölçeklenebilirlikte İyileşme
Naveen vd., (2022) / **Çay Tozu**	Hyperledger Fabric	Çay Tozu Tedarik Zincirinde İzlenebilirliği Artırmak ve Sahteciliğe Karşı Güvenli, Merkeziyetsiz Bir Sistem Oluşturmak	- Akıllı Sözleşme Bazlı Otomasyon - Dijital Kimlik ve MSP Doğrulama - Dağıtılmış İşlem Yönetimi	- Merkeziyetsiz, Güvenilir Kayıt Yapısı - Tüm Aşamalarda Şeffaflık - Güvenlik ve Entegrasyonda Üstün Performans
Centobelli vd., (2022) / **Döngüsel TZ**	Hyperledger Fabric	Döngüsel Tedarik Zincirinde Geri Dönüşüm, Yeniden Üretim ve Yeniden Dağıtım Süreçlerinde Güven, İzlenebilirlik ve Şeffaflığı Artırmak	- Özel Kanallar, Varlık-Tabanlı İzin Yönetimi - Atık/Geri Dönüşüm Odaklı Akıllı Sözleşmeler - Hem Yatay Hem Dikey Entegrasyon	- Veri Paylaşımının Senkronizasyonu - Denetlenebilir Atık/ Belge Hareketleri - Merkezi Aktörlere Bağımlılığı Azaltan Güven Mekanizması
Chu ve Pham (2022 / **Kaju**	Hyperledger	Vietnam Kaju Tedarik Zincirindeki Dikey Koordinasyon Sorunlarını Blockchain Temelli Çözümle Yönetmek	- 5 Koordinasyon Mekanizması - Sensör ve Mobil Cihazlarla İzleme - Çiftlikten Tüketiciye Aşamalı Süreç	- Küçük Çiftçiler İçin Artan Pazarlık Gücü - Bilgi Eşitsizliği Azalması, İşlem Maliyetlerinde Düşüş - Şeffaflık ve Güven Artışı
Patro vd., (2022) / **Deniz Ürünleri**	Private Ethereum	Deniz Ürünleri Tedarik Zincirinde Hem Çiftlik Hem Deniz Balıkların Uçtan Uca İzlenebilirliğini Sağlamak	- Farmed/Wild Fish Sözleşmeleri - PCR-DNA Test + IPFS Genetik Veri - Smartcheck ve Oyente Güvenlik Analizi	- Tür Sahteciliği PCR ile Önleniyor - 5 TZ Üyesi ile Otomasyon - Şifreli Belge Yönetimi, Şeffaf ve Güvenilir Bir Tedarik Zinciri

Tablo 6.2. *Diğer sektörlerde öne çıkan blok zincir çalışmaları (devamı)*

Yazar(lar) / Alan	Kullanılan Platform	Amaç	Öne Çıkan Özellikler	Sonuçlar ve Katkılar
Chen vd. (2022) / **Otomotiv**	Hyperledger Fabric	Araç ve Yedek Parça Tedarik Zincirinde Sahteciliği Önlemek, Güvenliği Artırmak ve İzlenebilirliği Sağlamak	- 7 Aktörlü Federatif Zincir - Parça/Araç Yaşam Döngüsü Takibi - Zaman Damgası + Şifreli İletişim	- Sahte Parça ve Saldırılara Karşı Koruma - Tüm Aktörlerin Kimlikli/İzlenebilir İşlemleri - Otomotiv Sektöründe Değiştirilemez Parça Doğrulama Sistemi
Khanna vd., (2022) / **Süt**	Ethereum	Hindistan Süt Sektöründe Sahteciliği Önlemek, İzlenebilirliği Artırmak ve Ürün Kalitesini Korumak	- 4 Katmanlı Mimari (Fazlar, İzlenebilirlik, BC, Uygulama) - Ürün-Bazlı QR Kodlar, Otomatik Ödeme - Kirletici Tespiti, ML ile Satış Tahmini	- Sahte Satıcılar TZ ile Zincir Dışına Atılıyor - Besin Değerleri ve Kalite Koruması - 10'dan Fazla TZ Üyesi ile Sürdürülebilir Gıda Yönetimi
Bettín-Díaz, (2022) / **Kahve**	Hyperledger Fabric	Kolombiya Menşeili Kahve Üretiminde Her Aşamanın İzlenmesi ve Tüketiciye Ürünün Gerçekliğinin Güvenceyle Sunulması	- 10 Adımlı Metodoloji, 4 Katmanlı Mimari - Ürün + Sipariş Bazlı TZ - Zincir İçi/Dışı Veri Ayrımı, Denetleyici Modül	- Tüm Üretim Süreci Zaman Damgasıyla Kayıt - Hyperledger Üzerinde Çalışabilir Poc - Çiftlik → Fabrika → Müşteri Hattında Güvenli Dijital Yapı
Srivastava ve Desai (2021) / **Gıda**	Hyperledger Fabric + Caliper	Gıda Tedarik Zincirinde İzlenebilirlik Sağlamak ve HLF Platformunun Performansını (TPS, Gecikme, Ölçeklenebilirlik) Analiz Etmek	- Execute-Order-Validate Modeli - Couchdb, Solo Konsensüs - Google Cloud Üzerinde Caliper Testi	- 955 TPS ve 150 Ms Gecikme - 6 Organizasyona Kadar Ölçeklenebilir - Fabric'in Gıda İzlenebilirliği İçin Uygunluğu Deneysel Olarak Kanıtlanmıştır
Amin vd., (2021) / **Biyomedikal**	Hyperledger Fabric	Biyomedikal Mühendisliği Tedarik Zincirinde Veri Güvenliği ve İzlenebilirlik Sağlamak	- Çoklu Kanal, Caliper Performans Ölçümü - Execute-Order-Validate Modeli - Ethereum'la Karşılaştırmalı Analiz	- 500 İşlemde 309 TPS - Ethereum'a Göre %65 Düşük Gecikme - Sağlık Sektörüne Uyumlu Yüksek Güvenlik
Ahmad vd., (2021) / **Askeri ve Savunma**	Hyperledger Fabric + Ethereum	Havacılık ve Savunma Sektöründe Lojistik Süreçleri Güvenli, İzlenebilir ve Denetlenebilir Hale Getirmek	- Iot Tabanlı Çok Katmanlı Mimari - Asimetrik Şifreleme ile Kimlik Yönetimi - Özel Kanallar ve İzinli Blok Zinciri Altyapısı - IPFS ile Büyük Boyutlu Veri Depolama	- Şeffaf, Değiştirilemez ve Denetlenebilir Kayıtlar - Askeri Operasyonlarda Etkin Koordinasyon ve Gerçek Zamanlı İzlenebilirlik - Siber Saldırılara Karşı Dayanıklı Altyapı
Chen vd., (2021) / **Tekstil**	Hyperledger Fabric	Marka Giyim Sektöründe Sahteciliği Önlemek ve Tüm Tedarik Zinciri Boyunca Ürünün Üretim Bilgilerini İzlenebilir Hale Getirmek	- ECDSA Dijital İmza, Federatif Zincir - BAN Mantığı ile Karşılıklı Kimlik Doğrulama - Mobil Dapp ile Kullanıcı Sorgusu	- Şifreli, Değiştirilemez Kayıt - Ürün Doğrulamasını Kullanıcı Yapabiliyor - Sahtecilikle Mücadelede 3. Taraf Denetim
Haque vd., (2021) / **Petrol**	Ethereum + Özel Blok Zincir	Petrol Tedarik Zincirinde Sahteciliği Önlemek, Kalite Denetimi Sağlamak, Tersine İzlenebilirliği ve Şeffaflığı Artırmak	- 6 Aktörlü Zincir - Iot Sıcaklık/Basınç Takibi, RFID Doğrulama - Remix IDE + Gas Analizli Prototip	- Gerçek Zamanlı İhlal Tespiti, Şifreli Veri Paylaşımı - Sahte Ürün Giriş Engeli - Düşük Maliyetli, Endüstriyel Düzeyde Prototip
Shahid vd., (2020) / **Tarımsal Gıda**	Ethereum	Tarımsal Gıda Tedarik Zincirinde Uçtan Uca İzlenebilirlik, Güvenli Veri Saklama ve Taraflar Arası Güvenin Sağlanması	- IPFS ile Dış Veri Depolama - İtibar Sistemi, Otomatik Ödeme - ECDSA İmzalı İşlemler	- Tam İzlenebilirlik ve Hesap Verebilirlik - Veri Manipülasyonu Engeli - Taraflar Arasında Güven Artışı

Bu çalışma kapsamında analiz edilen diğer sektörlere yönelik 30 akademik makale, blok zincir teknolojisinin ilaç dışındaki alanlarda da nasıl uyarlanabildiğini ve bu teknolojinin sektörel dinamiklere göre nasıl çeşitlendirildiğini bütüncül bir bakış açısıyla ortaya koymaktadır. Gıda, tarım, otomotiv, tekstil, elektronik, sağlık, savunma, enerji, atık yönetimi gibi farklı alanlarda yapılan uygulamalar, ortak olarak izlenebilirlik, sahtecilik önleme, kalite güvencesi, işlem doğruluğu, veri gizliliği ve operasyonel şeffaflık gibi amaçlara yönelmiş; ancak kullanılan teknoloji bileşenleri, uygulama senaryoları ve katkı düzeyleri sektörün yapısal ihtiyaçlarına göre şekillenmiştir.

İncelenen çalışmalarda Hyperledger Fabric yine en sık kullanılan platform olarak öne çıkarken, Ethereum, IPFS ve bazı özel konsensüs algoritmalarıyla tasarlanmış blok zincir çözümleri de çeşitli bağlamlarda tercih edilmiştir. Özellikle IoT destekli sistemler, akıllı sözleşmeler, QR/RFID etiketleme, IPFS ile zincir dışı veri yönetimi, AI tabanlı kalite analizi, token destekli ekonomik modeller ve çok zincirli mimariler, farklı sektörlerde işlevselliği artırmak amacıyla yoğun olarak entegre edilmiştir.

Literatürde yer alan bu çözümlerin önemli bir kısmı, sadece izlenebilirliği değil; aynı zamanda gerçek zamanlı veri paylaşımı, otomatik denetim, ceza-ödül mekanizmaları, kullanıcı doğrulama sistemleri, ürün kalitesi belgelendirmesi, geri dönüşüm yönetimi, sürdürülebilirlik izleme gibi modüllerle zenginleştirilmiş; böylece blok zincirin operasyonel faydaları farklı sektörlerin ihtiyaçlarına göre genişletilmiştir. Bu bağlamda aşağıda maddeler halinde sunulan analizler, söz konusu çalışmaların sunduğu mimari çözümleri, entegre edilen teknolojileri ve sektör bazlı katkılarını sistematik olarak değerlendirmektedir.

- **Platform Tercihleri**

İlaç sektörü dışında kalan gıda, tarım, otomotiv, enerji, tekstil, sağlık, moda, e-atık ve hizmet gibi çeşitli sektörlerde blok zincir uygulamaları incelendiğinde, literatürde iki ana eğilimin öne çıktığı görülmektedir: (i) Hyperledger Fabric gibi izinli blok zincir mimarilerine dayanan sistemler ve (ii) Ethereum ve benzeri açık, akıllı sözleşme destekli platformlara dayalı sistemler. Özellikle Hyperledger Fabric; güvenlik, rol tabanlı erişim, işlem hızı ve esnek yapılandırma avantajları nedeniyle özellikle gıda, otomotiv, kimyasal madde ve sağlık gibi düzenlemeye açık alanlarda yaygın olarak tercih edilmiştir.

Diğer yandan, Ethereum tabanlı sistemler ise daha çok tarım, perakende, moda ve tüketiciye doğrudan dokunan senaryolarda öne çıkmıştır. Bu sistemlerin öne çıkan

özelliği, şeffaflığı maksimum düzeye çıkararak kamuya açık doğrulama, dijital token yönetimi, NFT'li ürün tanımı ve IPFS ile belge saklama gibi işlevleri kolaylaştırmasıdır. Bununla birlikte, Ethereum'un yüksek gaz ücretleri ve sınırlı ölçeklenebilirliği bazı sistemlerde performans sınırlamalarına neden olmuştur. Bu nedenle bazı projelerde Ethereum yalnızca kayıt katmanı olarak tercih edilmiş; veri yükü ise IPFS, QR kod sistemleri veya dış bağlantı katmanları ile optimize edilmiştir.

Buna ek olarak Hyperledger Besu, Sawtooth, özel Ethereum ağları, izinli dış veri kaynağı entegrasyonuna sahip zincirler ve çift zincirli mimariler gibi çeşitli alternatif platformların da tercih edildiği görülmektedir. Özellikle Besu tabanlı uygulamalarda veri gizliliği ve farklı sistemler arasında birlikte çalışabilirlik ön planda tutulmuş; IoT ve gerçek zamanlı veri işleyen sektörlerde yük dengeleyici protokoller ve paralel zincir yapıları önerilmiştir. Çalışmalarda ayrıca, verimli ve uygulanabilir Bizans konsensüsüne dayalı bir itibar mekanizması (Efficient Practical Byzantine Consensus-Based Reputation – EPBCR), ZKP ve eliptik eğri dijital imza algoritması (Elliptic Curve Digital Signature Algorithm – ECDSA) gibi ileri düzey kriptografik çözümlerin entegrasyonu sayesinde, bu platformların yalnızca veri kaydı yapan yapılar değil, aynı zamanda yüksek güvenlik gereksinimlerini karşılayan dağıtık güvenlik altyapıları olarak da işlev gördüğü vurgulanmaktadır.

Sonuç olarak, diğer sektörlerdeki çalışmalar, blok zincir platformu tercihinde "kimin erişeceği" ve "ne kadar veri işleneceği" sorularına yanıt veren bir yapı benimsemiştir. Regülasyon uyumu gerektiren sektörlerde Hyperledger tercih edilirken, açık şeffaf doğrulama ve geniş kullanıcı etkileşimi gerektiren alanlarda ise Ethereum ve hibrit modeller ön plana çıkmaktadır.

- **Hedeflenen Problemler**

Diğer sektörlerde gerçekleştirilen blok zincir temelli tedarik zinciri uygulamalarının büyük bölümü, geleneksel sistemlerin çözüm üretemediği izlenebilirlik eksikliği, sahtecilik, veri bütünlüğü sorunları, düşük tedarik güveni, gerçek zamanlı kontrol yetersizliği, manipülasyona açık kayıt sistemleri ve işlem şeffaflığı eksikliği gibi temel problemleri çözmeyi amaçlamaktadır. Özellikle gıda, tarım ve sağlık gibi sektörlerde ürünlerin bozulabilirliği, taşıma koşullarının kontrol edilememesi ve üretici–tüketici arasındaki bilgi asimetrisi ön plana çıkan sorunlar arasında yer almıştır.

Gıda ve tarım sektörlerinde blok zincir kullanımı, çoğunlukla ürünün kaynağının doğrulanması (örneğin organik üretim), soğuk zincir ihlallerinin tespiti, kalite kontrol belgelerinin doğruluğu, ürün tazeliğinin takibi ve tüketici güveninin artırılması amaçlarına hizmet etmektedir. Balık, çay, kahve, pirinç, çiçek ve şeker gibi ürün gruplarında gerçekleştirilen uygulamalarda, özellikle hasat–işleme–paketleme–dağıtım–satış adımlarındaki veri eksikliklerinin önüne geçilmesi hedeflenmiştir.

Enerji ve elektronik atık yönetimi gibi alanlarda ise hedeflenen başlıca problemler; kullanıcı kimliği tespiti, cihaz yaşam döngüsü takibi, geri dönüşüm süreçlerinin sahteciliğe kapalı biçimde yürütülmesi ve yasal uygunluğun dijital olarak doğrulanabilmesi şeklinde öne çıkmıştır.

Sağlık ve biyomedikal sektöründeki örneklerde; kan saklama koşullarının bozulması, COVID-19 gibi salgınlara yönelik izleme mekanizmaları, biyomedikal ürünlerin geri çağırılabilirliği ve klinik veri şeffaflığı gibi risklerin giderilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca bazı sistemlerde PCR test sonuçlarının blok zincire işlenmesi gibi yüksek doğruluk ve biyolojik güvenlik içeren uygulamalara yer verilmiştir.

Otomotiv, moda, savunma, kimyasal madde ve hizmet sektörü örneklerinde ise sahte yedek parça kullanımı, ürün belgelerinin değiştirilmesi, yetkisiz işlem girişimi, karbon ayak izi takibi, askeri mühimmatın izinsiz değişimi gibi durumlar sistematik olarak tespit edilmeye çalışılmıştır.

Bu kapsamda, literatürde ele alınan sistemlerin temel hedefi yalnızca veri depolamak değil, aynı zamanda verinin güvenliğini sağlamak, erişim izinlerini yönetmek, işlem bütünlüğünü garanti altına almak ve ilgili paydaşlara senaryo bazlı kontrol olanağı sunmak olmuştur.

- **Entegrasyon Yapılan Teknolojiler**

İlaç sektörü dışında yapılan çalışmalarda blok zincir sistemlerinin daha işlevsel hâle gelmesi için çeşitli teknolojilerle bütünleştirildiği görülmektedir. Bu entegrasyonlar, özellikle fiziksel takibin güçlendirilmesi, veri saklama kapasitesinin artırılması, AI ile karar destek, gizlilik ve güvenlik mekanizmalarının güçlendirilmesi gibi çok yönlü amaçlara hizmet etmektedir.

En yaygın entegrasyonlardan biri IoT teknolojileridir. Gıda, otomotiv, savunma ve enerji sektörlerinde kullanılan sistemlerin çoğunda RFID, GPS, sıcaklık ve nem sensörleri,

QR/NFC etiketleri gibi donanımlar aracılığıyla fiziksel ürün hareketleri gerçek zamanlı olarak izlenebilmiştir. Bu sensör verileri blok zincire entegre edilerek hem izlenebilirlik sağlanmış hem de şeffaf denetim altyapısı kurulmuştur.

Bunun yanında, zincir dışı veri depolama sistemleri (IPFS, PostgreSQL, CouchDB) özellikle büyük hacimli veri saklama gerektiren uygulamalarda (görseller, kalite belgeleri, laboratuvar raporları, sertifikalar vb.) yaygın biçimde kullanılmıştır. IPFS entegrasyonu sayesinde zincir üzerindeki veri yükü azaltılmış; belgelerin sadece hash değeri zincire kaydedilmiş, kendisi IPFS'te tutulmuştur. Böylece blok zincirin değiştirilemezlik avantajı, dağıtık saklama esnekliği ile birleştirilmiştir.

Çok sayıda çalışmada, akıllı sözleşme mimarisi kullanılarak kullanıcı rolleri, işlem türleri, kalite kontrol kuralları ile ceza ve ödül mekanizmaları detaylı biçimde tanımlanmıştır. Bazı uygulamalarda bu akıllı sözleşmeler, makine öğrenmesi tabanlı kalite sınıflandırma modelleri ile desteklenmiştir. Örneğin; nesne tanıma (YOLOv5m), destek vektör makineleri (Support Vector Machines – SVM) ve rastgele orman algoritmaları (Random Forest – RF) gibi modeller hem ihlal tespiti hem de geri bildirim sistemlerinin otomasyonu amacıyla entegre edilmiştir. Özellikle kahve ve balık tedarik zinciri örneklerinde, yapay zekâ destekli kalite doğrulama algoritmaları – örneğin spektroskopik analizler ve görüntü sınıflandırma teknikleri – blok zincir altyapısıyla bütünleştirilmiş; böylece ürün kalitesinin şeffaf, otomatik ve denetlenebilir biçimde izlenmesi sağlanmıştır.

Güvenlik boyutunda ise ECDSA dijital imza, ZKP, TLS şifreleme, BAN mantığı (Burrows–Abadi–Needham logic) ile güvenlik protokolü doğrulama ve dijital imzalı belge yönetimi gibi çok katmanlı önlemler tercih edilmiştir. Bu sistemlerde kullanıcı kimlikleri, işlemler ve veri paketleri hem dijital olarak imzalanmış hem de doğrulama işlemleri sözleşme içinde çalıştırılmıştır.

Son olarak, geliştirilen sistemler çeşitli arayüz teknolojileri ile entegre edilerek son kullanıcıya ulaşabilir hâle getirilmiştir. Özellikle mobil ve web tabanlı dağıtık uygulamalar (Decentralized Applications – DApp) aracılığıyla, kullanıcıların blok zincir sistemiyle etkileşim kurmaları sağlanmıştır. Bu uygulamalarda yaygın olarak React, Angular ve Bootstrap gibi modern web arayüz kütüphaneleri; ayrıca RESTful API servisleri ve Node.js tabanlı arka uç mimariler kullanılmıştır. Bu tür teknolojik

entegrasyonlar, sistemlerin sadece teorik düzeyde değil, gerçek dünya koşullarında kullanılabilir ve erişilebilir olmasını sağlayan kritik bileşenler arasında yer almaktadır.

- **Uygulama Düzeyleri**

Diğer sektörlerde gerçekleştirilen blok zincir temelli tedarik zinciri uygulamaları, teknik olgunluk düzeyi ve uygulama derinliği bakımından çeşitli seviyelerde konumlanmaktadır. Yapılan değerlendirmeye göre çalışmaların büyük bölümü senaryo tabanlı prototip sistemler olarak öne çıkarken, az sayıda çalışma tam işlevsel saha uygulaması veya kavramsal model önerisi düzeyindedir.

Çalışmaların önemli bir kısmı, performans testleri, akıllı sözleşme yürütmeleri ve zincir üstü/zincir dışı veri yönetimi gibi teknik işlemleri içeren sistemler üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu sistemlerde sıklıkla Ethereum ve Hyperledger Fabric gibi platformlar kullanılmış; gas maliyeti, işlem süresi, TPS, gecikme süresi gibi ölçütler aracılığıyla sistemlerin teknik kapasitesi değerlendirilmiştir. Örneğin, pirinç tedarik zinciri örneğinde işlem hacmi 14,29 milyon/gün düzeyine ulaşırken; kahve izleme sisteminde %99 üzeri kalite tanıma doğruluğu elde edilmiştir. Benzer şekilde otomotiv parçalarında, çok düğümlü yapılar ile %100 veri bütünlüğü test edilmiştir.

Buna karşın, bazı çalışmalar daha çok kavramsal düzeyde kalmakta ve teknik testlere yer vermemektedir. Bu tür çalışmalar, sistem mimarisini, rol dağılımını ve akış adımlarını tanımlamakta; ancak simülasyon ortamı ya da gerçek veriyle uygulama gerçekleştirmemektedir. Örneğin, kaju tedarik zincirine ilişkin önerilen model, tam entegre bir sistem sunmakla birlikte yalnızca teorik düzeyde açıklanmıştır.

Bazı çalışmalarda ise prototip düzeyinde geliştirilen sistemler, gerçek ağ ortamlarında test edilerek işlevsel hâle getirilmiştir. Bu kapsamda, Ropsten (Ethereum test ağı), Amazon Web Services – AWS (bulut altyapısı) ve IPFS gibi teknolojiler kullanılmış; kullanıcı rolleri, veri erişim izinleri, QR kod, IoT cihazları ve çevresel sensörler gibi bileşenlerle sistemler entegre edilmiştir. Örneğin, bir çiçek tedarik zinciri senaryosunda, sevkiyat süresince izlenen sıcaklık ve nem verileri blok zincire kaydedilmiş; kullanıcı arayüzleri üzerinden otomatik ihlal tespiti gerçekleştirilmiştir. Bu durum, geliştirilen sistemlerin yalnızca kayıt tutma ve şeffaflık sağlama amacıyla sınırlı kalmadığını, aynı zamanda gerçek zamanlı karar destek ve otomasyon kabiliyeti kazandığını ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, incelenen çalışmaların büyük çoğunluğu uygulama düzeyinde yüksek olgunluk göstermekte; ancak saha entegrasyonu, kullanıcı kabulü, regülasyon uyumu gibi boyutlarda hâlâ gelişim alanları barındırmaktadır. Özellikle tarım, gıda, otomotiv ve sağlık sektörlerinde önerilen sistemler, teknik yeterlilik açısından güçlü bir temel sunmakla birlikte, ölçeklenebilirlik, güvenlik ve çok aktörlü yönetişim gibi konular daha fazla araştırmayı gerektirmektedir.

- **Sistem Katkıları ve Özgün Yönler**

Diğer sektörlere ilişkin analiz edilen 30 akademik çalışmada blok zincir tabanlı tedarik zinciri sistemlerinin sunduğu katkılar hem teknik hem de sektörel bağlamda önemli çeşitlilik göstermektedir. Bu katkılar genel olarak izlenebilirlik, sahtecilik önleme, veri güvenliği, şeffaflık, gerçek zamanlı takip, performans artırımı ve regülasyon uyumu başlıkları altında toplanabilir.

Çalışmaların büyük çoğunluğu, ürünün ya da hizmetin kaynağından son kullanıcıya kadar olan tüm süreçte doğrulanabilir bilgi akışı sağlamayı hedeflemekte; zincir üzerindeki işlemleri zaman damgalı, değiştirilemez ve denetlenebilir kılarak güven ortamını artırmaktadır. Gıda, tekstil, otomotiv, elektronik, sağlık, enerji, kimya ve lojistik gibi farklı sektörlerde, sistem katkıları çoğu zaman sektörün karşılaştığı özgün sorunlara göre şekillenmektedir. Örneğin:

- Gıda sektöründe, bozulabilir ürünlerin tazelik takibi, QR kod üzerinden doğrudan tüketiciye bilgi aktarımı ve geri izleme sistemleri öne çıkarken;
- Enerji ve geri dönüşüm sektörlerinde, çift zincirli sistem mimarileri, tokenizasyon ve maliyet-verimlilik dengesi gibi katkılar ön plana çıkmıştır.
- Biyomedikal ve sağlık alanlarında ise soğuk zincir uyumluluğu, sıcaklık/nem sensörleri ile IoT entegrasyonu ve hasta güvenliğini önceleyen veri paylaşım yapıları belirleyici katkı alanlarını oluşturmuştur.
- Moda ve lüks ürün sektörlerinde, sahte ürünlerle mücadeleye yönelik olarak çok katmanlı kimlik doğrulama, mobil uygulama destekli ürün geçmişi sorgulama ve kullanıcıyı güçlendiren şeffaf sistemler geliştirilmiştir.

Teknik katkılar açısından incelendiğinde, birçok çalışmada sistemlerin yüksek işlem hacmine dayanıklı, ağ gecikmesine karşı toleranslı, yük dengeleme ve sorgu hızlandırma mekanizmalarıyla optimize edilmiş olduğu görülmektedir. Bazı sistemlerde TPS

değerlerinin 2000'in üzerine çıktığı, gecikme süresinin milisaniye düzeyine indirildiği ya da farklı ağ protokolleri altında test edilerek çoklu iletişim ortamlarında kararlılık sağlandığı tespit edilmiştir.

Ayrıca çok sayıda çalışmada IoT destekli fiziksel veri izleme, IPFS gibi zincir dışı veri sistemleriyle entegre saklama çözümleri, yapay zekâ/makine öğrenimi ile kalite sınıflandırması ve öneri sistemleri gibi ileri düzey katkılar önerilmiştir. Özellikle ürün kalite kontrolünün otomatikleştirilmesi, örneğin balık ya da kahve sektöründe olduğu gibi görsel analiz algoritmalarıyla desteklenmesi, sektörel özgünlük açısından önemli katkılardır.

- **SCRM Odaklı Literatür Katkıları**

Literatürde değerlendirilen çalışmaların çoğu, blok zincir uygulamalarının yalnızca işlem takibi ve veri bütünlüğü sağlamakla kalmadığını; aynı zamanda tedarik zinciri risk yönetimi açısından da önemli katkılar sunduğunu göstermektedir. Bu katkılar, kırılganlıkların azaltılması, sistemlerin beklenmeyen durumlara karşı direnç gösterebilmesi ve operasyonel dayanıklılığın sürdürülebilir hâle getirilmesi gibi üç temel eksende toplanmaktadır.

Kırılganlıkların azaltılmasına yönelik katkılar, sahte ürün girişini engelleme, belge sahteciliğine karşı dijital imza sistemleri kurma, ürün yaşam döngüsünü uçtan uca izleme ve yetkisiz erişimleri önleme gibi işlevlerle sağlanmıştır. Örneğin, IPFS ile entegre edilen dış veri saklama mekanizmaları, merkezi sistemlere olan bağımlılığı azaltarak veri kaybı ve tekil hata riskini düşürmüştür. Ayrıca, QR/NFC etiketleme, ECDSA imza, dijital sertifika ve kimlik doğrulama sistemleriyle güçlendirilen çözümler, çeşitli sektörlerde operasyonel güvenliği artırmıştır.

Dirençlilik düzeyinde, sistemlerin bozulma veya kriz anlarında işleyişini sürdürebilmesi için geliştirilen çözümler öne çıkmaktadır. Gıda ve konaklama sektöründe örneklenen uygulamalarda, ürün bozulma risklerine karşı sıcaklık-nem sensörleri ile gerçek zamanlı kontrol sağlanmış; ihlal anında geri bildirim ve ceza mekanizmaları devreye sokulmuştur. Geri çağırma, atık değerlendirme ve öneri sistemleri gibi modüller, olay sonrası müdahale süreçlerini hızlandırarak sistemin toparlanabilirliğini desteklemiştir.

Dayanıklılık katkıları ise uzun vadeli sistem sürdürülebilirliğini güvence altına alan performans yapıları üzerinden şekillenmiştir. TPS değerlerinin optimize edilmesi, Caliper

ile test edilen gecikme sürelerinin düşürülmesi ve zincir dışı veri entegrasyonları ile veri yoğunluğunun dengelenmesi, sistemin yüksek ölçekli çalışmalarda kararlılığını artırmıştır. Özellikle gıda işleme, çay, geri dönüşüm ve enerji sektörlerindeki çalışmalarda, blok zincir altyapısının sadece teknik değil, aynı zamanda işlevsel ve yönetişimsel dayanıklılığı da güçlendirdiği görülmektedir.

Tüm bu örnekler göstermektedir ki, blok zincir uygulamaları yalnızca teknik olarak değil, aynı zamanda toplumsal fayda, kullanıcı güveni, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik adalet gibi kavramlarla da ilişkilendirilmekte; her sektörün kendi iç dinamikleri doğrultusunda şekillenen, işlevsel ve denetlenebilir sistem çözümleri ortaya konmaktadır. Bu çerçevede, bir sonraki bölümde blok zincir platformlarının sektörel tercihlere göre karşılaştırmalı performans analizi yapılacak ve kullanılan teknik yapıların değerlendirmesi sunulacaktır.

6.4. Literatürde Sektörler Arası Karşılaştırmalı Değerlendirme

Bu çalışmada analiz edilen 60'a aşkın akademik yayın, blok zincir teknolojisinin tedarik zincirlerine entegrasyonunun sektörel farklılıklarına dair kapsamlı bir bakış sunmaktadır. İlaç sektörü ve diğer sektörler (gıda, tarım, otomotiv, savunma, tekstil, sağlık, enerji vb.) arasında yapılan karşılaştırmalı değerlendirme, teknolojik tercihler, uygulama amaçları, sistem mimarileri ve performans çıktıları açısından hem benzerlikler hem de belirgin farklılıklar içermektedir.

✓ Teknolojik Tercihler ve Altyapı:

İlaç sektöründe açık bir şekilde Hyperledger Fabric ağırlıklı bir tercih söz konusudur. Bunun temel nedeni, sektörün yüksek düzenlemeye tabi yapısı ve izinli mimarilerin veri gizliliği ile yetki kontrolünü daha etkin sağlamasıdır. Diğer alanlarda ise Ethereum, IPFS, Sawtooth, Besu gibi platform çeşitliliği çok daha fazladır. Özellikle gıda ve tarım alanlarında Ethereum + IPFS + IoT entegrasyonları yaygın şekilde kullanılmaktadır.

✓ Uygulama Amaçları ve Hedeflenen Sorunlar:

İlaç sektöründe odak noktaları çoğunlukla sahte ilacın önlenmesi, izlenebilirliğin artırılması ve kamu sağlığının korunması iken; diğer alanlarda hedeflenen problemler daha geniş bir yelpazeye yayılmaktadır. Örneğin gıda alanında soğuk zincir takibi, otomotivde yedek parça sertifikasyonu ve geri çağırma, tekstil ve modada orijinallik doğrulaması ve marka koruma öne çıkmaktadır.

✓ Veri Entegrasyonu ve Sistem Katmanları:

İlaç sektörü projeleri genellikle akıllı sözleşme + QR kod + öneri sistemi üzerinden ilerlemekte; ancak çok katmanlı mimariler ve IoT destekli veri entegrasyonuna daha sık olarak gıda, otomotiv ve savunma alanlarında rastlanmaktadır. Örneğin balıkçılık ve çiçek tedarik zinciri çalışmalarında sıcaklık, nem, DNA verisi gibi parametreler sistemle bütünleştirilmiştir.

✓ Performans ve Ölçeklenebilirlik:

İlaç sektöründe performans testine dayalı çalışma sayısı sınırlı iken, diğer alanlarda özellikle gıda, otomotiv ve enerji çalışmalarında 1000 TPS üzerinde işlem hacmine ulaşan sistemler detaylı şekilde test edilmiştir. Örneğin e-atık çalışmalarında EPBCR algoritması ile yaklaşık 2000 TPS elde edilmiş; çift zincirli mimari ile enerji sistemlerinde işlem maliyeti optimize edilmiştir.

✓ Kullanıcı Etkileşimi ve Son Tüketici Katılımı:

İlaç sektöründe hasta merkezli sistem sayısı az iken, diğer alanlarda tüketiciye yönelik doğrulama ve kalite kontrol sağlayan mobil/web uygulamalar, QR destekli arayüzler ve görüntü işleme destekli sistemler daha yaygındır. Kahve ve balık çalışmalarında kullanıcının ürün kökenini gerçek zamanlı kontrol edebildiği yapılar geliştirilmiştir.

✓ Toplumsal ve Kurumsal Etki:

İlaç sektörü uygulamaları çoğunlukla regülasyon uyumu ve kamu sağlığı odaklıyken; diğer alanlarda sürdürülebilirlik, çiftçi/üretici desteklenmesi, kültürel miras korunumu, karbon ayak izi izleme gibi daha geniş toplumsal hedefler vurgulanmaktadır. Tarımda çiftçi gelir adaletini gözeten modeller; tekstilde tedarik şeffaflığı sağlayan sistemler dikkat çekmektedir.

✓ Tedarik Zinciri Risk Yönetimi ve Sistem Direnci:

İlaç sektöründeki blok zincir uygulamaları daha çok veri güvenliği, sahiplik doğrulama ve regülasyon uyumu gibi kırılganlık azaltıcı işlevlere odaklanırken; diğer sektörlerde geliştirilen sistemler, krizlere tepki verebilme ve uzun vadeli operasyonel sürekliliği sağlama yönüyle daha geniş bir risk yönetimi yaklaşımı sunmaktadır. Gıda, tarım ve otomotiv gibi alanlarda sensör destekli ihlal tespiti, ceza–ödül mekanizmaları ve otomatik karar sistemleri sayesinde sistem direnci daha güçlü biçimde yapılandırılmıştır.

Bu karşılaştırmalı değerlendirme, blok zincir teknolojisinin yalnızca belirli alanlarda değil; her bir sektörün ihtiyacına göre şekillendirilebilen bir altyapı sunduğunu göstermektedir. İlaç sektörü örneğinden elde edilen yüksek veri bütünlüğü ve denetim üzerinden çalışan yapılar, diğer alanlarda esneklik, kullanıcı etkileşimi, çoklu teknoloji entegrasyonu ile farklı önceliklere evrilmektedir. Bu bulgular, blok zincirin sektörel çözümler sunabilen esnek bir mimari olduğunu teyit etmekte; ilerleyen bölümde ele alınacak olan Türkiye özelindeki model önerisi açısından da çerçeve sunmaktadır. Yapılan bu karşılaştırmalı analiz, blok zincir teknolojisinin sabit ve tekil bir çerçeve teknoloji olmaktan ziyade, uygulama bağlamına göre farklılaşabilen esnek ve modüler bir altyapı niteliği taşıdığını ortaya koymuştur.

Tez boyunca farklı bölümlerde ele alınan teknoloji ve sistem katmanlarının daha anlaşılır, sade ve bütüncül bir biçimde sunulabilmesi amacıyla, aşağıdaki tablo 6.3 hazırlanmıştır. Bu tablo, blok zincir tabanlı tedarik zinciri uygulamalarında sıkça karşılaşılan teknik terimleri ve bileşenleri özetlemekte; her bir öğenin temel amacı ve işlevi hakkında kısa açıklamalar sunarak, okuyucunun metni takip ederken karşılaştığı teknolojik kavramları daha kolay anlamlandırmasına katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Tablo 6.3. *Blok zincir tabanlı sistemlerde kullanılan teknoloji ve katmanlar*

Teknoloji / Katman	Amaç	Açıklama
Akıllı Sözleşmeler ve Uygulama Katmanları		
Smart Contract	Otomatik İşlem Yürütme	Kurallara Bağlı Sözleşmelerin Otomatik Çalışmasını Sağlar.
Chaincode	Fabric İçin Akıllı Sözleşme	Hyperledger Fabric'e Özgü Sözleşme Modülü.
JS Chaincode	Javascript ile Sözleşme Yazımı	Fabric Üzerinde Javascript Dilinde Chaincode Yazımı Sağlar.
React / Angular	Web Arayüzü	Kullanıcı Etkileşimi İçin Ön Yüz Teknolojileridir.
REST API / Node.js	Uygulamalar Arası İletişim	Veri Alışverişi ve Entegrasyon Sağlar.
Digital Wallet	Kripto Varlık Cüzdanı	Kullanıcıların Token, Coin vb. Sakladığı Dijital Arayüz.
ICO	Token Arzı	Yeni Tokenlar İçin Fon Toplama Mekanizması.
ERC20	Ethereum Token Standardı	Ethereum Ağı Üzerinde Yaygın Token Yapısıdır.
Entegrasyon ve Zincirler Arası Bağlantılar		
Oracle	Zincir Dışı Veri Bağlantısı	Gerçek Dünya Verisini Blok Zincire Taşır.
Cantrak	Kayıt Takip Platformu	Tayland Medikal Kenevir Zincirinde Kullanılan Özel Sistem.
IPFS + Blok Zincir Entegrasyonu	Zincir Dışı Veri Saklama ve Bütünlük Sağlama	Dağıtık Depolama ile Blok Zincir Verisinin Hacimsel Yükü Azaltılır.
Görsel Tanıma, AI ve Karar Destek Modülleri		
YOLOv5m	Görüntü Tabanlı Kalite Analizi	Nesne Tanıma ile Ürün Sınıflandırması Yapar.

Tablo 6.3. *Blok zincir tabanlı sistemlerde kullanılan teknoloji ve katmanlar (devamı)*

Teknoloji / Katman	Amaç	Açıklama
SVM	Makine Öğrenimi Algoritması	Veri Sınıflandırmak ve Karar Destek Sistemleri Kurmak İçin Kullanılır.
HDBN	Yoğunluk Tabanlı Kümelendirme	Veri Kümeleri Oluşturarak Öneri Sistemini Destekler.
TF-IDF	Metin Anlamlandırma	Terim Ağırlığına Göre İçerik Analizi Yapar.
GloVe	Kelime Vektörleştirme	Doğal Dil İşleme İçin Kelime İlişkilerini Modelleyen Algoritmadır.
Archimedes Optimizasyonu	Karar Destek Algoritması	Veri Madenciliği Tabanlı İşlem Optimizasyonu Sağlar.
ML	Makine Öğrenmesi	Örüntü Tanıma ve Tahmin İçin Veri ile Öğrenme Sağlar.
AI Destekli Sınıflandırıcılar	Görüntü/Ses/Veri Analizi	Ürün Doğrulama ve Kalite Sınıflandırma İşlemlerini Destekler.
Güvenlik Analiz ve Denetim Araçları		
Slither	Akıllı Sözleşme Güvenlik Taraması	Ethereum sözleşmelerine yönelik güvenlik denetimi yapar.
Oyente	Sözleşme Zafiyet Analizörü	Akıllı Sözleşmelerdeki Hataları Analiz Eder.
SmartCheck	Kod Doğrulama Aracı	Güvenlik Açıklarını Tespit Etmeye Yarar.
Güvenlik ve Kriptografi Teknolojileri		
TLS	Şifreli Veri İletimi	Sunucu–İstemci Arasında Güvenli İletişim Sağlar.
ECDSA	Dijital İmza	Kriptografik Olarak İşlem Doğrulama Yapar.
ZKP	Gizlilik Koruma	Veri İfşa Edilmeden Doğrulama Yapılmasını Sağlar.
SHA-256	Veri Özetleme	Verilerin Hashlenerek Sabit Uzunlukta Özetlenmesini Sağlar.
ECC	Hafif Kriptografi	Elliptik Eğri Algoritmasıyla Düşük Kaynak Tüketimiyle Güvenlik Sağlar.
BAN Logic	Güvenlik Protokolü Doğrulama	İletişim Güvenliğini Mantıksal Olarak Test Eder.
Hash ID	Veri Bütünlüğü	Verilerin Kimliklendirilmesi ve Değişmezliğinin Korunması İçin Kullanılır.
X.509 Sertifikası	Dijital Kimlik Doğrulama	Kullanıcı, İşlem ve Sistem Kimliklerinin Doğruluğu Sağlanır.
Merkle Ağacı	Veri Bütünlüğü ve Hızlı Doğrulama	İşlemlerin Kök Hash Üzerinden Doğrulanmasını Sağlar.
Konsensüs Algoritmaları ve Zincir Mimarileri		
PBFT	İzinli Konsensüs	Ağ İçinde Hata Toleranslı Mutabakat Sağlar.
Raft	Crash Fault-Tolerant Mutabakat	Hyperledger Ağlarında Kullanılan Güvenilir Algoritmadır.
PoET	Elapsed Time Tabanlı Konsensüs	Zaman Temelli Konsensüs Algoritmasıdır (Sawtooth).
PoA	Yetki Temelli Mutabakat	Belirlenmiş Düğümlerle Mutabakat Sağlanır.
DevMode	Geliştirici Modu	Sawtooth Ortamında Basit Test Konsensüsüdür.
Cross Chain	Zincirler Arası Etkileşim	Farklı Blok Zincir Sistemlerinin Birlikte Çalışmasını Sağlar.
Federatif Zincir	Kurumsal Ağ Birliği	Birden Fazla Kuruluşun Yönettiği Dağıtık Ağ Mimarisi.

Tablo 6.3. *Blok zincir tabanlı sistemlerde kullanılan teknoloji ve katmanlar (devamı)*

Teknoloji / Katman	Amaç	Açıklama
Performans Ölçüm Araçları ve Test Sistemleri		
Caliper	Blok Zincir Performans Testi	TPS, Gecikme, Yük Testi İçin Simülasyon Aracıdır.
JMeter	HTTP Performans Testi	REST Tabanlı API Performansını Ölçer.
Ganache	Özel Ethereum Ağı	Test ve Geliştirme İçin Lokal Ethereum Simülatörüdür.
Remix IDE	Akıllı Sözleşme Geliştirme	Ethereum Sözleşmeleri Yazmak/Test Etmek İçin kullanılan sistemdir.
Black-box Test	Sistem Testi	Dıştan Veri Girişi ve Çıkışı ile Sistem Doğrulaması Yapar.
Gas Analizi	İşlem Maliyeti Analizi	Ethereum Üzerindeki İşlem Ücretlerinin Hesaplanmasını Sağlar.
Veri Depolama ve Erişim Yönetimi		
IPFS	Zincir Dışı Veri Saklama	Merkezi Olmayan Dosya Sistemidir.
DFS	Dağıtık Dosya Sistemi	Blok Zincir Dışında Büyük Verilerin Saklanmasını Sağlar.
CouchDB	Nosql Veri Yönetimi	Hyperledger Fabric ile Uyumlu Veri Tabanı Sistemidir.
LMDB	Bellek Eşlemeli Veri Yönetimi	Yüksek Performanslı Veritabanı Sistemidir.
MongoDB	JSON Tabanlı Veri Yönetimi	Belge Odaklı Veri Depolamak İçin Kullanılır.
OAuth	Yetkilendirme Protokolü	Kullanıcı Verisine Güvenli Üçüncü Taraf Erişimi Sağlar.
RBAC	Rol Tabanlı Erişim	Yetkilerin Kullanıcı Rollerine Göre Sınıflandırılmasını Sağlar.
ACL	Erişim Kontrol Listesi	Kullanıcı Düzeyinde Erişim Haklarını Sınırlar.
Ropsten / AWS	Test Ağı ve Bulut Ortamı	Sistem Simülasyonu ve Gerçek Ortam Öncesi Prototipleme Sağlar.
Ürün Tanımlama ve İzlenebilirlik Sistemleri		
EPC	Benzersiz Ürün Kimliği	Her Ürünün Dijital Olarak Kimliklendirilmesini ve İzlenmesini Sağlar.
GTIN	Küresel Ticari Ürün Numarası	Ürünleri Küresel Düzeyde Benzersiz Olarak Tanımlayan Barkod Sistemidir.
SSCC	Seri Sevkiyat Konteyner Kodu	Lojistik Birimlerin Kimliklendirilmesini Sağlar.
NFC	Yakın Alan İletişimi	Kısa Mesafeli Veri Alışverişi İçin Kullanılan Temassız İletişim Teknolojisidir.
Encrypted QR	Güvenli Ürün Doğrulama	Karekodların Şifrelenmiş Biçimiyle Ürün Güvenliği Artırılır.
PCR-DNA	Genetik Ürün Doğrulama	Ürünlerin DNA Analizine Dayalı Kimliklendirilmesini Sağlar.
QAT	Görüntü Bazlı Tanıma	AI Destekli Cihazlarla Tür, Kalite ve Tazelik Ölçümü Yapılır.
Hologram Etiket	Fiziksel Güvenlik ve Orijinallik Doğrulama	Etiketler Aracılığıyla Fiziksel Ürün Güvenliği Artırılır.

Kaynak: Tablo yazar tarafından oluşturulmuştur.

Bu açıklayıcı içerik ile tezde kullanılan temel teknik terimlerin bütüncül bir özeti sunulmuş olup, izleyen bölümde uygulamaya dönük analiz ve modelleme sürecine geçilecektir.

YEDİNCİ BÖLÜM

HYPERLEDGER FABRIC TABANLI BİR BLOK ZİNCİR MODELİ: SOĞUK ZİNCİR KIRILMASI SENARYOSUNA DAYALI UYGULAMA ÖRNEĞİ

Bu bölümde, çalışmanın önceki bölümlerinde kuramsal ve teknik temelleri ayrıntılı biçimde açıklanan blok zincir tabanlı izlenebilirlik sisteminin, gerçek bir uygulama aracılığıyla nasıl yapılandırıldığı ve çalıştırıldığı ortaya konulmaktadır. Türkiye'de hâlihazırda kullanılan İTS'nin mimarisinde gözlemlenen yapısal ve işlevsel sınırlılıkları aşmak üzere geliştirilen bu model, dağıtık defter teknolojisinin sunduğu güvenlik, şeffaflık ve denetlenebilirlik ilkeleri üzerine inşa edilmiştir.

Geliştirilen uygulama modeli, Hyperledger Fabric platformu üzerinde çalışmakta ve tedarik zincirinin temel bileşenleri olan üretici, dağıtıcı, eczane ve denetleyici kurum gibi aktörleri içeren çok katmanlı bir mimariye sahiptir. Her aktör, yalnızca kendi rolüne uygun işlemleri gerçekleştirebilecek şekilde sistemde tanımlanmakta; tüm işlem akışı, Hyperledger Fabric'in "execute–order–validate" modeli çerçevesinde yürütülmektedir. Veri bütünlüğü, zaman damgası ile işaretlenmiş bloklar halinde kalıcı biçimde kaydedilmekte ve her işlem organizasyon kimliği ile ilişkilendirilmektedir.

Bu kapsamda geliştirilen model, ilaç tedarik zincirinde sıklıkla karşılaşılan soğuk zincir kırılması problemine odaklanmakta ve bu riski dijital olarak tanımlanabilir, izlenebilir ve denetlenebilir hâle getirmeyi hedeflemektedir. Soğuk zincir, sıcaklık hassasiyeti yüksek farmasötik ürünlerin üretimden hastaya ulaşana kadar +2°C ile +8°C aralığında korunmasını gerektiren kritik bir lojistik süreçtir. Bu aralığın dışında yaşanabilecek sapmalar, ürün kalitesini doğrudan etkileyerek hem halk sağlığı açısından tehdit oluşturmakta hem de kurumsal sorumluluk zincirinde belirsizlik yaratmaktadır.

Senaryo kapsamında, üretici tarafından başlatılan bir ürün sevkiyatı, dağıtıcı tarafından taşınırken sıcaklık verileri sistem üzerinden izlenmekte; belirlenen eşik değerin üzerine

çıkıldığında (örneğin 8°C'yi aşan bir sapma), zincire soğuk zincir ihlali olarak kaydedilmektedir. Eczane ürünü teslim alacağı sırada sistem üzerinde geçmiş verileri inceleyerek bu ihlali tespit etmekte ve ürünü reddetme işlemini gerçekleştirmektedir. Denetleyici kurum ise tüm süreci yalnızca salt-okunur (read-only) yetkiyle izlemekte; böylece hem yönetişim hem de denetim fonksiyonları teknik olarak güvence altına alınmaktadır.

Bu bölümde, geliştirilen sistemin kurumsal mimarisi, organizasyonel rolleri, kanal yapısı, akıllı sözleşme işleyişi, kimlik ve yetki yönetimi gibi temel bileşenleri detaylı şekilde açıklanacak; ardından senaryoya dayalı olarak uçtan uca işlem akışı örnekleri sunulacaktır. Son olarak sistemin Türkiye'deki İTS yapısına göre sunduğu yapısal farklılıklar ve stratejik katkılar değerlendirilerek modelin uygulanabilirliği tartışılacaktır.

7.1. Uygulama Senaryosunun Tanımı ve Gerekçesi

İlaç tedarik zinciri, ürünlerin üretimden hastaya ulaşıncaya kadar geçtiği çok sayıda aşamayı içeren, yüksek hassasiyet ve güvenlik gerektiren bir sistemdir. Bu süreçte özellikle sıcaklık kontrolü gerektiren aşılar, insülinler ve biyoteknolojik ilaçlar gibi ürünler için soğuk zincir uygulamaları kritik öneme sahiptir. Soğuk zincir, ürünün etkinliğini ve güvenliğini koruyabilmesi için belirli sıcaklık aralıklarında (genellikle +2°C ile +8°C arasında) saklanmasını ve taşınmasını sağlayan kontrollü lojistik altyapısını ifade etmektedir. Bu aralığın dışına çıkılması durumunda ürünün etkinliğini kaybetme riski ortaya çıkmakta, bu da halk sağlığı açısından ciddi sonuçlar doğurabilmektedir.

Türkiye'de hâlihazırda kullanılan İTS, ilaçların üretimden satışa kadar olan sürecini barkod ve bildirim temelli olarak izlemekte; ancak taşıma koşulları, sıcaklık değişimleri ve soğuk zincir bütünlüğü gibi niteliksel verileri sistematik şekilde kaydetmemektedir. Bu eksiklik, özellikle soğuk zincir kırılması gibi kritik ihlallerin tespitinde geriye dönük analiz yapmayı zorlaştırmakta ve sorumluluğun hangi aşamada ortaya çıktığını belirlemeyi neredeyse imkânsız kılmaktadır. İTS, veri güvenliği açısından temel izlenebilirlik sağlar gibi görünse de niteliksel parametrelerin eksikliği hem sistemin yönetişim kapasitesini hem de halk sağlığını doğrudan tehdit etmektedir.

Bu gerekçeler doğrultusunda, bu çalışmada geliştirilen blok zincir tabanlı uygulama modeli, soğuk zincir kırılması senaryosu temelinde yapılandırılmıştır. Geliştirilen modelde, üretici tarafından başlatılan ürün sevkiyatı sırasında sıcaklık verileri sistem

aracılığıyla izlenmekte; belirlenen eşik değerlerin aşılması durumunda, zincire soğuk zincir ihlali kaydı otomatik olarak işlenmektedir. Ürünün eczane tarafından teslim alınması aşamasında bu geçmiş veri kontrol edilmekte ve eczane, ihlali tespit etmesi hâlinde ürünü sistem üzerinden reddedebilmektedir. Denetleyici kurum ise tüm bu süreci salt-okunur yetki ile izlemekte, veri bütünlüğünü ve işlem disiplinini denetleyebilmektedir.

Modeldeki tüm veri hareketleri ve zincir içi işlemler, zaman damgası ile bloklara kaydedilmekte; her işlem, yalnızca rol bazlı yetkilendirme kurallarına göre tanımlanmış aktörler tarafından gerçekleştirilebilmektedir. Bu yapı yalnızca teknik bir uygulama simülasyonu değil; aynı zamanda güvenli veri yönetimi, yönetişimsel hesap verebilirlik ve hasta güvenliğini esas alan dijital bir altyapı önerisi sunmaktadır.

7.2. Hyperledger Fabric Mimarisine Dayalı Sistem Tasarımı

Hyperledger Fabric, izinli blok zincir mimarisi, modüler yapısı ve özelleştirilebilirliği ile çok aktörlü sistemlerin dijitalleştirilmesi açısından güçlü bir altyapı sunmaktadır. İlaç tedarik zinciri gibi hassasiyet gerektiren sektörlerde bu özellikler, veri bütünlüğünün korunması ve işlemlerin izlenebilirliği açısından kritik önem taşımaktadır. Bu çalışmada geliştirilen model, taşıma sürecinde sıcaklık takibi gerektiren farmasötik ürünlerin uçtan uca izlenebilmesini sağlamayı amaçlamış ve bu doğrultuda Hyperledger Fabric'in kurumsal düzeyde sunduğu yeteneklerden faydalanılmıştır.

Model, her bir paydaşın yalnızca kendi sorumluluk alanına özgü işlem gerçekleştirebildiği, tüm kayıtların değiştirilemez biçimde bloklara kaydedildiği ve sistemin kimlik temelli yetkilendirme mantığıyla çalıştığı bir yapı üzerine kurulmuştur. İşlem geçmişi zaman damgası ile işaretlenmekte ve sistemsel bütünlük, ağın işlem modeline uygun biçimde sağlanmaktadır.

7.2.1. Ağ Mimarisi ve Organizasyonlar

Geliştirilen modelde, ilaç tedarik zinciri süreçlerini temsil eden dört temel organizasyon tanımlanmıştır. Her organizasyon kendi eş düğümüne (peer) ve Sertifika Otoritesi'ne (CA) sahiptir. Kullanıcı kimlikleri bu CA yapısı üzerinden üretilmekte ve yetkilendirme işlemleri rol bazlı olarak gerçekleştirilmektedir. Aşağıda her organizasyonun görev tanımı ve sistem içindeki işlevleri özetlenmiştir:

1. Üretici (Org1): İlaç üretimini gerçekleştiren organizasyondur. Sisteme ürünün temel bilgilerini (örneğin ad, barkod, içerik, saklama koşulları) ve buna bağlı üretim partisi

bilgilerini (üretim miktarı, son kullanma tarihi, sıcaklık aralığı) kaydeder. Böylece ürünün dijital temsili tedarik zincirine tanıtılmış olur.

2. Dağıtıcı (Org2): Ürünü üreticiden teslim alan ve taşıma sürecini yöneten organizasyondur. Lojistik sürecin izlenebilirliğini sağlamak amacıyla, sıcaklık gibi çevresel veriler organizasyon bünyesindeki IoT tabanlı sensör cihazları aracılığıyla sisteme aktarılır. Taşıma koşullarında ihlal oluşması durumunda, bu durum sisteme bildirilir.
3. Eczane (Org3): Ürünün nihai varış noktasındaki kontrol ve teslimat işlemlerinden sorumlu organizasyondur. Ürün geçmişini sistem üzerinden inceleyerek taşıma koşullarının uygunluğunu değerlendirir. Gerekli durumlarda ürünü kabul eder ya da reddeder. Böylece ürün kalitesi eczane düzeyinde sistem temelli bir denetimden geçirilmiş olur.
4. Denetleyici Kurum (Org4): Sağlık otoritesini temsil eden düzenleyici kurumdur. Sisteme salt-okunur erişim hakkına sahiptir. Tüm işlemleri bağımsız şekilde denetleyebilir, ancak sisteme herhangi bir veri kaydı gerçekleştiremez. Bu rol, sistemin şeffaflık ve hesap verebilirlik ilkelerine uygun biçimde çalışmasını güvence altına alır.

7.2.2. Kanal Yapısı ve Veri Paylaşımı

Modelde, organizasyonlar arası veri erişim sınırlarını ve gizlilik ilkesini korumak amacıyla Hyperledger Fabric mimarisi içinde iki ayrı kanal yapılandırılmıştır. Her kanal, yalnızca ilgili aktörlerin erişimine açık olacak şekilde tanımlanmış; böylece veri paylaşımı, yetki bazlı ve kontrollü bir biçimde yürütülmüştür.

➢ Kanal 1: producer-distributor-channel

Bu kanal, üretici, dağıtıcı ve denetleyici kurum organizasyonlarının dahil olduğu bir ağ parçasıdır. Kanal içerisinde, ürün ve üretim partisi bilgilerinin yönetimi gerçekleştirilir. Üretici tarafından zincire kaydedilen ürün ve parti verileri, bu kanal aracılığıyla dağıtıcı tarafından görüntülenebilir. Denetleyici kurum ise bu bilgilere salt-okunur erişim ile ulaşır. Kanal üzerinde çalışan chaincode, ürün kayıt süreci ile ilgili işlemleri yönetmektedir.

Erişim Yetkileri:

- Üretici → veri oluşturur

- Dağıtıcı → veri görüntüler
- Denetleyici → salt-okunur denetim yapar

➢ Kanal 2: distributor-retailer-channel

Bu kanal, dağıtıcı, eczane ve denetleyici kurum organizasyonları arasında yapılandırılmıştır. Sevkiyat yönetimi, çevresel verilerin izlenmesi ve teslimat kontrol süreçleri bu kanal üzerinden yürütülmektedir. Taşıma süreci sırasında sıcaklık gibi çevresel veriler, dağıtıcı organizasyonun sistemine entegre edilmiş IoT sensör cihazları tarafından otomatik biçimde oluşturulmakta ve zaman damgasıyla birlikte zincire kaydedilmektedir. Bu sayede veri girişi manuel işlemden bağımsız hâle gelmekte; sistemin doğruluğu ve müdahale edilemezliği güçlenmektedir. Eczane, teslimat öncesinde kanal üzerindeki işlem geçmişini inceleyerek taşıma koşullarının uygunluğunu değerlendirir ve ürünü kabul edip etmeyeceğine karar verir. Denetleyici kurum ise bu kanalda gerçekleşen tüm işlemleri izleyebilir ancak herhangi bir müdahalede bulunamaz.

Erişim Yetkileri:

- Dağıtıcı → veri oluşturur ve günceller
- IoT cihazları üzerinden veri → otomatik olarak kaydedilir
- Eczane → veri okur, teslim kararı verir
- Denetleyici → tüm işlemleri denetler

7.2.3. Chaincode Yapısı

Uygulama Geliştirilen sistem, ürün hareketlerinin ve lojistik süreçlerin izlenebilirliğini sağlamak amacıyla özelleştirilmiş bir chaincode yapısı üzerine kurulmuştur. Uygulama, Hyperledger Fabric'in önerdiği modüler mimari temel alınarak yapılandırılmış ve her organizasyonun yalnızca kendi yetki alanında işlem gerçekleştirebildiği bir chaincode mantığı benimsenmiştir.

Uygulamada kullanılan chaincode, *asset-transfer-basic* örneği temel alınarak özelleştirilmiş olup, blok zincir üzerinde ürünün kaydı, güncellenmesi, sahiplik aktarımı, sıcaklık verisi yönetimi ve ihlal bildirimi gibi işlemleri desteklemektedir.

Chaincode, farklı rollerin yalnızca kendi işlem türlerini çağırabileceği şekilde tasarlanmıştır. Bu erişim kontrolü hem Hyperledger Fabric'in MSP yapısı hem de akıllı

sözleşme içerisinde tanımlanmış rol kontrolü mantığı ile sağlanmaktadır. Aşağıda sistemde yer alan temel chaincode işlevleri özetlenmiştir:

- Ürün Kaydı: Üretici, ürün kimliği, adı, barkodu, üretim tarihi, sıcaklık aralığı gibi verilerle ürünü sisteme tanıtır.
- Parti Yönetimi: Her ürün belirli bir partiye bağlıdır. Parti bilgileri zincire kaydedilir ve her işlemde referans alınır.
- Sahiplik Aktarımı: Ürün, üreticiden dağıtıcıya ve ardından eczaneye geçerken sahiplik bilgisi güncellenir.
- Sıcaklık Verisi İşleme: IoT sensörlerinden gelen sıcaklık verileri, taşıma sürecinde blok zincire zaman damgası ile kaydedilir.
- Soğuk Zincir İhlali Bildirimi: Taşınan ürün belirlenen sıcaklık aralıklarını aşarsa, sistem üzerinde otomatik olarak ihlal bildirimi oluşturulur.
- Teslim Onayı/Reddetme: Eczane, geçmiş verileri değerlendirerek ürünü kabul eder veya ihlal durumunda reddeder.
- Geçmiş Veriye Erişim: Denetleyici kurum, blok zincir üzerinde tüm işlemleri salt-okunur biçimde takip edebilir.

Bu yapının temel avantajları şunlardır:

- İşlem geçmişi, organizasyon kimliği ve zaman damgası ile zincire sabitlenerek geriye dönük izlenebilirlik sağlanır.
- Chaincode fonksiyonları yalnızca yetkili organizasyonlar tarafından çağrılabilir biçimde tanımlandığı için yetki dışı müdahaleler engellenir.
- Her işlem blok zincir üzerinde değiştirilemez biçimde tutulduğundan veri güvenliği garanti altına alınır.

Uygulamanın API katmanı ile chaincode arasındaki bağlantı, Hyperledger Fabric SDK'sı (Node.js) kullanılarak sağlanmakta; her kullanıcı CA'dan kaydedilerek kendi dijital cüzdanına tanımlı hale getirilmektedir. bootstrap.js dosyası bu süreci otomatikleştirmektedir. Postman koleksiyonları üzerinden tüm işlemler test edilebilir durumdadır.

7.2.4. Kimlik ve Yetki Yönetimi

Geliştirilen sistemde, her kullanıcının yalnızca kendi organizasyonuna ait işlemleri gerçekleştirebilmesi amacıyla rol temelli bir kimlik ve yetki yönetim altyapısı tasarlanmıştır. Bu yapı, Hyperledger Fabric'in izinli mimarisi kapsamında, her organizasyon için ayrı CA ve peer bileşenleri tanımlanarak oluşturulmuştur. Teknik olarak aynı ağ üzerinde çalışan bu yapılar, mantıksal olarak ayrılmış organizasyonlar şeklinde kurgulanmıştır. Uygulamada yer alan organizasyonlar şunlardır:

- Manufacturer (Üretici) – OrgID: 1
- Distributor (Dağıtıcı) – OrgID: 2
- Pharmacy (Eczane) – OrgID: 3
- Regulator (Denetleyici Kurum) – OrgID: 4

Her organizasyonun kendi CA'sı üzerinden kullanıcıları kayıt altına alınmakta ve her kullanıcı, sadece ait olduğu organizasyon adına işlem gerçekleştirebilecek şekilde sistemde tanımlanmaktadır. Bu kullanıcı kimlikleri, istemci uygulamalarda wallet dizinlerinde dijital sertifikalar (X.509) olarak saklanmaktadır.

➢ Kimlik Doğrulama Süreci

Kullanıcılar sisteme, istemci uygulamalar (örneğin web API veya Postman) üzerinden e-posta ve şifreyle giriş yapar. Bu işlem sonucunda, kullanıcıya JWT (JSON Web Token) tabanlı bir erişim belirteci (token) verilir. Bu token, sonraki tüm işlemlerde kullanıcının kimliğini temsil eder. Sistem her API çağrısında bu token üzerinden:

- Kullanıcının kimliğini doğrular
- Hangi organizasyona ve role ait olduğunu kontrol eder
- Sadece yetkili olduğu işlemleri gerçekleştirmesine izin verir

➢ Rol Bazlı Erişim ve Chaincode Yetkilendirmesi

Chaincode katmanında, her işlem çağrısı yapıldığında çağrıyı başlatan kullanıcının organizasyon kimliği, Fabric'in MSP yapısı üzerinden alınmakta ve sadece belirli rollerin belirli fonksiyonlara erişebilmesine izin verilmektedir. Tablo 7.1, sistemde tanımlı her organizasyonun rol temelli yapı kapsamında yetkili olduğu işlem alanlarını özetlemektedir. Bu yapı, hem sistem içi iş bölümünün net bir şekilde tanımlanmasını

sağlamakta hem de erişim kontrolünün teknik düzeyde güvence altına alınmasına katkıda bulunmaktadır.

Tablo 7.1. *Organizasyon bazında yetkili işlem alanları*

Organizasyon	Rol	Yetkili Olduğu İşlemler
Org1	Manufacturer	Ürün ve Parti Oluşturma, Ürün Bilgilerini Zincire Kaydetme
Org2	Distributor	Sevkiyat Başlatma, Iot Cihazlarını Kaydetme ve Sistemin Gönderdiği Sıcaklık Verilerini İzleme
Org3	Pharmacy	Ürünü Teslim Alma veya Reddetme, Ürün Geçmişini Görüntüleme
Org4	Regulator	Tüm Zincir İşlemlerini Salt-Okunur Biçimde Denetleme

Bu yetkilendirme yapısı, Hyperledger Fabric'in kimlik doğrulama ve erişim kontrolü mekanizmaları ile desteklenmekte olup, her işlem çağrısı sırasında istemci kimliği kontrol edilerek yalnızca uygun organizasyonların işlem gerçekleştirmesi sağlanmaktadır. Bu sayede işlem güvenliği teknik düzeyde garanti altına alınmakta; sistemde rol ihlali veya yetkisiz erişim riski ortadan kaldırılmaktadır. Ayrıca, özellikle sıcaklık verisi gibi çevresel parametrelerin kaydedilme süreci, dağıtıcı organizasyonun manuel girişinden ziyade, taşıma sürecine entegre edilmiş olan IoT cihazlarının API aracılığıyla sisteme veri göndermesi yoluyla otomatik olarak yürütülmektedir. Böylece, taşıma koşullarının sistematik takibi sağlanmakta ve dış müdahaleye kapalı, doğrulanabilir bir veri akışı oluşturulmaktadır.

Denetleyici kurum ise sistemdeki tüm işlemleri zaman damgası ve kimlik bilgisiyle birlikte izleyebilmekte, ancak doğrudan müdahale yetkisine sahip değildir. Bu yapı, sistemin yönetişim kapasitesini güçlendiren ve kamusal hesap verebilirliği destekleyen bir mimari sağlamaktadır.

7.3. Teknik Kurulum ve Yapılandırma Süreci

Bu bölümde, geliştirilen uygulamanın Hyperledger Fabric ağı üzerinde nasıl kurulduğu ve yapılandırıldığı adım adım açıklanmaktadır. Amaç, önerilen modelin yalnızca teorik düzeyde değil, aynı zamanda teknik olarak da uygulanabilir ve test edilebilir olduğunu göstermektir. Kurulum süreci; geliştirme ortamının hazırlanmasından başlayarak, ağ bileşenlerinin oluşturulması, kanal yapılandırması, chaincode dağıtımı, API bağlantıları ve sensör verisi entegrasyonuna kadar tüm kritik aşamaları kapsamaktadır.

7.3.1. Geliştirme Ortamı ve Sistem Gereksinimleri

Uygulamanın geliştirilme ve test edilme süreci, izole ve kontrollü bir ortamda gerçekleştirilmiştir. Geliştirme ortamı olarak, Google Cloud Platform (GCP) üzerinde yapılandırılan bir Ubuntu tabanlı sanal makine (VM instance) kullanılmış; bu sayede hem

esnek kaynak yönetimi sağlanmış hem de ağ bileşenlerinin dağıtık yapıya benzer şekilde yapılandırılması mümkün olmuştur. Kurulum sürecinde kullanılan temel yazılım bileşenleri açıklamalarıyla birlikte tablo 7.2'de sunulmuştur.

Tablo 7.2. *Kurulumda kullanılan sistem bileşenleri ve açıklamaları*

Bileşen	Açıklama
Ubuntu (GCP VM)	Uygulamanın Tamamı Virtualbox Üzerinde Yapılandırılmış Bu İşletim Sistemi Üzerinde Çalıştırılmıştır.
Docker	Hyperledger Fabric Bileşenlerinin (Peer, Orderer, CA) Konteyner Olarak Çalıştırılması İçin Kullanılmıştır.
Docker Compose	Birden Fazla Servisin Senkronize Biçimde Yönetilmesi Amacıyla Tercih Edilmiştir.
Node.js	API Katmanı, Fabric SDK ve Chaincode İçin Javascript Tabanlı Çalışma Ortamıdır.
Npm	Node.Js Bağımlılıklarının Yönetimi ve Modül Kurulumu İçin Kullanılmıştır.
MongoDB	API Tarafında Kullanıcı ve Kimlik Yönetimi Verilerinin Tutulduğu Veritabanı Bileşenidir.
Hyperledger Fabric	Blok Zincir Ağının Temel Bileşenlerini (Peer, Orderer, CA, Chaincode) İçeren Sürümdür.
Postman	API Testleri ve Uçtan Uca İşlem Senaryolarının Doğrulanması İçin Kullanılmıştır.
Visual Studio Code	Geliştirme Ortamı Olarak Tercih Edilen Entegre Editördür.

Bu sistem konfigürasyonu sayesinde, ağ bileşenlerinin dağıtık sistem senaryolarını taklit edecek biçimde bağımsız olarak yönetilmesi mümkün kılınmıştır. GCP üzerinde çalışan sanal makine altyapısı hem uzaktan erişim kolaylığı sağlamış hem de zincir üzerindeki işlemlerin izole biçimde denenmesine olanak tanımıştır.

7.3.2. Ağ Kurulumu ve Blok Zincir Yapılandırması

Bu bölümde, ilaç tedarik zincirine özel olarak tasarlanan Hyperledger Fabric ağı üzerinde yürütülen kurulum süreci detaylı şekilde açıklanmaktadır. Sistem, dört temel organizasyona (üretici, dağıtıcı, eczane ve denetleyici kurum) karşılık gelen birer peer düğümü, her peer için ayrı bir CouchDB veritabanı ve bir üçlü orderer kümesi (Raft konsensüsü ile) içermektedir. Yapı, Docker Compose altyapısı üzerinden yönetilmekte ve GCP üzerinde barındırılan Ubuntu tabanlı bir sanal makine üzerinde çalıştırılmaktadır.

Ağ Bileşenlerinin Genel Yapısı:

- Peer Düğümleri:

- peer1.manufacturer.com → Üretici organizasyonunun eş düğümü
- peer1.distributor.com → Dağıtıcı organizasyonunun eş düğümü
- peer1.pharmacy.com → Eczane organizasyonunun eş düğümü
- peer1.regulator.com → Denetleyici kurumun eş düğümü

- CouchDB Veritabanları:

- couchdb1: Üreticiye ait ledger verisi
- couchdb2: Dağıtıcıya ait ledger verisi
- couchdb3: Eczaneye ait ledger verisi
- couchdb4: Denetleyici kuruma ait salt-okunur ledger verisi

- Orderer Kümesi (Raft Konsensüs):

- orderer1.com, orderer2.com, orderer3.com

Bu mimari, her organizasyonun kendi işlem geçmişini güvenli biçimde yönetebilmesini ve zincir üzerindeki verilerin dağıtık biçimde depolanmasını sağlamaktadır. Ayrıca, ledger verilerinin sorgulanabilir olması açısından tüm peer düğümleri CouchDB ile yapılandırılmıştır. Sistemde TLS etkinleştirilmiş olup, her düğüm kendi X.509 sertifikaları aracılığıyla kimliklendirilmiştir.

Orderer Yapısı ve Raft Konsensüs Mekanizması

Hyperledger Fabric mimarisinde işlemlerin bloklara dönüştürülmesi ve sıraya alınması, orderer düğümleri aracılığıyla sağlanmaktadır. Bu çalışmada, yüksek güvenilirlik ve ağ sürekliliğini temin etmek amacıyla üç adet orderer düğümünden oluşan bir Raft tabanlı sıralama kümesi yapılandırılmıştır.

Raft algoritması, Hyperledger Fabric'in izinli ağ yapısına uygun olarak, merkezi olmayan bir lider seçimi ve log replikasyonu prensipleriyle çalışmaktadır. Sistemdeki orderer düğümleri arasında biri lider olarak atanmakta, blok üretimi bu lider tarafından yürütülmektedir. Diğer orderer düğümleri ise oluşturulan blokları alarak kendi defterlerine kaydetmektedir.

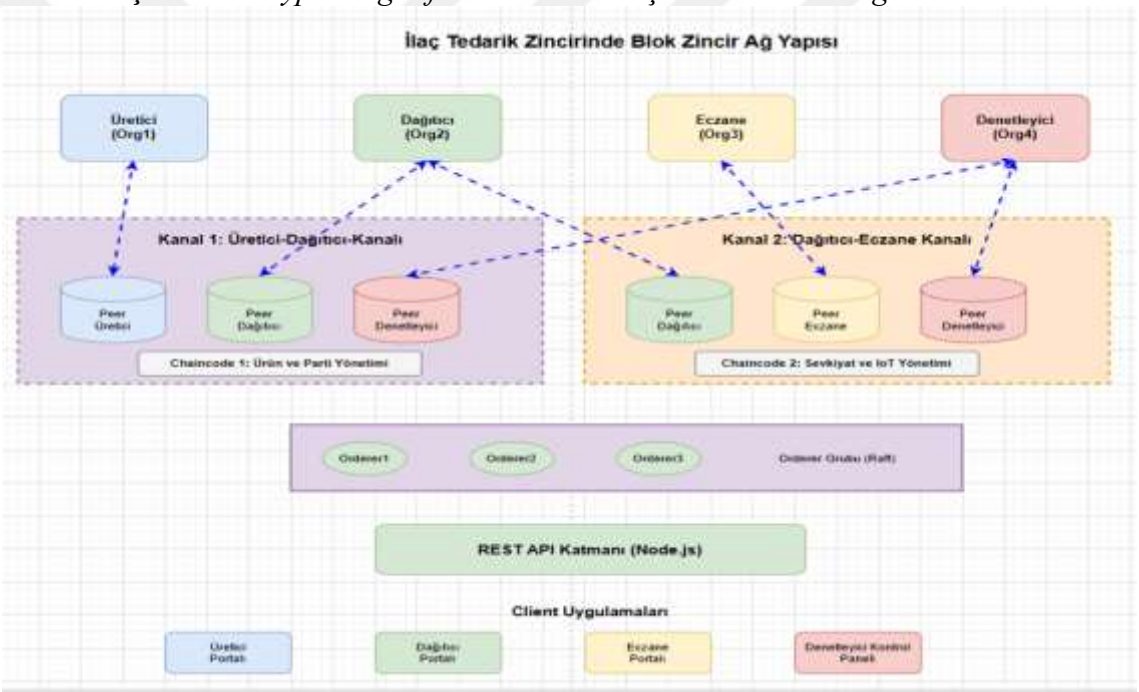
Bu yapı sayesinde:

- Blok üretimi sürekliliği sağlanmakta,
- Tek bir orderer düğümüne bağımlılık ortadan kalkmakta,
- Ağ çökmesine karşı tolerans artırılmakta,
- Farklı organizasyonlardan gelen işlemlerin sıralı, tutarlı ve şeffaf şekilde kaydedilmesi mümkün olmaktadır.

Raft algoritmasının tercih edilmesinin temel nedenleri arasında, bizans hata toleransı gerektirmemesi, yüksek performans sunması ve daha sade konfigürasyon gereksinimi öne çıkmaktadır. Kurumsal tedarik zinciri gibi uygulamalarda, bu yapı hem teknik açıdan kararlı bir blok üretimi sağlar hem de yönetişimsel izlenebilirlik açısından bütüncül bir çözüm sunar.

Bu mimari yapıyı daha iyi kavrayabilmek adına sistemin genel ağ şeması şekil 7.1'de sunulmuştur. Şemada, her organizasyona karşılık gelen peer'ler, bunların yer aldığı kanallar, uygulanan chaincode türleri, orderer kümesi ve client katmanları bir bütün olarak gösterilmektedir.

Şekil 7.1. *Hyperledger fabric tabanlı ilaç tedarik zinciri ağ mimarisi*



Diyagramda, dört temel organizasyonun (Üretici, Dağıtıcı, Eczane ve Denetleyici) sisteme birer peer düğümüyle katıldığı görülmektedir. Her organizasyonun belirli kanallar üzerinden veri paylaşımına katıldığı bu yapıda:

- Kanal-1: (Üretici–Dağıtıcı Kanalı), ürün ve parti bilgilerinin kayıt altına alındığı alanı temsil ederken,
- Kanal-2: (Dağıtıcı–Eczane Kanalı), sevkiyat süreci, sıcaklık verileri ve ihlal yönetimi işlemlerini barındırmaktadır.

Her kanal, yalnızca ilgili organizasyonların erişimine açıktır ve kendi özel chaincode yapısını kullanır. Ağın merkezinde yer alan Orderer Grubu, blok üretimi ve işlemlerin

sıralanmasından sorumludur. Alt katmanda ise REST API Katmanı, client uygulamalarıyla ağ arasında köprü görevi görmektedir. Bu katman üzerinden, üretici, dağıtıcı, eczane ve denetleyici arayüzleri sistemle etkileşim kurar.

Bu şema, sistemin dağıtık yapısını, kurumsal sorumluluk alanlarını ve işlevsel katmanlarını bütüncül biçimde ortaya koymakta; yapılandırılan ağ mimarisinin kurumsal blok zincir prensipleriyle nasıl örtüştüğünü açıkça göstermektedir.

7.3.3. Kanal Yapılandırması ve Chaincode Dağıtımı

Geliştirilen uygulama modelinde, organizasyonlar arası veri erişimi ve işlem sınırlarının yönetilebilmesi amacıyla Hyperledger Fabric'in kanal yapısı kullanılmıştır. Her kanal, yalnızca ilgili organizasyonların işlem gerçekleştirmesine olanak tanırken, özel chaincode'lar aracılığıyla bu kanallara özgü iş kuralları tanımlanmıştır. Bu bölümde, kanal oluşturma, organizasyonların bu kanallara dahil edilmesi ve chaincode dağıtımı süreci detaylı biçimde açıklanmaktadır.

7.3.3.1. Kanal Tanımları ve İşlevleri

Bu modelde, veri gizliliğini ve işlem sınırlarını kurumsal düzeyde yönetebilmek için iki kanal yapılandırılmıştır. Her kanal yalnızca ilgili organizasyonları kapsamakta ve belirli işlem türlerine özgülenmiş chaincode'ları barındırmaktadır:

- Kanal-1 (producer-distributor-channel): Ürün ve parti kayıtlarının gerçekleştirildiği üretimden dağıtıma ilk geçişin sağlandığı kanaldır. Üretici ve dağıtıcı aktif işlem yetkisine sahipken, denetleyici kurum yalnızca izleme yapar.
- Kanal-2 (distributor-retailer-channel): Sevkiyat süreci, sıcaklık takibi ve teslimat kontrolü bu kanal üzerinden yürütülür. Dağıtıcı veri girer, eczane ürünü doğrular; denetleyici tüm işlemleri pasif biçimde gözlemler.

Bu yapı sayesinde her organizasyon yalnızca kendi yetki alanında işlem gerçekleştirebilir; böylece veri bütünlüğü ve kurumsal sorumluluk zinciri güvence altına alınır.

7.3.3.2. Kanal Oluşturma Süreci

Kanal yapısı, Hyperledger Fabric ağı üzerinde organizasyonlar arası iletişim sınırlarını belirlemek ve veri paylaşımını izole biçimde yönetmek amacıyla yapılandırılmıştır. Bu projede her kanalın kurulumu ve konfigürasyonu, script dosyaları kullanılarak otomatikleştirilmiş şekilde gerçekleştirilmiştir. Kurulum süreci aşağıdaki adımlarla yürütülmüştür:

➢ Adım-1: Kanal Konfigürasyon Dosyalarının Hazırlanması

Her kanal için configtx.yaml dosyası içerisinde ilgili profil tanımlamaları yapılmış ve kanal konfigürasyonları (anchor peer, organizasyon MSP'leri vb.) bu dosya üzerinden oluşturulmuştur.

➢ Adım-2: Kanal Oluşturma Script'inin Çalıştırılması

Her kanal için özel olarak yazılmış "*create-mychannel.sh"* benzeri bir bash betiği kullanılmıştır. Bu betik:

- Kanal blok dosyasını *(channel.tx*) oluşturur,
- Kanalı başlatır (peer channel create komutu),
- İlgili organizasyonların peer düğümlerini bu kanala dahil eder (peer channel join),
- Anchor peer yapılandırmalarını uygular (peer channel update).

➢ Adım-3: Katılımcı Organizasyonların Kanala Dahil Edilmesi

Her bir organizasyona ait peer, kanal oluşturulduktan sonra ilgili MSP bilgileriyle kanala katılmıştır. Her peer'in "*core.yaml"* ve TLS yapılandırmaları, katılım sırasında aktif hale getirilmiştir.

➢ Adım-4: Anchor Peer Tanımlamaları

Organizasyonlar arası veri aktarımını koordine etmek amacıyla, her organizasyonun birinci peer düğümü anchor peer olarak tanımlanmıştır. Bu yapılandırma sayesinde peer-to-peer veri yayılımı (gossip protokolü) etkinleşmiş ve kanal içi veri paylaşımı optimize edilmiştir.

Bu süreç sonunda, her organizasyon yalnızca yetkili olduğu kanallarda işlem gerçekleştirebilecek şekilde ağa entegre edilmiş ve kanal yapılandırmaları başarıyla tamamlanmıştır.

7.3.3.3. Chaincode Yapısı ve Fonksiyonel Tasarım

Geliştirilen sistemde, ilaç tedarik zincirinin üretimden dağıtıma ve son kullanıcıya teslimata kadar olan süreci yönetmek amacıyla iki ayrı chaincode modülü tasarlanmıştır. Her chaincode, kendi kanalında faaliyet gösteren aktörlerin rollerine göre özelleştirilmiş işlemleri gerçekleştirmektedir. Kodlar, Hyperledger Fabric'in *fabric-contract-api* kütüphanesi kullanılarak JavaScript diliyle geliştirilmiştir. Aşağıdaki Tablo 7.3, her iki

chaincode'un temel fonksiyonlarını ve bu fonksiyonların sistem üzerindeki görevlerini özetlemektedir.

Tablo 7.3. *Chaincode fonksiyonları ve görevleri*

Fonksiyon Adı	Chaincode	Açıklama
CreateAsset(ctx, assetData)	Her ikisi	JSON Formatında Varlık Verisi Alarak Zincire Kayıt İşlemi Gerçekleştirir. Chaincode 1'de Ürün ve Parti; Chaincode 2'de Sevkiyat Ya da Sensör Verisi Olarak Kullanılır.
getAssetByID(ctx, id)	Her ikisi	Belirli Bir ID'ye Sahip Varlık Verisini World State Üzerinden Alır ve Kullanıcıya Sunar.
assetExists(ctx, id)	Her ikisi	İlgili ID'ye Sahip Bir Kaydın Zincirde Mevcut Olup Olmadığını Kontrol Eder.
getAssetHistory(ctx, id)	Her ikisi	Belirli Bir Varlığın Blok Zinciri Üzerindeki Tüm İşlem Geçmişini Zaman Damgası ile Listeler.
getDataForQuery(...)	Her ikisi	JSON Tabanlı Sorgularla Zincirde Yer Alan Verileri Filtrelemeyi Sağlar.
getDataWithPagination(...)	Her ikisi	Büyük Veri Kümeleri Üzerinde Sayfalama Desteğiyle Sorgu İşlemi Yapılmasını Sağlar.
AddIOTEvent(ctx, iotData)	2	Iot Cihazından Gelen Sıcaklık Verisini İşler. Tanımlı Limitler Aşıldığında Zincire Otomatik Olarak "İncident" (İhlal) Kaydı Oluşturur.

Her bir fonksiyon, sistemdeki kurumsal aktörlerin yalnızca kendi görev tanımları doğrultusunda işlem gerçekleştirmelerini sağlayacak şekilde yetkilendirilmiştir. Chaincode 1, üretici ve dağıtıcı organizasyonlar tarafından kullanılırken; Chaincode 2, ağırlıklı olarak dağıtıcı, eczane ve denetleyici organizasyonların işlem akışlarını desteklemektedir.

7.3.3.4. Chaincode Dağıtımı ve Onay Süreci

Hyperledger Fabric mimarisinde chaincode, yalnızca yazılıp kaydedilen kod parçaları değil; aynı zamanda belirli bir yaşam döngüsü çerçevesinde ağa tanıtılması, organizasyonlar tarafından onaylanması ve işlemeye açılması gereken yazılım bileşenleridir. Bu süreç, çok aktörlü sistem yapısının gerektirdiği şeffaflık, denetlenebilirlik ve güvenlik hedeflerini gerçekleştirmek açısından kritik önem taşımaktadır. Bu bağlamda, geliştirilen ilaç tedarik zinciri uygulamasında kullanılan her iki chaincode, Hyperledger Fabric'in önerdiği dağıtım ve onay aşamaları izlenerek ağa entegre edilmiştir. Söz konusu süreç şu şekilde işlemiştir:

- Paketleme: Chaincode, dağıtıma hazır hâle getirilmek üzere sistem tarafından tanınabilir bir dosya yapısına dönüştürülür. Bu işlem, chaincode'un kimliğini ve sürüm bilgisini belirleyerek sonraki adımlara temel oluşturur.

- Kurulum (Install): Paketlenmiş chaincode, ağa dahil olacak her organizasyonun peer düğümüne yüklenir. Böylece her organizasyon, söz konusu akıllı sözleşmenin kendi tarafındaki yürütme altyapısını hazırlamış olur.
- Onaylama (Approve): Her organizasyon, kendi peer düğümü üzerinden chaincode'a onay verir. Bu adım, uygulama mantığının tüm katılımcılarca mutabakatla kabul edildiğini gösteren yönetişimsel bir mekanizma işlevi görür.
- Dağıtım ve İşleme Açma (Deploy / Commit): Gerekli onaylar tamamlandıktan sonra, chaincode blok zincir ağına kalıcı olarak entegre edilir. Bu aşama, "commit" işlemi olarak adlandırılmakta olup, chaincode'un artık aktif hâle geldiği, sistem tarafından çağrılabilir ve işlem yapılabilir olduğu anlamına gelir.

Bu süreç yalnızca teknik bir kurulum prosedürü değil; aynı zamanda organizasyonlar arası denge, yetki sınırları ve işlem disiplinini garanti altına alan bir yönetişim mekanizmasıdır. Chaincode'un dağıtılması ve etkinleştirilmesi, sistemin güvenli, kontrollü ve sürdürülebilir biçimde çalışması açısından temel bir yapı taşıdır.

7.3.3.5. Chaincode Test Ortamında Doğrulama

Chaincode'un başarılı şekilde dağıtılmasının ardından, akıllı sözleşme fonksiyonlarının işlevselliği test ortamında doğrulanmıştır. Bu doğrulama süreci, geliştirilen senaryo kapsamında tanımlı olan ürün kaydı, sevkiyat transferi, sıcaklık ihlali bildirimi ve geçmiş kayıt sorgulama gibi işlemlerin hem teknik hem de mantıksal olarak doğru biçimde çalıştığını ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Testler, geliştirilen peer düğümleri üzerinde çalışmakta olan Hyperledger Fabric test ağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Chaincode'a ait tüm işlemler, komut satırı arayüzü ve REST API üzerinden çağrılmış ve sistemin işleyişi çeşitli senaryolar üzerinden gözlemlenmiştir. Özellikle aşağıdaki alanlarda doğrulama yapılmıştır:

- Kayıt İşlemleri: Ürün ve üretim partisi bilgilerinin *CreateAsset()* fonksiyonu aracılığıyla zincire eksiksiz biçimde kaydedildiği görülmüştür. Verilerin hem JSON formatında hem de belirli veri kurallarına uygun olarak işlendiği doğrulanmıştır.
- Sorgulama İşlemleri: *getAssetByID()* ve *getAssetHistory()* gibi fonksiyonlar üzerinden belirli ürünlerin durum bilgisi ve işlem geçmişi başarıyla görüntülenmiştir. Bu işlem, sistemin geriye dönük izlenebilirlik özelliğini teknik olarak kanıtlamaktadır.

- IoT Tabanlı Veri Girişi: *AddIOTEvent()* fonksiyonu test edilmiş; bu fonksiyon aracılığıyla taşıma sürecindeki sıcaklık verisinin zincire otomatik biçimde işlendiği ve eşik değerlerin aşılması durumunda sistemin zincir üzerine ihlal bildirimi ürettiği gözlemlenmiştir.
- Veri Doğruluğu ve Zaman Damgası: Sisteme kaydedilen tüm işlem kayıtlarının UTC formatında zaman damgası içerdiği, böylece olayların kronolojik analizine imkân tanıdığı tespit edilmiştir.

Bu test süreci, geliştirilen chaincode yapısının senaryo gerekliliklerini teknik düzeyde karşıladığını göstermektedir. Testler hem komut satırından hem de Postman üzerinden REST API çağrılarıyla yürütülerek kullanıcı etkileşimi de göz önünde bulundurulmuştur.

7.3.4. Uygulama Arayüzü ve Gateway Katmanı

Geliştirilen blok zincir tabanlı sistemin yalnızca komut satırı üzerinden değil, aynı zamanda web tabanlı arayüzler aracılığıyla da kullanılabilir olması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, Hyperledger Fabric ağı üzerinde çalışan chaincode ile etkileşim kurmak için Node.js tabanlı bir Gateway uygulaması yapılandırılmış; her organizasyon için ayrı bir web API sunucusu geliştirilmiştir.

➢ Gateway Katmanı

Gateway uygulaması, fabric-network modülü kullanılarak Hyperledger Fabric ağına bağlantı sağlayan bir istemci bileşeni olarak tasarlanmıştır. Her API sunucusu, kendi organizasyonuna ait connection profile ve cüzdan (wallet) dosyalarını kullanarak ağa kimlik doğrulamalı şekilde bağlanır. Bu yapı, aşağıdaki temel bileşenleri içerir:

- *fabricNetwork.js:* Gateway bağlantısını yöneten yapı
- *wallet/:* Organizasyona özel kullanıcı kimliklerini içeren dizin
- *connection-.json:* Ağa erişimi sağlayan bağlantı profili dosyaları
- *enrollAdmin.js* ve *registerUser.js:* Kullanıcı kayıt ve kimlik işlemlerini yöneten betikler

Her bir işlem çağrısı, kullanıcının organizasyon kimliğine göre yetkilendirilmekte ve yalnızca izin verilen fonksiyonlara erişim sağlanmaktadır.

➢ Organizasyon Bazlı Web API'ler

Sistem mimarisi gereği, her bir paydaş (üretici, dağıtıcı, eczane ve denetleyici kurum) için ayrı birer API sunucusu yapılandırılmıştır. Bu sunucular, Express.js tabanlı olup kendi içlerinde modüler bir yapıdadır:

- *manufacturers/*
- *distributors/*
- *pharmacies/*
- *regulatories/*

Her sunucu, aşağıdaki klasörleri içerir:

- *controllers/:* API uç noktalarındaki iş mantığını içerir
- *routes/:* HTTP isteklerinin yönlendirildiği rotaları tanımlar
- *models/:* JSON veri yapıları ile etkileşim sağlayan tanımlar
- *middleware/:* Kimlik doğrulama ve hata yönetimi gibi arayüz kontrol mekanizmalarını içerir
- Kimlik Doğrulama ve Erişim Yönetimi

Kullanıcılar, sisteme JWT ile giriş yapmaktadır. Sisteme başarılı giriş yapan her kullanıcı, sahip olduğu rol doğrultusunda sadece yetkili olduğu fonksiyonlara erişim sağlayabilir. Örneğin:

- Üretici; Ürün ve parti oluşturabilir, ürün bilgilerini zincire kaydedebilir ve ürünü dağıtıcıya devredebilir
- Dağıtıcı; Sevkiyat başlatabilir, IoT cihazlarını kaydedebilir, sistemin gönderdiği sıcaklık verilerini izleyebilir ve ihlal bildirimlerini doğrulayabilir
- Eczane; Ürünü teslim alabilir veya reddedebilir, ürün geçmişini görüntüleyebilir
- Denetleyici kurum, tüm zincir işlemlerini salt-okunur şekilde inceleyebilir

Bu yapı sayesinde, her aktör yalnızca kendi kurumsal rolü doğrultusunda işlem yapabilmekte, yetki dışı müdahalelerin önüne geçilmektedir. Özellikle denetleyici kurumun yalnızca okuma iznine sahip olması, sistemin yönetişim şeffaflığını artırmakta ve denetim süreçlerinde güvenilir veri erişimi sağlamaktadır. Böylelikle sistem hem işlem güvenliği hem de kurumsal hesap verebilirlik ilkelerine uygun biçimde yapılandırılmıştır.

➢ Uygulama Test Süreci ve API Çağrıları

Her API uç noktası Postman üzerinden test edilmiş olup aşağıdaki işlem akışı başarıyla çalıştırılmıştır:

1. Kullanıcının sisteme giriş yapması (login)
2. Kimlik doğrulama sonrasında ürün kaydı, transfer, sıcaklık güncelleme, ihlal bildirimi ve ürün kabul-red işlemlerinin gerçekleştirilmesi
3. Sistem yanıtlarının HTTP 200 OK durum kodları ile dönmesi
4. Blok zinciri verisinin güncellendiğinin CouchDB üzerinden izlenmesi

Bu yapı sayesinde, geliştirilen sistem teknik düzeyde kullanıcılara hitap eden, erişilebilir ve yönetilebilir bir dijital arayüz sunmuştur.

➢ Hyperledger Explorer Entegrasyonu

Uygulamanın görsel analizini ve blok düzeyinde denetimini desteklemek amacıyla sisteme Hyperledger Explorer aracı da entegre edilmiştir. Bu araç sayesinde, blok zincir ağı üzerinde gerçekleşen işlemler, blok üretimi, zincire kaydedilen veri yapıları ve eş düğümlerin durumu web tabanlı bir arayüz üzerinden görsel olarak izlenebilmektedir.

Explorer arayüzü üzerinden aşağıdaki işlemler gerçekleştirilebilmektedir:

- Oluşturulan her bloğun içeriği ve işlem detayları izlenebilir
- Hangi işlem hangi kullanıcı tarafından, hangi zamanda yapılmış görüntülenebilir
- Chaincode'ların hangi kanalda çalıştığı ve hangi organizasyonların eriştiği bilgisi takip edilebilir
- Ağ üzerindeki peer düğümlerinin ve orderer yapılarının durumu gözlemlenebilir

Bu entegrasyon, özellikle denetleyici kurumun sistemdeki işlemleri şeffaf biçimde izleyebilmesi açısından önemli bir katkı sunmakta; aynı zamanda modelin izlenebilirlik düzeyini göstermek açısından önemli bir görsel denetim aracı sunmaktadır.

7.3.5. Uçtan Uca İşlem Akışı ve Senaryo Uygulaması

Bu bölümde, geliştirilen Hyperledger Fabric tabanlı sistemin ilaç tedarik zincirindeki işleyişi, soğuk zincir kırılması senaryosu üzerinden adım adım ortaya konulmaktadır. İlk olarak, senaryoya ilişkin görsel diyagramlar yardımıyla genel sürece dair bir anlayış

sunulmakta; ardından sistemde yer alan her organizasyonun gerçekleştirdiği işlemler sırasıyla açıklanmaktadır. Bu yapı sayesinde okuyucu, genel iş akışını bütüncül bir bakış açısıyla kavrarken, aynı zamanda süreci oluşturan adımları ve ayrıntılı işlemleri de aşamalı olarak takip edebilmektedir. Böylelikle sistemin hem üst düzey işleyişi hem de detaylı operasyonel süreçleri açık ve anlaşılır bir şekilde ortaya konulmaktadır.

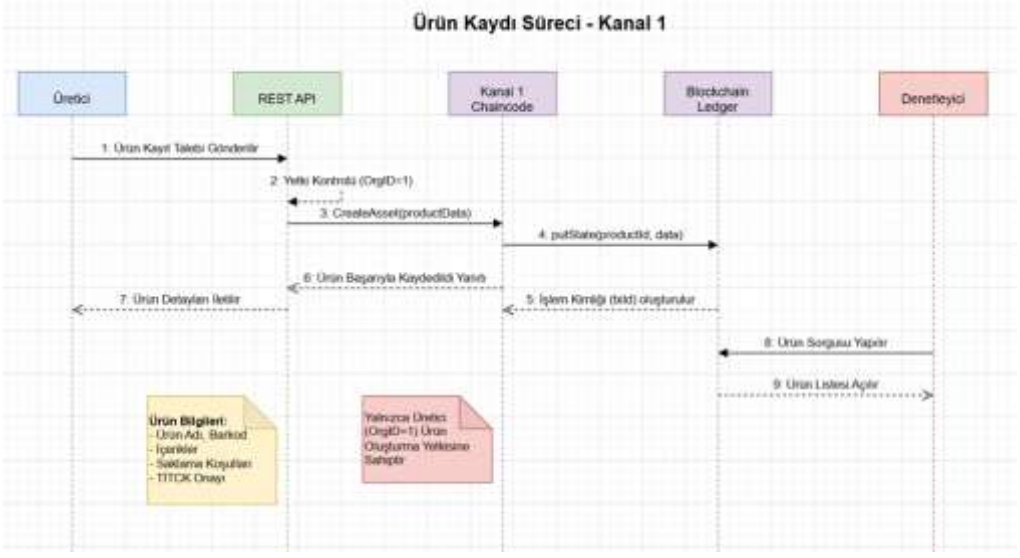
7.3.5.1. Senaryo Kurgusu ve İşlem Adımlarıyla Süreç İlerlemesi

Aşağıdaki adımlar, modelin üretimden teslimata kadar olan tüm süreci nasıl yönettiğini açıklamaktadır. Her adım, ilgili aktörlerin sistemde gerçekleştirdiği işlemleri içermekte; görsel diyagramlar bu işlemleri bütünsel biçimde desteklemektedir.

1. Ürün ve Partinin Üretici Tarafından Kaydedilmesi

Senaryonun ilk adımında, üretici organizasyon (Org1), ürün bilgilerini ve bu ürüne ait üretim partisi detaylarını sisteme kaydeder. Bu kayıt sırasında ürün kimliği, ürün adı, barkod numarası, üretim ve son kullanma tarihi, saklama koşulları ve sıcaklık aralığı gibi bilgiler zincire işlenir. Aynı işlem içinde bu ürünün bir parti içinde tanımlandığı da belirtilir.

Şekil 7.2. *Ürün kaydı ve parti oluşturma süreci*



İşlem Adımları: Ürün Kaydı Süreci – Kanal 1

Adım-1: Ürün kayıt talebinin gönderilmesi:

Üretici organizasyon (Org1), blok zincir sistemine yeni bir ilaç ürününü tanımlamak amacıyla sistemin arayüzü (REST API) üzerinden ürün kayıt işlemini başlatır. Bu işlem

kapsamında sisteme şu veriler iletilir: ürün adı, barkod bilgisi, içerik bileşenleri ve saklama koşulları.

Adım-2: Kullanıcı yetkisinin doğrulanması:

REST API, işlemi gerçekleştiren kullanıcının yalnızca üretici (OrgID=1) olup olmadığını kontrol eder. Yalnızca üretici rolüne sahip kullanıcıların ürün kaydı yapmasına izin verilir.

Adım-3: Chaincode fonksiyonunun çağrılması:

Yetkili kullanıcı doğrulandıktan sonra, iletilen ürün bilgileri sistemin akıllı sözleşme bileşeni olan chaincode'a aktarılır. Bu işlem, yeni bir ürün varlığının oluşturulması için gerekli olan kayıt sürecinin başlatılmasını sağlar.

Adım-4: Ürün bilgilerinin blok zincir kayıt defterine yazılması:

Chaincode bileşeni, ürün bilgilerini blok zincir üzerindeki dağıtık kayıt defterine kalıcı şekilde kaydeder. Bu işlem sonucunda ürün verisi değiştirilemez biçimde blok zincire işlenmiş olur.

Adım-5: İşlem kimliğinin oluşturulması:

Ürün verisinin blok zincire başarıyla kaydedilmesinin ardından, sisteme özgü bir işlem kimliği (txId) otomatik olarak üretilir. Bu kimlik, işlemin takip edilebilirliği ve geriye dönük doğrulanması açısından önem taşır.

Adım-6: Ürün Kaydının Başarıyla Tamamlandığına Dair Yanıt:

Blok zincir işlemi başarıyla tamamlandıktan sonra, sistem tarafından ürünün başarıyla kaydedildiğine dair onay mesajı iletilir. Böylece ürün artık sistemde geçerli bir varlık (asset) olarak tanımlanmış olur.

Adım-7: Ürün Bilgilerinin Üreticiye İletilmesi:

Kaydı tamamlanan ürüne ilişkin detay bilgiler (örneğin ürün kimliği, işlem durumu ve zaman damgası) üretici kuruluşa bildirilir.

Adım-8: Denetleyici Kurum Tarafından Ürün Sorgulama İşlemi:

Denetleyici kurum (Org4), sistemde kayıtlı ürün bilgilerine erişmek amacıyla sorgulama talebinde bulunur. Bu işlem, sistemde şeffaflık ve izlenebilirliği sağlamak için önemlidir.

Adım-9: Ürün listesinin denetleyiciye iletilmesi:

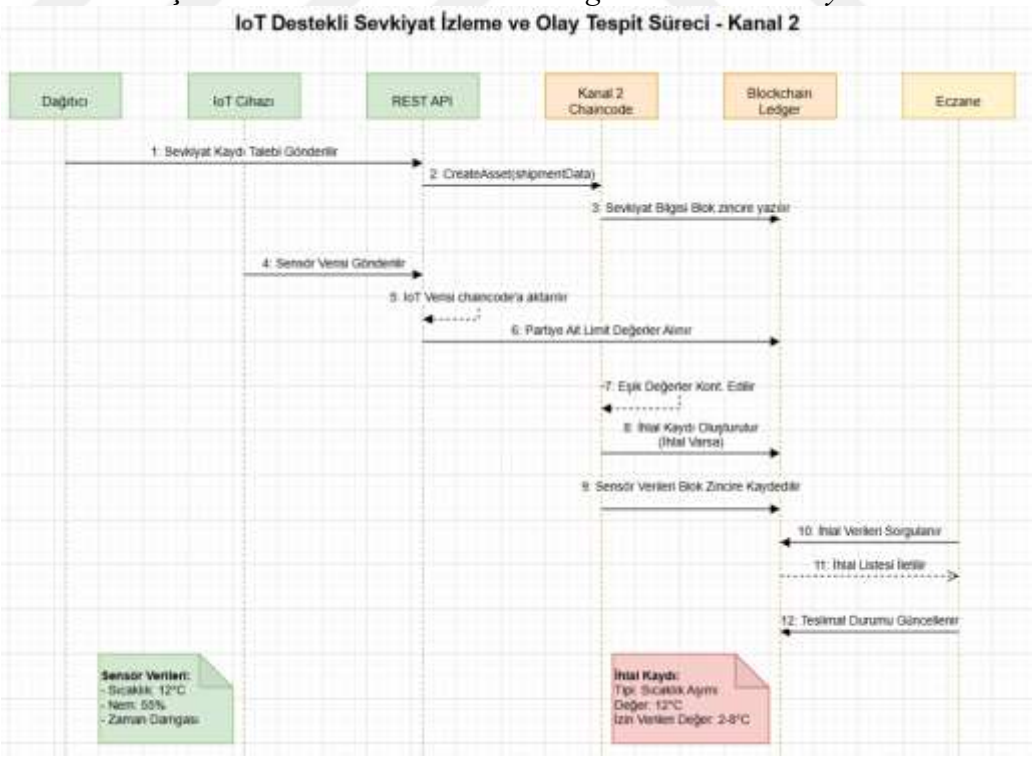
Sistem, denetleyici kuruma kayıtlı tüm ürünlerin listesini içeren sorgu yanıtını iletir. Bu liste sayesinde denetleyici kurum, ürünlerin üretim bilgilerini ve güncel durumlarını görüntüleyebilir.

2. Ürünün Dağıtıcıya Transfer Edilmesi ve Sıcaklık Verisinin Otomatik Olarak Zincire Kaydedilmesi

Kaydedilen ürün, zincir üzerinde sahiplik aktarımı yoluyla üreticiden dağıtıcıya devredilir. Bu transfer işlemi, sistemde bir sevkiyatın başlangıcı anlamına gelir. Aynı anda, IoT cihazlarının tanımlandığı ve sevkiyat sürecinde kullanılacak olan sıcaklık sensörlerinin sisteme entegre edildiği aşamaya geçilir.

Taşıma süreci sırasında dağıtıcı organizasyonun sistemine bağlı IoT sensör cihazları, sıcaklık verilerini belirli aralıklarla otomatik olarak zincire kaydeder. Eğer bu veriler, ürünün belirlenen sıcaklık aralığı dışına çıkarsa (örneğin 8°C üzeri), sistem zincir üzerinde otomatik olarak bir soğuk zincir ihlali (temperature breach) kaydı oluşturur. Bu kayıt; olayın zamanı, sıcaklık değeri, eşik değerin ne kadar aşıldığı gibi bilgileri içerir.

Şekil 7.3. *IoT sensör verisi ve soğuk zincir ihlali kaydı*



İşlem Adımları: IoT Destekli Sevkiyat İzleme ve İhlal Tespit Süreci – Kanal 2

Adım-1: Sevkiyat Kaydı Talebinin Gönderilmesi

Dağıtıcı kuruluş tarafından, sisteme yeni bir ilaç sevkiyatının tanımlanması amacıyla REST API aracılığıyla sevkiyat kaydı talebi iletilir. Bu talep, ürünün hangi partiye ait olduğu, taşıma noktaları ve diğer sevkiyat bilgilerini içerir.

Adım-2: Sevkiyat Verisinin Chaincode'a Aktarılması

REST API katmanı, alınan sevkiyat verilerini Kanal 2 üzerinde çalışan chaincode'a iletir. Bu işlem, sistemde yeni bir sevkiyat varlığının oluşturulmasını sağlar.

Adım-3: Sevkiyat Bilgisinin Blok Zincire Yazılması

Chaincode, sevkiyat verilerini kalıcı olarak blok zincir defterine kaydeder. Böylece bu bilgiler değiştirilemez bir şekilde kayıt altına alınır.

Adım-4: Sensör Verisinin Gönderilmesi

Taşıma sürecinde kullanılan IoT cihazı, gerçek zamanlı olarak sıcaklık, nem ve zaman damgası içeren çevresel verileri sistemle paylaşır.

Adım-5: Sensör Verisinin Chaincode'a Aktarılması

REST API, alınan sensör verisini chaincode'a iletir. Bu işlem, taşınan ürünün koşullarının kontrol edilmesini sağlar.

Adım-6: Parti Limit Değerlerinin Alınması

Chaincode, gönderilen sensör verisini karşılaştırmak üzere ilgili ürün partisine ait tanımlı taşıma koşullarını (örneğin sıcaklık sınırları) sistemden alır.

Adım-7: Eşik Değerlerin Kontrol Edilmesi

Alınan çevresel veriler, sistemde önceden tanımlı eşik değerlerle karşılaştırılır. (Örneğin izin verilen sıcaklık aralığı 2–8°C ise ve veri 12°C ise bu bir ihlaldir)

Adım-8: İhlal Kaydının Oluşturulması (Varsa)

Eşik değerlerin aşıldığı tespit edilirse, sistem otomatik olarak bir ihlal kaydı oluşturur. Bu kayıt, ürünün taşınma sürecinde kaliteye zarar gelmiş olabileceğini gösterir.

Adım-9: Sensör Verisinin Blok Zincire Kaydedilmesi

Sensör verisi, chaincode aracılığıyla blok zincire kaydedilerek kayıt altına alınır. Böylece taşıma süreciyle ilgili tüm çevresel koşullar kalıcı hale gelir.

Adım-10: İhlal Verilerinin Sorgulanması

Eczane, ürünün teslimatını gerçekleştirmeden önce ilgili sevkiyatla ilişkili ihlal kayıtlarını sorgular.

Adım-11: İhlal Listesinin Eczaneye İletilmesi

Sistem, ilgili sevkiyat kimliğine (shipment ID) ait tüm ihlal geçmişini içeren listeyi eczaneye gönderir.

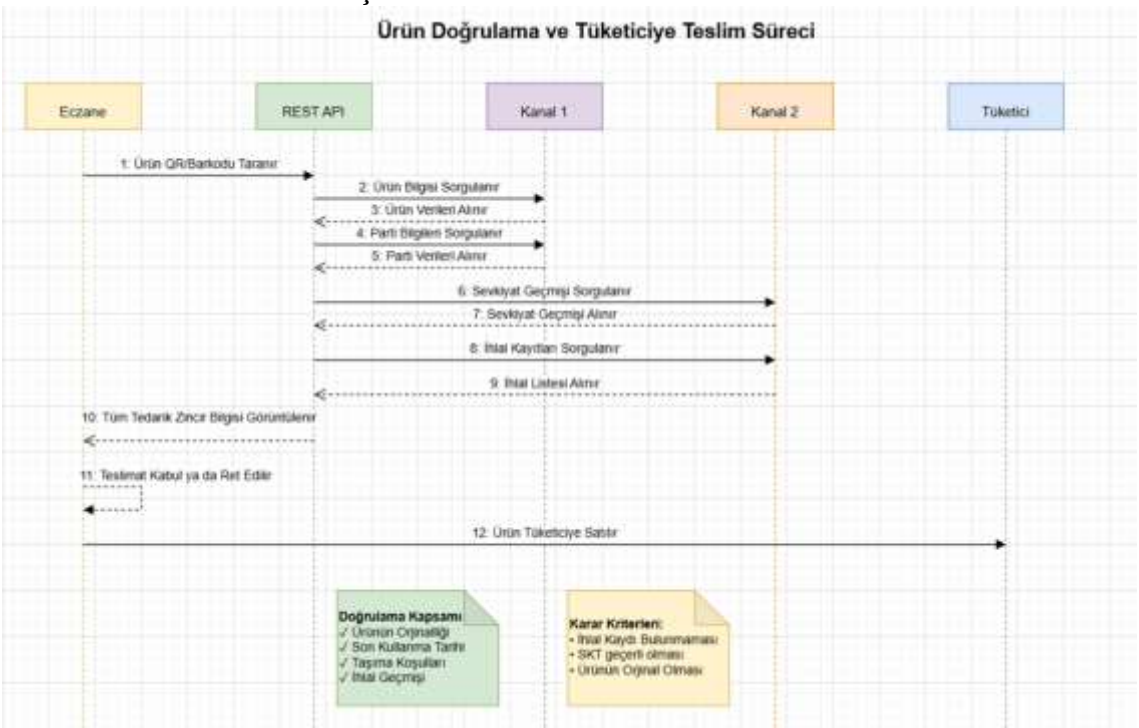
Adım-12: Teslimat Durumunun Güncellenmesi

Eczane, doğrulama süreci tamamlandıktan sonra ürünü kabul eder veya reddeder. Bu karara göre sistemdeki teslimat durumu güncellenir.

3. Ürünün Eczane Tarafından Teslim Alınması veya Reddedilmesi

Eczane, ürünü teslim alma sürecinde zincir geçmişini kontrol eder. Eğer taşıma sırasında herhangi bir sıcaklık ihlali yaşanmışsa, bu geçmiş verilerden tespit edilir. Eczane, sistem üzerinden ürünü kabul edebilir veya reddedebilir. Reddetme işlemi, gerekçesiyle birlikte zincire işlenir ve sistem kayıtlarına kalıcı olarak kaydedilir.

Şekil 7.4. *Eczane teslim kontrolü*



İşlem Adımları: Ürün Doğrulama ve Tüketiciye Teslim Süreci

Adım-1: Ürün Kimlik Bilgisinin Taratılması

Eczane, ürün teslimatını gerçekleştirmeden önce ürünün QR kodunu veya barkodunu tarayarak sistemdeki kaydına erişim sürecini başlatır.

Adım-2: Ürün Bilgisinin Sorgulanması

Sisteme entegre REST API aracılığıyla ürünün tanımlayıcı bilgileri sorgulanır.

Adım-3: Ürün Verilerinin Alınması

REST API üzerinden sorgulanan ürünün temel verileri (adı, barkod numarası, üretici, içerikler vb.) alınır.

Adım-4: Parti Bilgilerinin Sorgulanması

Ürünün hangi partiye ait olduğunu belirlemek için ilgili parti kimliği üzerinden sorgulama yapılır.

Adım-5: Parti Verilerinin Alınması

Sistemde kayıtlı olan parti bilgileri (üretim tarihi, son kullanma tarihi, taşıma limitleri vb.) REST API tarafından alınır.

Adım-6: Sevkiyat Geçmişinin Sorgulanması

Ürünle ilişkili sevkiyat sürecine ait geçmiş veriler (örneğin hangi dağıtıcıdan, ne zaman, hangi taşıma koşullarında geldiği) sistemden sorgulanır.

Adım-7: Sevkiyat Bilgilerinin Alınması

Blok zincirde tutulan sevkiyat geçmişi REST API aracılığıyla eczaneye iletilir.

Adım-8: İhlal Kayıtlarının Sorgulanması

İlgili sevkiyat sürecinde herhangi bir sıcaklık/nem ihlali veya taşımaya ilişkin sorun olup olmadığını kontrol etmek üzere ihlal verileri sorgulanır.

Adım-9: İhlal Listesinin Alınması

Eğer geçmişte bir ihlal kaydı varsa, bu sistemden alınarak eczane tarafından görünür hale getirilir.

Adım-10: Tüm Tedarik Zinciri Bilgilerinin Görüntülenmesi

Ürün, parti, sevkiyat ve olay verilerinin bir araya getirilmesiyle, ürünün üretimden eczaneye kadar olan tüm geçmişi eczane arayüzünde topluca görüntülenir.

Adım-11: Teslimatın Kabulü veya Reddedilmesi

Eczane, elde ettiği verilere dayanarak ürünü kabul edebilir veya güvenlik ve kalite açısından yetersiz buluyorsa reddedebilir.

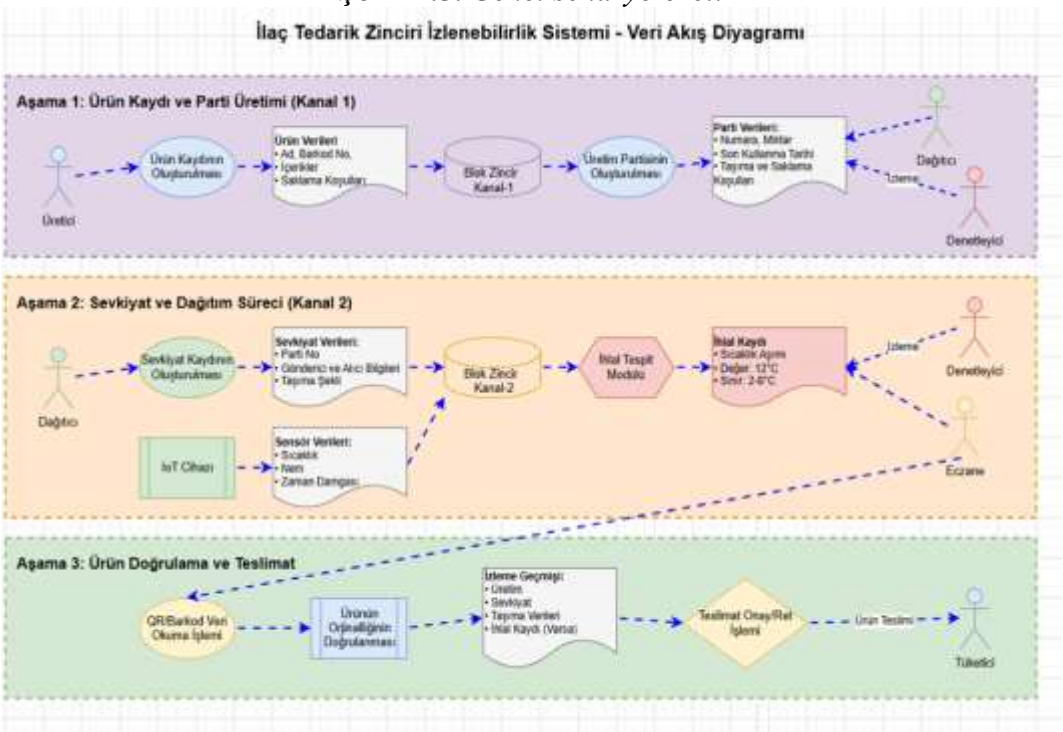
Adım-12: Ürünün Tüketiciye Satışı

Eğer ürün kabul edildiyse, sistem üzerinden "teslimata uygun" statüsü kazanan ürün, nihai tüketiciye satılmak üzere eczane tarafından işleme alınır.

4. Tüm İşlem Zincirinin Genel Özeti

Senaryonun sonunda, sistemde yer alan tüm aktörlerin gerçekleştirdiği işlemler; sırasıyla ürün kaydı, sahiplik devri, sıcaklık güncellemesi, ihlal bildirimi ve teslim kararı şeklinde zincire yazılmış olur. Bu akış sayesinde sistemin hem teknik hem yönetişimsel boyutta çalıştığı doğrulanır.

Şekil 7.5. *Genel senaryo özeti*



Bu senaryo, geliştirilen sistemin yalnızca teknik düzeyde değil; aynı zamanda gerçek dünyadaki yönetişim, güvenlik ve hesap verebilirlik ihtiyaçlarını karşılayacak biçimde

kurgulandığını göstermektedir. Sistemdeki her işlem; işlem sahibinin kimliği, zamanı ve verisiyle birlikte bloklara işlenmekte ve herhangi bir müdahaleye kapalı, değiştirilemez bir dijital kayıt haline gelmektedir.

7.3.5.2. Teknik Doğrulama ve Sistem Çıktıları

Bu bölümde geliştirilen Hyperledger Fabric tabanlı sistemin işlevselliği üç temel düzeyde teknik olarak doğrulanmaktadır. Gerçekleştirilen işlemler, hem istemci arayüzü üzerinden API çağrılarıyla, hem verinin son hâlinin tutulduğu world state (CouchDB) düzeyinde hem de işlem geçmişinin yer aldığı blok zinciri (Hyperledger Explorer) düzeyinde gözlemlenmiş ve sistemin senaryo temelli iş akışlarını doğru biçimde yönettiği kanıtlanmıştır.

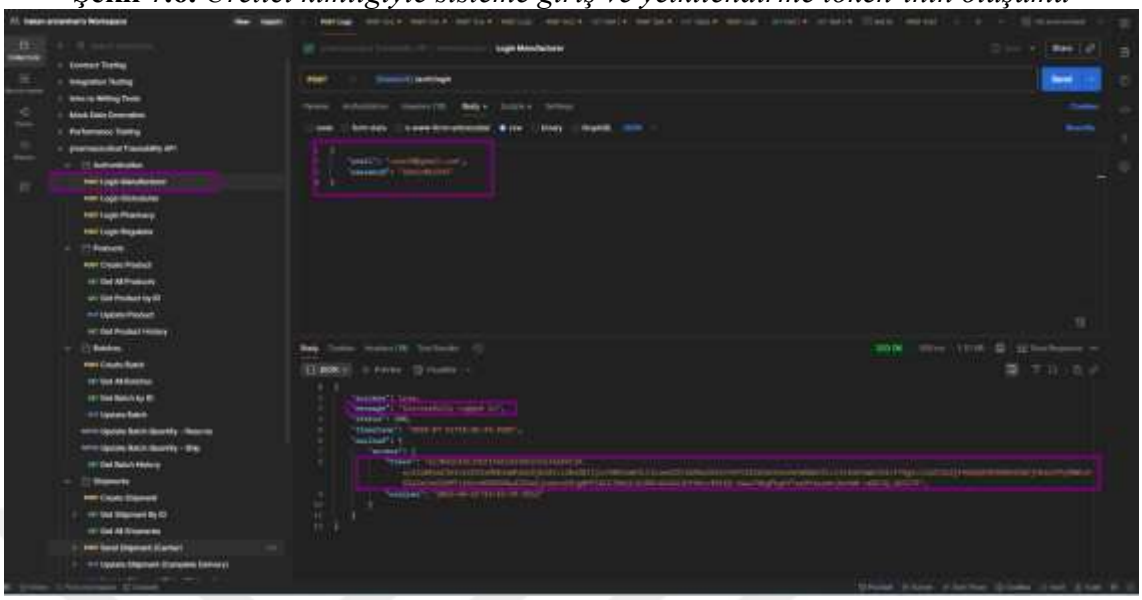
1. API Tabanlı İşlem Doğrulama (Postman Üzerinden)

Sistemin teknik işleyişini değerlendirebilmek ve kullanıcı rollerine göre tanımlanmış işlem sınırlarının doğruluğunu test edebilmek amacıyla API katmanına yönelik bir dizi işlem Postman aracı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bu testler, uygulamanın uçtan uca işlevselliğini doğrulamakla kalmamış; aynı zamanda her bir organizasyonun yalnızca kendi tanımlı yetki çerçevesi içinde işlem yapabildiğini de göstermiştir. Sisteme dahil olan her kullanıcı, öncelikle kendi kurumsal kimliğiyle giriş yapmakta; ardından JWT aracılığıyla doğrulanarak yalnızca kendi rolüne tanımlı fonksiyonlara erişebilmektedir. Örneğin; üretici organizasyon yalnızca ürün ve parti kaydı işlemlerini gerçekleştirebilirken, eczane yalnızca geçmiş verileri görüntüleyerek ürün kabul/red işlemini yapabilmektedir. Bu yapı, sistemdeki işlem bütünlüğünün yalnızca blok zincir düzeyinde değil, aynı zamanda istemci-API arayüzü seviyesinde de güvence altına alındığını göstermektedir.

Adım-1: Kullanıcının Sisteme Girişi (JWT ile Doğrulama)

Şekil 7.6, sistemde tanımlı bir üretici kullanıcının Postman arayüzü üzerinden sisteme giriş yaptığı işlemi göstermektedir. Kullanıcı, user10@gmail.com e-posta adresi ve şifresiyle /auth/login adresine bir Post isteği göndermekte, sistem ise girişin başarılı olması durumunda bu kullanıcıya JWT formatında bir erişim anahtarı (token) sağlamaktadır.

Şekil 7.6. *Üretici kimliğiyle sisteme giriş ve yetkilendirme token'ının oluşumu*



Bu token, sistemde kullanıcıyı tanımak ve yetkilerini doğrulamak için erişim belirteci olarak kullanılır. Her API isteğiyle birlikte gönderilerek güvenli işlem yapılmasına olanak tanır. Örneğin;

✓ Üretici yalnızca ürün ve parti kaydı yapabilir,

✓ Dağıtıcı sevkiyat ve sensör verisi işlemlerini yapabilir,

✓ Eczane teslimat kararı verebilir,

✓ Denetleyici kurum ise yalnızca salt-okunur sorgular gerçekleştirebilir.

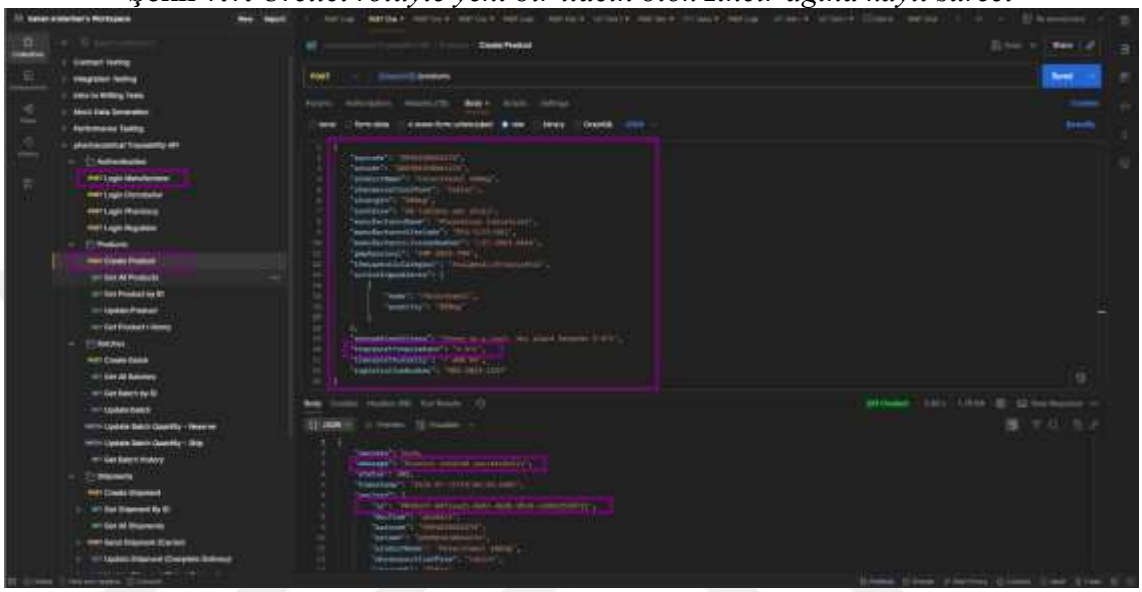
İşlem sonunda sistemin gönderdiği yanıtın HTTP durum kodu *200 OK* olarak görünmektedir. Bu kod, yapılan isteğin başarıyla işlendiğini ve geçerli bir erişim token'ı üretildiğini göstermektedir. REST API sistemlerinde 200 serisi yanıtlar, işlem doğrulamasının teknik olarak başarılı olduğunu ifade eder. Aynı zamanda yanıt içeriğinde *(response body)* "*success*": *true* ve "*message*": "*Successfully logged in*" gibi ifadelerin yer alması, kullanıcı kimlik bilgilerinin doğru olduğunu ve sistemin beklenen şekilde çalıştığını göstermektedir. Bu mekanizma sayesinde hem yetkisiz erişimlerin önüne geçilmekte hem de sistemdeki her işlem, kullanıcının kimliğiyle ilişkilendirilmiş şekilde blok zincire yazılmaktadır.

Adım-2: Ürün Kaydı – Üretici Organizasyonun Zincire Ürün Girişi

Sistemde kayıtlı bir üretici kullanıcının, yeni bir ilaç ürününü blok zincir ağına kaydetmesi süreci aşağıdaki görselde gösterilmektedir. Üretici, yeni bir ürün eklemek

amacıyla ürün oluşturma API adresine bir istek gönderir. Postman arayüzü üzerinden gerçekleştirilen bu işlemde; ürün adı, barkod, GMP onayı gibi temel tanımlayıcı bilgilerle birlikte, ürünün taşınma ve saklanma koşullarını belirten sıcaklık ve nem limitleri de JSON formatında sisteme iletilmektedir.

Şekil 7.7. *Üretici rolüyle yeni bir ilacın blok zincir ağına kayıt süreci*



Bu işlem sonucunda sistem, HTTP 201 Created durum kodu ile işlem sonucunun başarıyla gerçekleştiğini belirten bir yanıt vermektedir. Yanıtın içeriğinde:

- "*txId*" → İşlemin blok zincir üzerindeki benzersiz kimliği (*ProductId*)
- "*timestamp*" → Kaydın gerçekleştirildiği zaman (UTC formatında)
- "*barcode*" ve "*productName*" → Kaydedilen ürünün temel tanımlayıcı bilgileri
- "*temperatureMin*": 2
- "*temperatureMax*": 8 gibi bilgiler yer almaktadır.

Özellikle sıcaklık değerleri ürünün soğuk zincir koşullarına uygun olarak +2°C ile +8°C aralığında taşınması gerektiğini göstermektedir. Sistemin ilerleyen adımlarında (örneğin sevkiyat sürecinde), IoT cihazlarından gelen sıcaklık verileri bu limitlerle karşılaştırılarak olası ihlaller tespit edilmekte ve otomatik olarak zincire “soğuk zincir kırılması” bildirimi yapılmaktadır. Dolayısıyla, bu verilerin doğru biçimde tanımlanması hem ürünün güvenliği hem de sistemin otomatik karar mekanizmasının işleyişi açısından kritik rol oynamaktadır.

Yanıt içeriğinde "txId" ve "timestamp" alanları ise, işlemin blok zincir üzerindeki değiştirilemezliğini ve zaman damgalı kaydını temsil etmektedir.

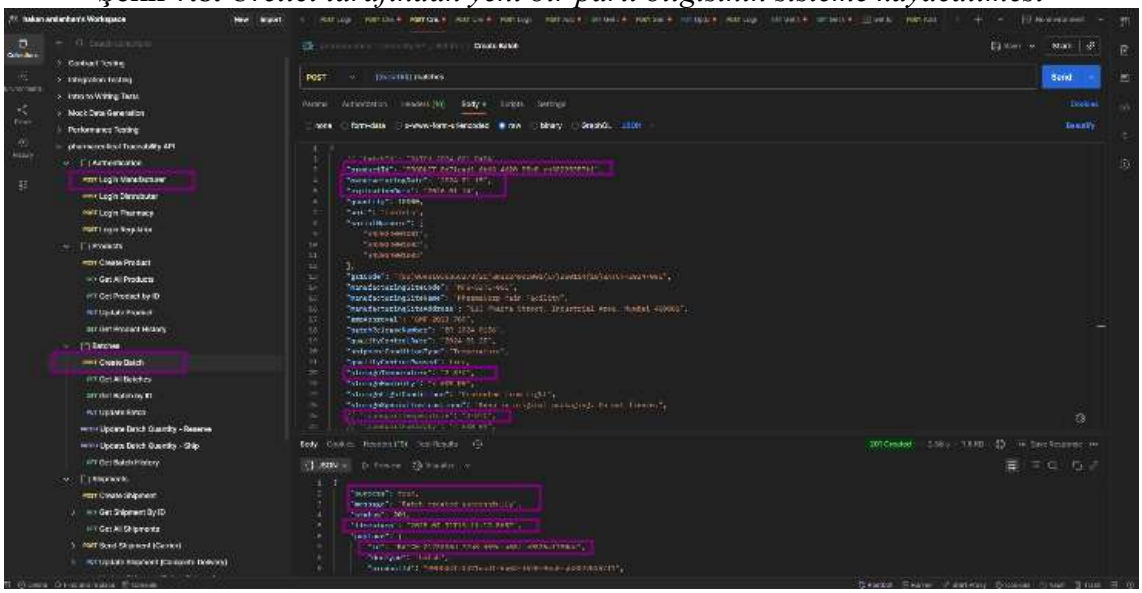
Adım-3: Üretim Parti Kaydı ve Üretici–Dağıtıcı Transferi

Bu adımda, daha önce kayıt altına alınan ürüne ait üretim partisi bilgileri sisteme kaydedilmekte ve aynı işlemle birlikte ürünün sahipliği üreticiden dağıtıcıya devredilmektedir. Aşağıdaki görselde, ürün partisi oluşturmak amacıyla /batches adresine yapılan veri gönderimi (POST işlemi) gösterilmektedir. İşlem Postman arayüzü üzerinden gerçekleştirilmiş olup, partinin üretim tarihi, son kullanma tarihi, üretim yeri, seri numaraları ve taşıma koşulları gibi bilgiler JSON formatında iletilmiştir.

İşlemde Kullanılan Veri Girdileri:

- "productId": Daha önce zincire kaydedilmiş ürüne ait benzersiz kimlik.
- "expirationDate" ve "manufacturingDate": Üretim ve son kullanma tarihleri.
- "shipmentCondition": 2-8 °C: Bu değerler, taşıma sürecinde sıcaklık sınırlarının sistemsel kontrolünü sağlar. Her IoT verisi bu eşiklerle karşılaştırılarak olası bir soğuk zincir ihlali otomatik olarak tetiklenir.
- "createdBy": İşlemi gerçekleştiren organizasyon bilgisi (Org1, yani üretici).

Şekil 7.8. *Üretici tarafından yeni bir parti bilgisinin sisteme kaydedilmesi*



Yanıt – Sistem Çıktısı:

- "success": true ve "message": "Batch created successfully" → Parti zincire başarıyla kaydedilmiştir.
- "batchId": Sistemin oluşturduğu benzersiz parti kimliği.

Bu işlemle birlikte ürün artık belirli bir partiye atanmış, taşıma ve izlenebilirlik açısından zincir üzerinde iz bırakabilecek nitelikte yapılandırılmıştır. Bir sonraki aşamada, bu partinin taşıma süreci başlatılacak ve sıcaklık verisi izleme süreci başlayacaktır.

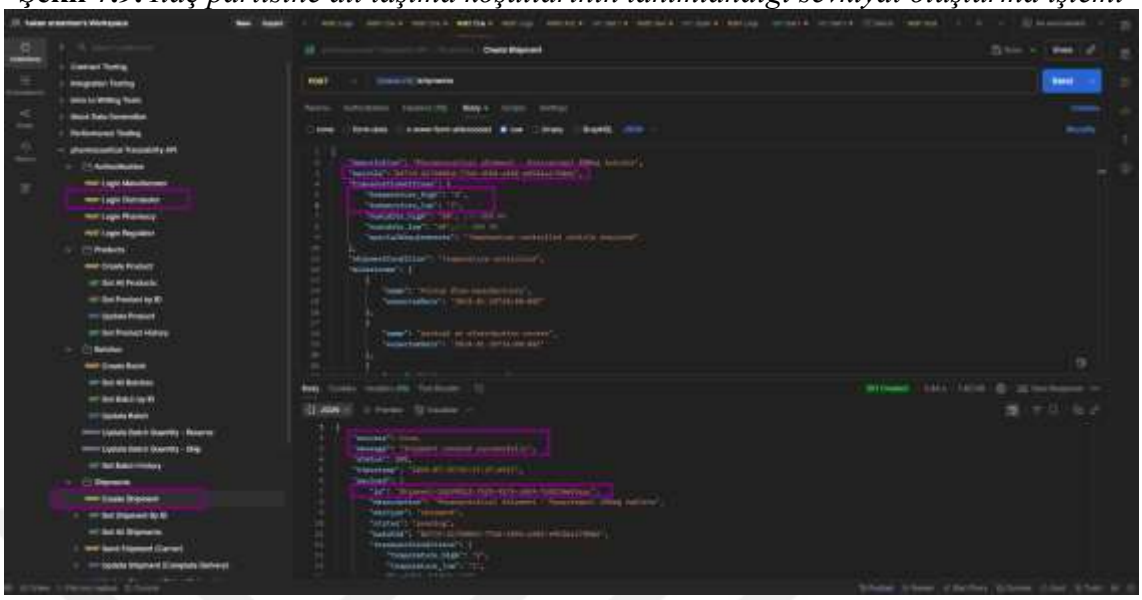
Adım-4: Sevkiyatın Başlatılması ve IoT İzleme Sürecinin Hazırlanması

Bu adımda, daha önce oluşturulmuş olan partiye ait ürünlerin dağıtıcı (Org2) tarafından sevkiyatı başlatılmaktadır. Sevkiyat kaydı, sistemin ikinci kanalında (distributor-retailer-channel) yürütülür ve sıcaklık/nem gibi taşıma koşulları zincire kaydedilerek ileride yapılacak IoT izleme ve ihlal tespiti işlemlerine temel oluşturur.

İşlemde Kullanılan Veri Girdileri:

- "batchID": Sevkiyatı yapılacak ürünün ait olduğu parti kimliği.
- "description": Taşıma açıklaması (örneğin "Paracetamol shipment").
- "transportConditions": 2-8 °C
- "milestones": Sevkiyat zaman çizelgesine dair bilgileri içerir (örneğin tahmini varış zamanı).
- "shipmentCondition": "temperature-controlled" ifadesiyle, sıcaklık duyarlılığı olan taşıma türü sistemsel olarak işaretlenmiştir.

Şekil 7.9. *İlaç partisine ait taşıma koşullarının tanımlandığı sevkiyat oluşturma işlemi*



Yanıt – Sistem Çıktısı:

- "success": true ve "message": "Shipment created successfully" → Yeni sevkiyat kaydı başarıyla oluşturulmuştur.
- "shipmentId": Sistemin ürettiği sevkiyat kimliği, zincirdeki sonraki işlemler için temel referans olacaktır.
- "batchId": Bu sevkiyatın ilişkilendirildiği parti numarasıdır.
- "transportConditions": Kaydedilen taşıma koşulları sistem tarafından doğrulanarak yanıt içerisine alınmıştır.

Bu adımla birlikte sistem, taşıma sürecini resmi olarak başlatmış ve zincir üzerinde taşıma koşullarını tanımlamıştır. Bir sonraki aşamada, sevkiyatla ilişkilendirilmiş IoT sensör verileri sisteme gönderilecek ve soğuk zincir bütünlüğü bu verilere göre otomatik olarak izlenecektir.

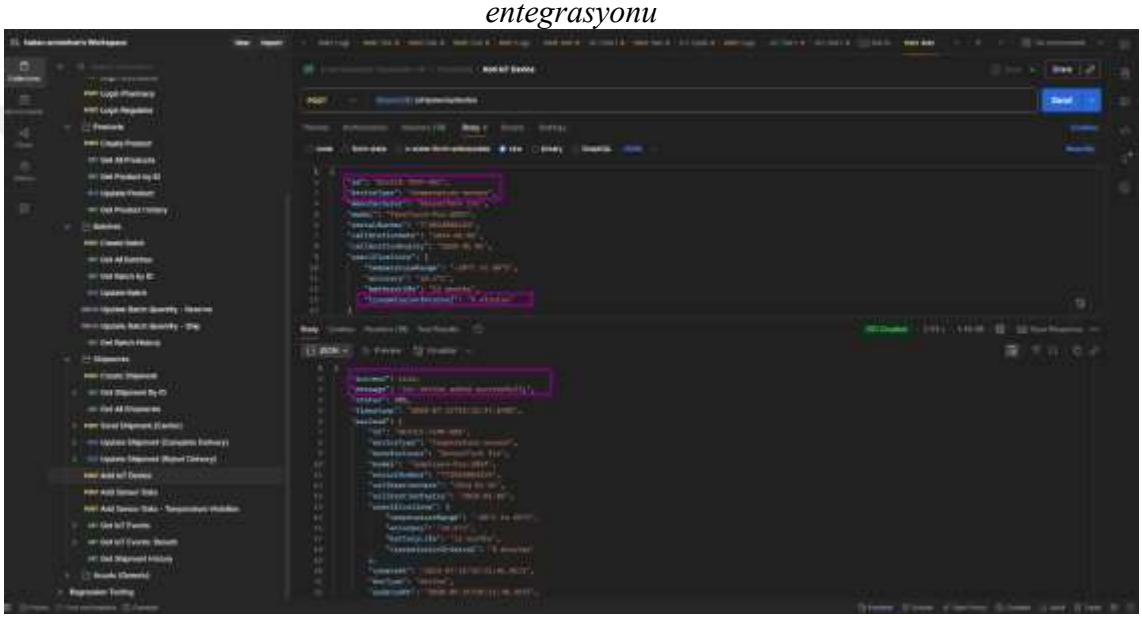
Adım-5: IoT Sensör Cihazının Sisteme Eklenmesi

Bu adımda, dağıtıcı (Org2) organizasyonunun sorumluluğunda olan sıcaklık izleme süreci için kullanılacak olan IoT tabanlı sensör cihazı sisteme tanımlanmaktadır. Bu cihaz, taşıma süreci boyunca ortam sıcaklığını ve diğer çevresel koşulları düzenli aralıklarla ölçerek zincire veri aktaracaktır. Eklenen cihaz bilgisi, zincirde kalıcı olarak saklanır ve ilgili sevkiyatla ilişkilendirilir.

İşlemde Kullanılan Veri Girdileri:

- "id": Sensör cihazına atanmış benzersiz kimlik numarası (örnek: DEVICE-TEMP-001).
- "temperatureRange": Cihazın ölçüm yapabileceği aralık -20°C ile +60°C arasında tanımlanmıştır.
- "transmissionInterval": Verilerin sisteme gönderim sıklığı olarak “5 dakika” değeri belirlenmiştir. Bu alan sistemin izleme sıklığını doğrudan etkilemektedir.

Şekil 7.10. *IoT tabanlı sıcaklık sensörünün blok zincir tabanlı sevkiyat sürecine entegrasyonu*



Yanıt – Sistem Çıktısı:

- "success": true ve "message": "IoT device added successfully" → Cihaz başarıyla sisteme eklenmiştir.
- "payload": Cihaza ait tüm teknik ve tanımlayıcı veriler, sistem yanıtında da doğrulanmıştır.

Bu adımdan sonra sistem, sevkiyat sırasında bu cihazdan gelen verileri düzenli aralıklarla alabilecek ve taşıma koşullarında tanımlı eşik değerler ile otomatik karşılaştırmalar yapabilecektir. Bir sonraki adımda, bu sensör cihazından gelen sıcaklık verilerinin zincire işlenmesi ve olası ihlallerin otomatik olarak tespit edilmesi süreci anlatılacaktır.

Adım-6: Sensör Verisinin Zincire Kaydedilmesi ve Soğuk Zincir İhlalinin Oluşması

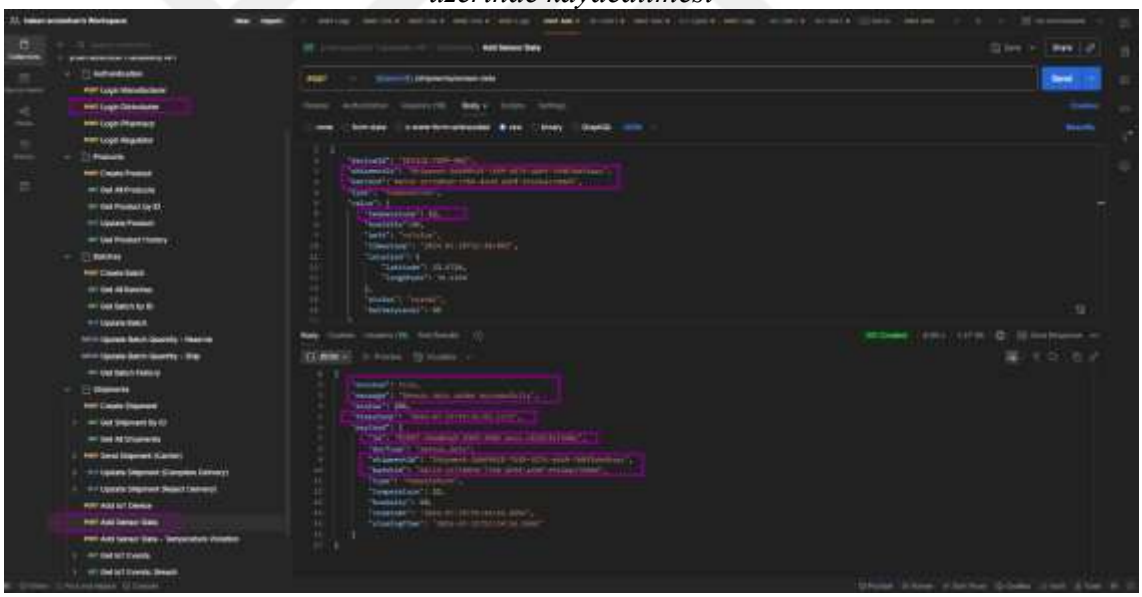
Taşıma sürecinde aktif olarak çalışan IoT cihazı, tanımlı zaman aralıklarında (örneğin her 5 dakikada bir) sıcaklık ve nem gibi çevresel verileri ölçerek sisteme gönderir. Bu adımda,

gönderilen sensör verileri, daha önce tanımlanan eşik değerlerle karşılaştırılır. Belirlenen sınırların (örneğin 2–8°C sıcaklık aralığı) dışına çıkıldığında sistem otomatik olarak bir soğuk zincir ihlali kaydı üretmektedir.

İşlemde Kullanılan Veri Girdileri:

- "deviceId": Sensör cihazı kimliği (örnek: DEVICE-TEMP-001)
- "shipmentId" ve "batchId": Verinin hangi sevkiyat ve partiye ait olduğu belirtilmiştir.
- "value.temperature": Kritik sıcaklık değeri 12°C olarak gönderilmiştir. Bu değer, sistemde önceden tanımlı taşıma sıcaklık sınırı olan 8°C'yi aşmaktadır. Bu nedenle sistem otomatik olarak bir ihlal kaydı üretir.
- "timestamp": Verinin ölçüldüğü zaman

Şekil 7.11. *IoT sensöründen alınan sıcaklık verisinin sisteme eklenmesi ve blok zincir üzerinde kaydedilmesi*



Yanıt – Sistem Çıktısı:

- "message": "Sensor data added successfully" → Sensör verisi başarıyla kaydedilmiştir.
- "temperature": 12 → Kritik sıcaklık değeri
- "id": "Event-... ile başlayan sistem içi olay kimliği oluşturulmuştur.

Bu adım, modelin temel işlevlerinden biri olan soğuk zincir izlenebilirliği ilkesini teknik olarak gerçekleştirmektedir. Sıcaklık verisi önceden belirlenmiş taşıma limitlerini aştığı için, zincire otomatik olarak ihlal (breach) olayı kaydedilmiştir. Bu kayıt, daha sonraki

teslimat kontrolü sırasında eczane tarafından görüntülenecek ve ürünün kabul edilip edilmeyeceği bu kayıt doğrultusunda değerlendirilecektir.

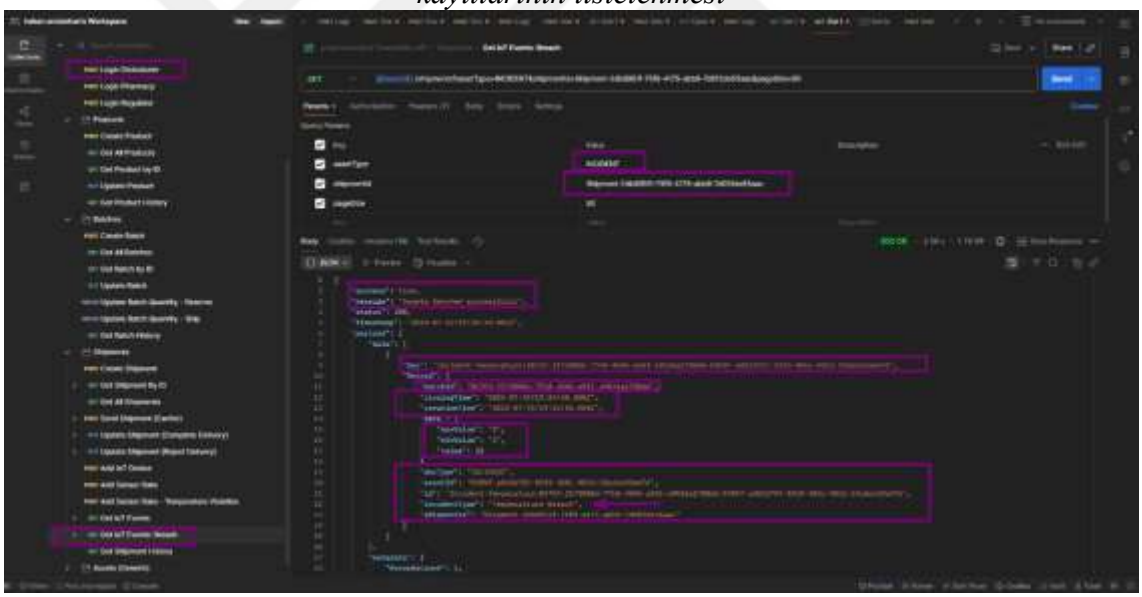
Adım-7: Sıcaklık İhlalinin Sorgulanması (Get IoT Events: Breach)

Bu adımda, dağıtıcı veya eczane organizasyonları taşıma sürecine ait sıcaklık ihlallerini sorgulamak üzere API üzerinden INCIDENT tipi olayları filtreleyerek zincire daha önce işlenmiş ihlalleri görüntüleyebilir. Özellikle eczane teslimat öncesi kontrol sürecinde bu bilgiler kritik öneme sahiptir.

Sorgulamada Kullanılan Filtreler:

- assetType: INCIDENT → Yalnızca ihlal (incident) türündeki varlıklar filtrelenmiştir.
- shipmentId: → Sorgulanan sevkiyat ID'si

Şekil 7.12. *Sıcaklık ihlali olaylarının blok zincir üzerinden sorgulanması ve ilgili sensör kayıtlarının listelenmesi*



Sorgu Sonucu Sistem Yanıtı:

- "message": "Assets fetched successfully" → Veriler başarıyla getirilmiştir.
- Key: Incident-Temperature:BATCH-... → Her ihlal olayı için sistem tarafından oluşturulmuş eşsiz olay ID'si
- incidentType: "Temperature Breach" → Sıcaklık İhlali Uyarısı
- value: 12°C → Bu veri, limitlerin dışındadır (sıcaklık aralığı: 2–8°C)
- shipmentId ve batchId → İhlalin ait olduğu sevkiyat ve parti

Bu API çağrısı, zincir üzerindeki tüm sensör olaylarını filtreleyerek yalnızca eşik değerlerin aşıldığı olayları gösterir. Sorgulama sonucunda, sıcaklık 12°C olarak ölçüldüğü ve bu değerin tanımlı üst sınır olan 8°C'yi aştığı anlaşılmaktadır. Bu durum, zincire "Temperature Breach" türünde bir olay olarak kaydedilmiş ve sonraki karar süreçlerinde (eczane kontrolü gibi) referans alınacaktır.

Adım-8: Eczanenin İhlal Kaydını Görerek Teslimatı Reddetmesi

Bu adımda, eczane organizasyonu ürünü teslim almadan önce geçmiş verileri sistem üzerinden tarar. Bir önceki adımda tespit edilen sıcaklık ihlali nedeniyle, eczane ürünü reddetme kararı verir. Bu işlem, sistemde hem ürün statüsünü etkiler hem de zincire kalıcı olarak kaydedilir.

Eczane tarafından gerçekleştirilen bu işlem, ürünün taşıma sürecinde tanımlı sınırları aştığı ve soğuk zincir bütünlüğünün bozulduğu gerekçesiyle kalite güvenliği açısından riskli bulunması sonucunda gerçekleştirilmiştir.

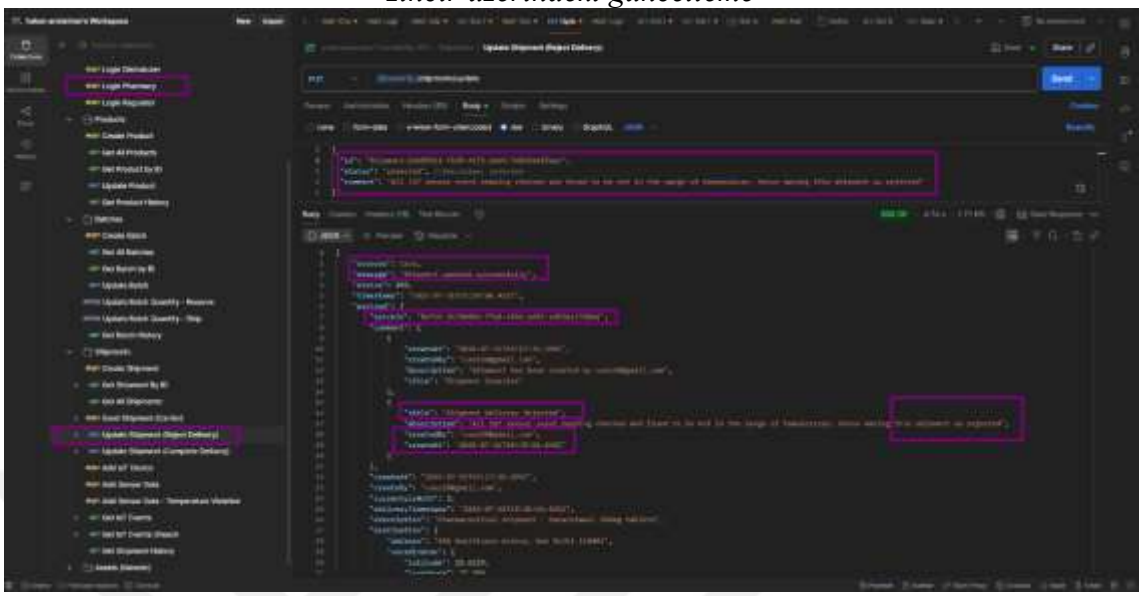
Ana Unsurlar:

- İlgili shipmentId: Shipment-61d70976-25f5-4d42-887d-3149c60887e3
- İlgili batchId: BATCH-b678925d-d8ee-4eed-9b53-a72085d572e0
- Tespit edilen sıcaklık değeri: 12°C → Tanımlı sınırların (2–8°C) üzerinde
- İhlal türü: "incidentType": "Temperature Breach"
- Karar: Teslimat reddedildi

Eczane bu kararı verirken, aşağıdaki veri kaynaklarını referans alır:

- Ürün ve parti bilgisi
- Sevkiyat geçmişi
- IoT sensör verileri
- İhlal kayıtları

Şekil 7.13. *Sıcaklık ihlali nedeniyle eczane tarafından sevkiyatın reddedilmesi ve blok zincir üzerindeki güncelleme*



Bu işlem sonucunda, ürünün "teslim edilmedi" statüsü zincire sabitlenir. Böylece, sistem yalnızca teknik takibi değil, aynı zamanda yönetişim açısından sorumluluğu da doğrulanabilir şekilde kayda geçirmiş olur.

2. CouchDB Doğrulaması (World State Veritabanı Üzerinden)

Hyperledger Fabric mimarisinde, blok zincire gönderilen işlemler yalnızca işlem geçmişini oluşturmakla kalmaz; aynı zamanda sistemin world state adı verilen bir veri alanında güncel veri kayıtlarını saklar. World state, her varlığın (örneğin ürün, parti, sevkiyat veya ihlal kaydı) son halini tutan, sorgulamalara hızlı erişim sağlayan bir NoSQL veritabanıdır. Bu çalışmada, world state bileşeni olarak CouchDB kullanılmıştır.

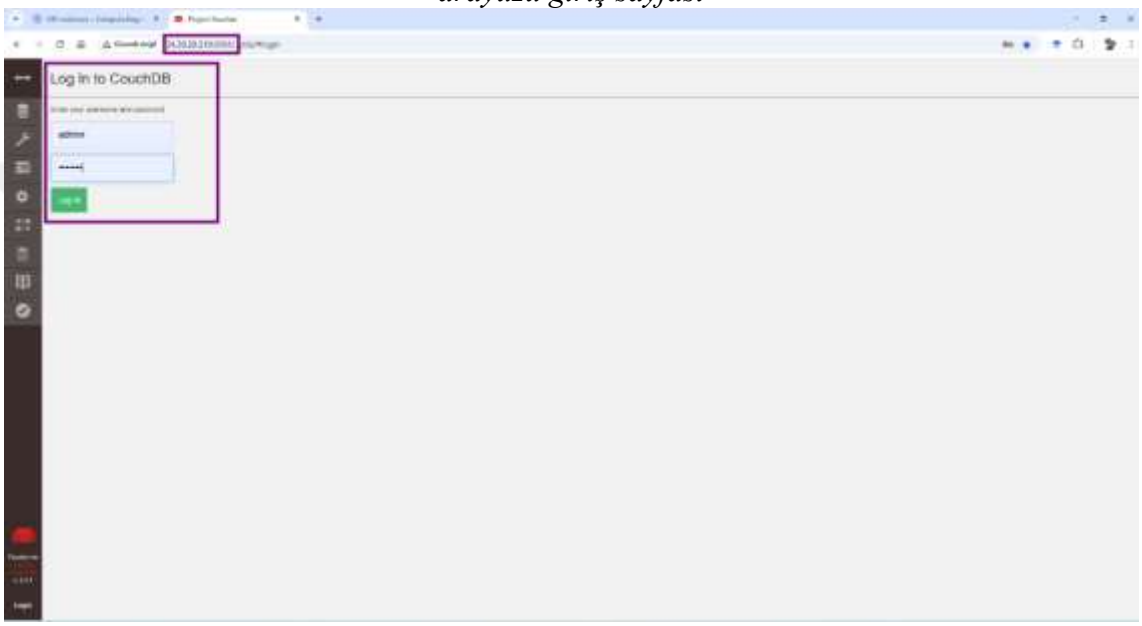
CouchDB, her peer düğümüne özel olarak yapılandırılmış ve her organizasyon yalnızca kendi defter verisine erişebilecek şekilde sınırlandırılmıştır. Bu yapı hem veri güvenliğini hem de rol temelli veri erişimini garanti altına almaktadır. CouchDB arayüzü, kullanıcıya görsel bir izleme imkânı sunmakta; JSON formatında saklanan verilerin hem okunabilirliğini hem de şeffaflık düzeyini artırmaktadır.

Bu kapsamda, sistem üzerinde gerçekleştirilen işlemlerin world state'e nasıl yansıdığı, aşağıdaki ekran görüntüleri ile adım adım ortaya konulmuştur. Her bir kayıt tipi (ürün, parti, sevkiyat, ihlal) için, ilgili organizasyonun peer düğümüne ait CouchDB arayüzü kullanılarak doğrulama gerçekleştirilmiştir.

Adım-1: CouchDB Arayüzüne Giriş ve Yetkilendirme

Aşağıda görülen ekran, sistemin world state verilerini barındıran CouchDB bileşenine tarayıcı üzerinden erişim adımını göstermektedir. Uygulama, Google Cloud Platform (GCP) üzerinde yapılandırılmış bir Ubuntu sanal makinede barındırılmakta olup, CouchDB arayüzüne bağlantı bu sanal makinenin dış IP adresi üzerinden kurulmaktadır.

Şekil 7.14. *Hyperledger fabric ağında world state verilerine erişim için couchdb arayüzü giriş sayfası*



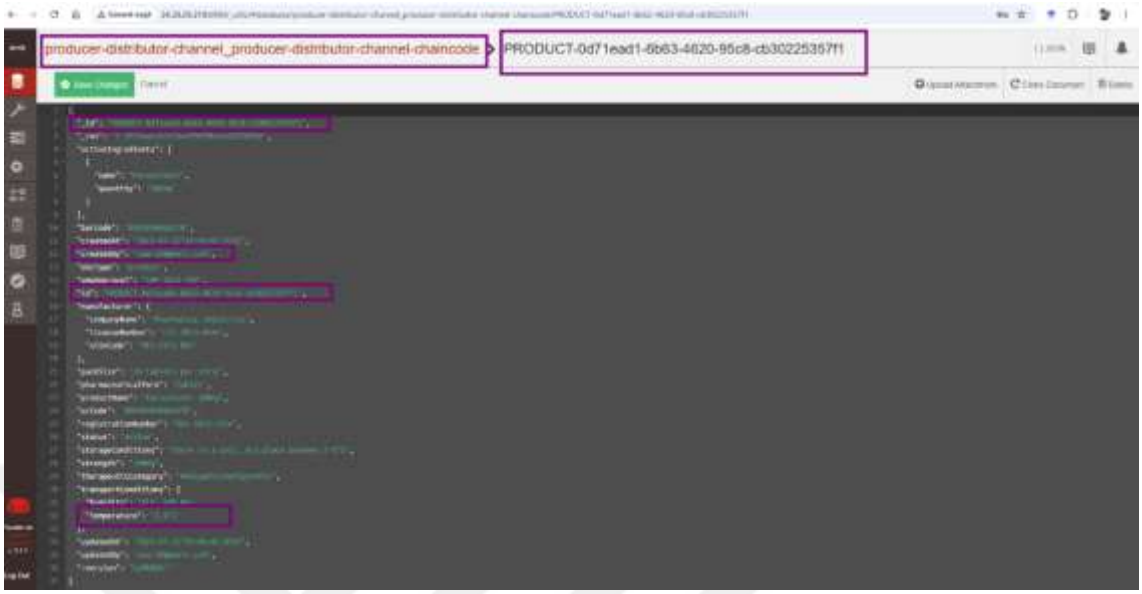
- Giriş adresi: http://34.30.29.219:6984/_utils/
- Kullanıcı adı: admin
- Şifre: adminpw

Bu kimlik bilgileri, daha önce docker-compose.yaml yapılandırma dosyası aracılığıyla tanımlanmıştır. Erişim sağlandıktan sonra her organizasyona özel veritabanı yapıları incelenebilmekte; kayıtlı ürün, parti, sevkiyat ve olay verileri detaylı olarak görüntülenebilmektedir.

Adım-2: Ürün Kaydının World State'e Yansıması (Product ID)

Aşağıda sunulan ekran görüntüsünde, sistemde daha önce üretici organizasyon tarafından kaydedilen ürün kaydının, CouchDB world state veritabanında nasıl göründüğü yer almaktadır. Görselde işaretlenen "PRODUCT-0d71ead1-6b63-4620-95c8-cb30225357f1" kimliği, ilk API çağrısıyla oluşturulan ürünle birebir örtüşmektedir.

Şekil 7.15. *Blok zincire kayıtlı ürün verisinin couchdb world state üzerindeki json temsili*



Bu doğrulama ile:

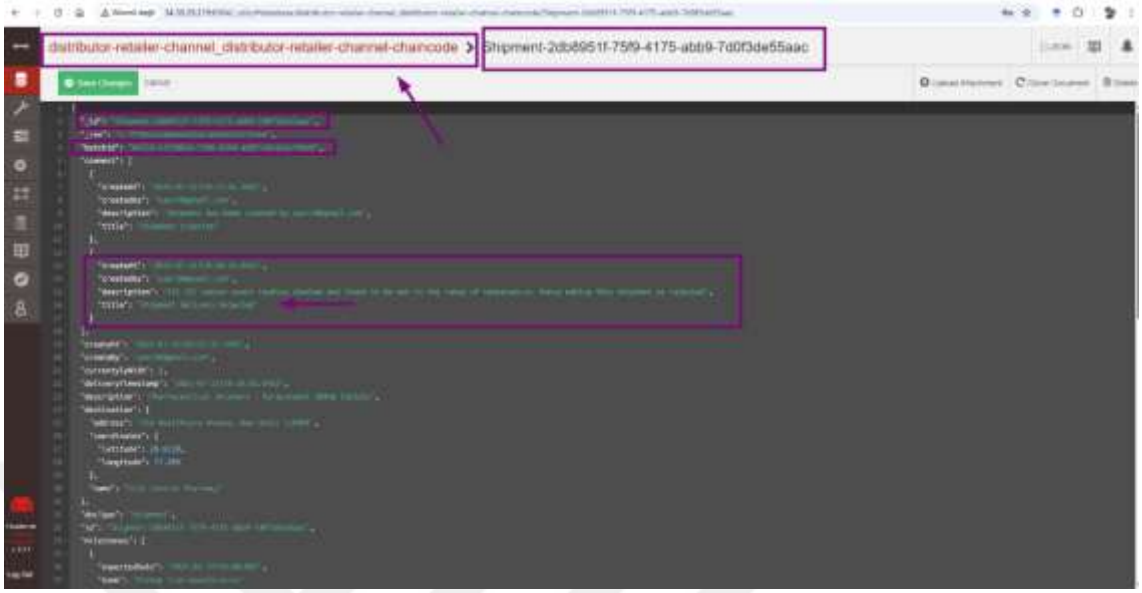
- Ürün verisinin sistemde değiştirilemez biçimde kaydedildiği,
- İşlem kimliği, kullanıcı bilgisi ve sıcaklık aralığı gibi kritik niteliklerin world state üzerinde tam olarak karşılık bulduğu,
- Böylece, API üzerinden girilen veriler ile zincir üzerindeki kayıtlar arasında tutarlılık sağlandığı net biçimde görülmektedir.

Bu adım, sistemin hem kullanıcı girişiyle ürettiği verileri blok zincire aktardığını hem de bu verilerin world state'e eksiksiz biçimde işlendiğini göstermektedir.

Adım-3: Eczanenin Ürünü Reddetmesi ve World State Üzerine İhlal Gerekçesinin Kaydı

Senaryonun son aşamasında, sistem tarafından kaydedilen sensör verileri doğrultusunda soğuk zincir ihlali tespit edilmiş ve bu durum, ürün teslimatı sırasında eczane organizasyonu (Org3) tarafından değerlendirilmiştir. Eczane, zincir geçmişini sorgulayarak sevkiyata ait sıcaklık verilerinin taşıma sınırlarının dışına çıktığını belirlemiş ve ürünü sistem üzerinden reddetmiştir.

Şekil 7.16. *Eczane tarafından gerçekleştirilen sevkiyat reddinin couchdb world state üzerindeki kalıcı kaydı*



"Shipment Delivery Rejected" başlığıyla kaydedilen bu işlem, ürünün sıcaklık koşullarını karşılamadığı için reddedildiğini açıkça belirtmektedir.

- "description" alanında yer alan açıklamada, tüm IoT sensör verilerinin değerlendirilerek taşıma koşullarına uygun olmadığı yönünde bir tespit yapıldığı ve bu gerekçeyle teslimatın reddedildiği vurgulanmaktadır.
- createdBy alanı, bu işlemin hangi organizasyon tarafından yapıldığını (eczane) ve hangi kullanıcı aracılığıyla sisteme işlendiğini net bir şekilde göstermektedir.
- Bu işlem, sistemde geri dönüştürülemez biçimde blok zincire yazılmıştır ve denetleyici kurum tarafından salt-okunur biçimde görüntülenebilir.

Bu adım, yalnızca sistemin teknik düzeyde çalıştığını değil; aynı zamanda kalite kontrol, kurumsal sorumluluk ve hasta güvenliği gibi yönetişim ilkelerinin de blok zincir altyapısı üzerinden nasıl desteklendiğini göstermektedir.

3. Hyperledger Explorer ile Blok Düzeyinde İşlem Takibi

Hyperledger Fabric tabanlı sistemlerde yalnızca world state verileri değil, aynı zamanda her işlemin detayları bloklar halinde zincire kalıcı olarak kaydedilir. Bu bloklar; işlem zamanları, işlem kimlikleri (txID), çağrılan akıllı sözleşme fonksiyonları ve işlem yapan organizasyon bilgileri ile değiştirilemez biçimde saklanır. Bu yapının görsel olarak izlenebilmesi amacıyla geliştirilen Hyperledger Explorer aracı, sistem üzerinde gerçekleştirilen tüm zincir içi işlemleri blok düzeyinde analiz etme imkânı sunmaktadır.

Bu projede, geliştirilen sistemin şeffaflık ve izlenebilirlik ilkelerini desteklemek amacıyla Hyperledger Explorer aracı ağ yapısına entegre edilmiş ve GCP üzerinde yapılandırılan ağ bileşenlerine bağlanarak çalıştırılmıştır. Explorer arayüzü üzerinden aşağıdaki işlemler başarıyla gözlemlenmiştir:

- Zincire işlenen her bir işlemin ait olduğu blok numarası, işlem ID'si, çağrılan fonksiyon adı ve işlem zamanı detayları ile listelendiği görülmüştür.
- Her işlem için işlem başlatan kullanıcının kimliği ve bağlı olduğu organizasyon bilgisi analiz edilebilmiştir.
- Sıcaklık eşik değerinin aşıldığı durumlarda, sistemin otomatik olarak "incident" (ihlal) kaydı oluşturduğu bloklar düzeyinde teyit edilmiştir.
- Ürün, parti, sevkiyat ve ihlal gibi tüm varlıkların oluşturulması ve güncellenmesi sırasında zincire gönderilen işlemlerin Explorer üzerinden eksiksiz biçimde takip edilebildiği gözlemlenmiştir.

Blok düzeyinde bu gözlemler, sistemin yalnızca world state üzerinde değil, blok zincir düzeyinde de eksiksiz, değiştirilemez ve doğrulanabilir bir kayıt altyapısına sahip olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda denetleyici kurum gibi şeffaflık odaklı aktörlerin sistem üzerinde zaman, kaynak ve işlem bilgilerini geriye dönük izleyebilmesine olanak sağlayarak yönetişimsel güvenilirlik sağlamaktadır.

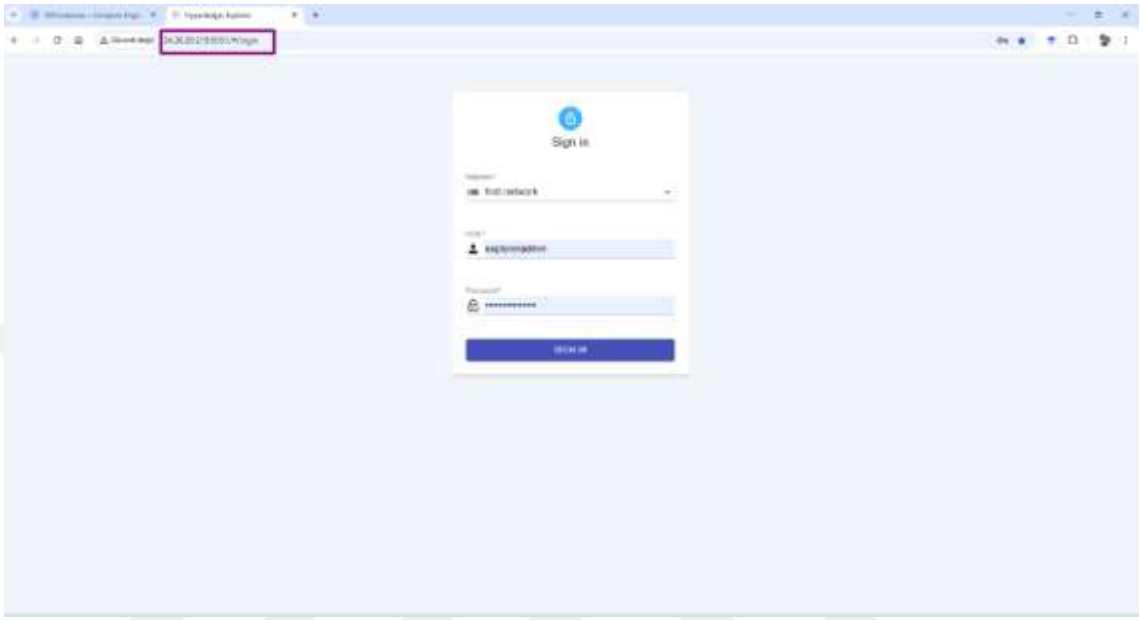
Adım-1: Hyperledger Explorer Arayüzüne Giriş

Geliştirilen sistemin blok düzeyinde işlemlerinin izlenebilmesi için, ağ mimarisine Hyperledger Explorer aracı entegre edilmiştir. GCP üzerinde yapılandırılmış olan bu araca, sunucunun tanımlı dış IP adresi üzerinden tarayıcı ile erişim sağlanmıştır. Aşağıda gösterildiği üzere, http://34.30.29.219:8081 adresi üzerinden erişilen Explorer arayüzü, giriş ekranında kullanıcı adı ve şifre gerektirmektedir.

Kullanıcı adı: exploreradmin

Şifre: Daha önceden sistemde tanımlanmış yönetici şifresi ile oturum açılmaktadır.

Şekil 7.17. *Hyperledger explorer arayüzüne external ıp üzerinden erişim ve yetkili giriş ekranı*

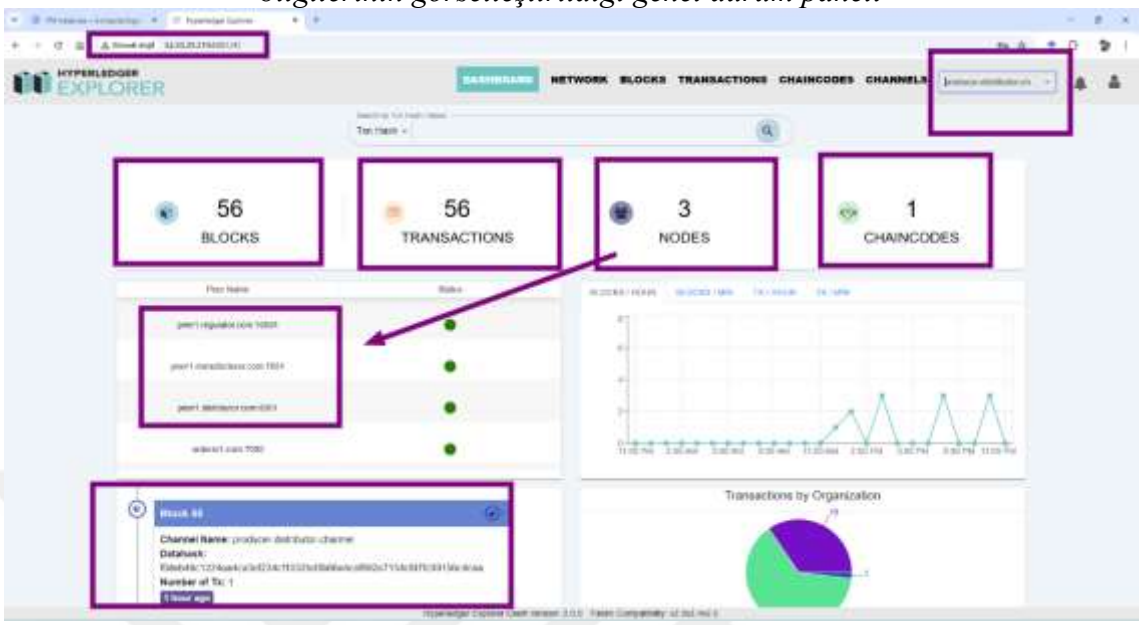


Bu adım, yalnızca yetkili kullanıcıların sistem üzerindeki blok zinciri geçmişine erişebilmesini sağlamakta; blok düzeyinde analiz, şeffaflık ve denetim işlevleri için temel teşkil etmektedir.

Adım-2: Hyperledger Explorer Arayüzü Üzerinden Ağ Gözlemi

Hyperledger Explorer, sistemin blok zinciri altyapısını görsel olarak denetlemeye ve analiz etmeye olanak tanıyan bir kullanıcı arayüzüdür. Geliştirilen modelde, bu araç sayesinde hem geliştirici hem de denetleyici kurum gibi aktörler, blok zinciri üzerinde gerçekleştirilen tüm işlemleri blok numarası, işlem zamanı, kanal bilgisi ve işlem sahibi organizasyon bazında takip edebilmektedir.

Şekil 7.18. *Hyperledger explorer üzerinden ağa ait blok, işlem, düğüm ve zincir kodu bilgilerinin görselleştirildiği genel durum paneli*



Yukarıdaki ekran görüntüsünde yer alan önemli bileşenler şunlardır:

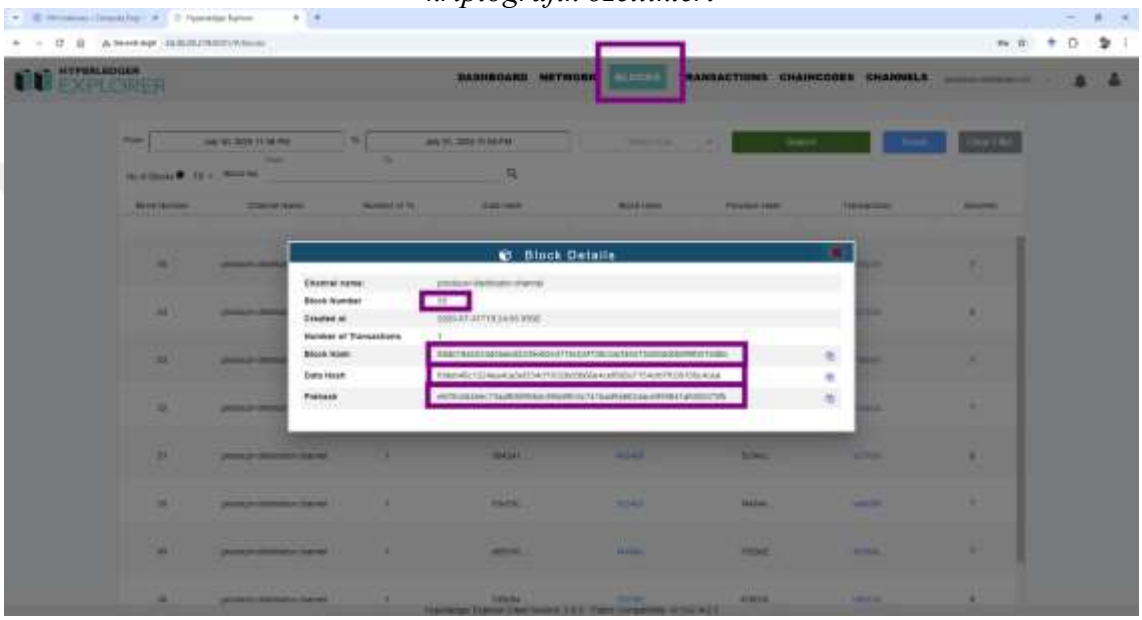
- Blok Sayısı (Blocks): Şu ana kadar sistemde oluşturulmuş toplam blok sayısını gösterir. Her blok, bir veya birden fazla işlemi içermektedir.
- İşlem Sayısı (Transactions): Bloklara yazılmış toplam işlem sayısını gösterir.
- Aktif Düğümler (Nodes): Sistemde işlem yapan peer düğümleridir. Örneğin *peer1.manufacturer.com*, *peer1.distributor.com*, *peer1.regulator.com*.
- Kanal Bilgisi: Sağ üst köşede, izlenen kanal seçilmiştir: producer-distributor-channel.
- Blok Detayı: Görselde Block 55 detayları yer almaktadır. Bu blok içinde kaç işlem olduğu, hash değeri ve zaman bilgisi görüntülenmiştir.
- İşlem Yoğunluğu Grafiği: Saatlik bazda blok oluşturulma sayısını gösterir.
- Organizasyon Bazlı İşlem Dağılımı: Pasta grafiği şeklinde, işlemlerin hangi organizasyonlar tarafından gerçekleştirildiğini görselleştirir.

Bu panel, sistemin güncel durumu hakkında anlık bilgi sunmakta ve blok zinciri verilerinin hem denetlenebilirliğini hem de analiz edilebilirliğini artırmaktadır. Özellikle denetleyici kurum gibi izleme yetkisine sahip aktörlerin, sistem üzerindeki işlemleri şeffaf biçimde izlemesini sağlayarak yönetişimsel şeffaflık ilkesiyle örtüşmektedir.

Adım-3: Blok Düzeyinde İşlem Takibi – Örnek: Blok 55

Hyperledger Explorer üzerinden gerçekleştirilen gözlemler kapsamında, sistemde zincire yazılan işlemlerin bloklar altında nasıl organize edildiği incelenmiştir. Aşağıda sunulan ekran görüntüsü, üretici ve dağıtıcı organizasyonlarının ortak olduğu producer-distributor-channel kanalında oluşturulan 55 numaralı bloğa ait detayları göstermektedir.

Şekil 7.19. *Hyperledger explorer üzerinden erişilen 55 numaralı blok içeriği ve kriptografik özellikleri*



Blok içeriğinde aşağıdaki unsurlar yer almaktadır:

- Channel Name: Blok hangi kanala aitse burada belirtilmektedir. Örnekte, producer-distributor-channel isimli kanal üzerinde bir işlem kaydı yapılmıştır.
- Block Number: İşlem sırasına göre zincirdeki konumunu ifade eder. Bu örnekte, sistemdeki 55. bloktur.
- Created At: İşlemin zincire yazıldığı zaman bilgisi yer almaktadır.
- Number of Transactions: Bu blokta yalnızca bir adet işlem yer aldığı belirtilmiştir.
- Block Hash / Data Hash / Prehash: Kriptografik olarak blok bütünlüğünü sağlayan özet bilgiler (hash) verilmiştir. Bu hash değerleri, blok zincirinin değiştirilemezliğini garanti altına alır. Örneğin:

➢ Block Hash: Bloğun dijital imzasıdır.

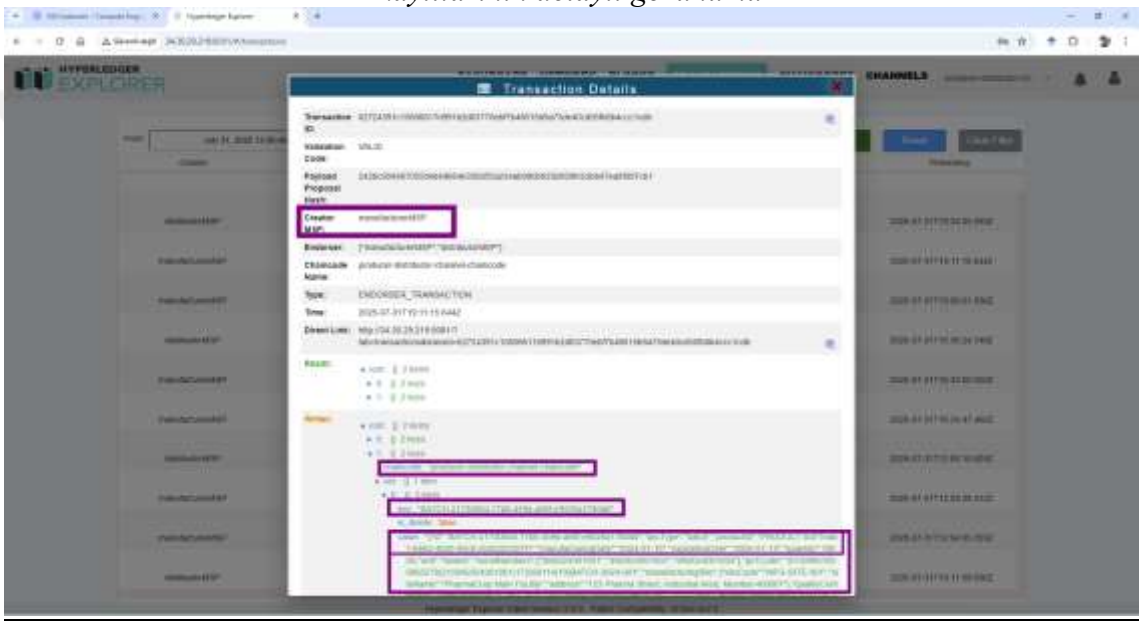
➢ Data Hash: Bloğa ait verilerin özeti.

➢ Prehash: Bir önceki bloğun hash değerini temsil eder ve zincir yapısını sağlar.

Bu ekran görüntüsü, sistemde gerçekleştirilen işlemlerin yalnızca arayüz düzeyinde değil; aynı zamanda blok zincir düzeyinde de tam izlenebilirlik ile kayıt altına alındığını göstermektedir. Blok numarası, işlem sayısı ve zaman bilgisi gibi unsurlar, denetleyici kurumlar için geriye dönük analizlerde kritik rol oynamaktadır.

Adım-4: Ürün ve Parti Kaydının Blok Düzeyinde İzlenmesi

Şekil 7.20. *Hyperledger explorer üzerinden parti oluşturma işlemine ait blok zinciri kayıtlarının detaylı görünümü*



Yukarıda sunulan Hyperledger Explorer ekranı, üretici organizasyon tarafından oluşturulan ürün partisi bilgisinin blok zincir üzerinde nasıl bir işlem olarak kaydedildiğini göstermektedir. İşlem detayları incelendiğinde:

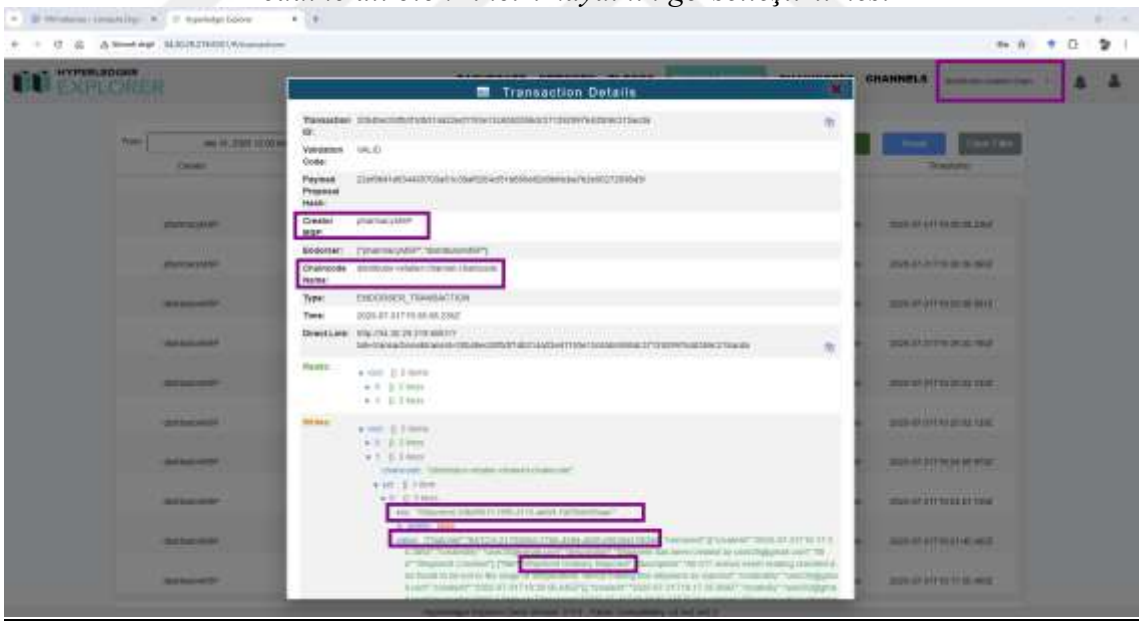
- Transaction ID: Zincire yazılan işlemi benzersiz şekilde tanımlayan kimliktir.
- Creator MSP: Bu işlem *manufacturerMSP* kimliğine sahip üretici organizasyon tarafından gerçekleştirilmiştir.
- Chaincode Name: İşlem, producer-distributor-channel-chaincode isimli akıllı sözleşme tarafından yürütülmüştür.
- Time: İşlemin blok zincire işlendiği zaman UTC formatında belirtilmiştir.
- Batch ID: BATCH-2173005d-77b8-459d-a58f-e9526a1780dd kimliğiyle sistemde kaydedilen bu partinin, daha önce world state üzerinden de doğrulanan veri ile birebir eşleştiği görülmektedir.

- Product ID (Referans): Bu partiye bağlı olan ürün, PRODUCT-0d71ead1-6b63-4620-95c8-cb30225357f1 ID'siyle sisteme daha önce kaydedilmiştir. Böylece işlem zincirinde veri bütünlüğü korunmaktadır.
- Veri İçeriği: JSON formatında gösterilen kayıtta, üretim tarihi, son kullanma tarihi, üretim adresi, üretim yeri kodu, sıcaklık ve nem koşulları gibi bilgiler yer almaktadır. Bu içerik, önceki adımlarda hem Postman hem CouchDB üzerinden girilen verilerle birebir örtüşmektedir.

Bu işlem, partinin üretici tarafından oluşturulup zincire sabitlenmiş olduğunu ve işlem detaylarının blok düzeyinde geriye dönük denetlenebilir olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Ayrıca bu ekran, veri manipülasyonuna karşı güvenlik sunan blok zincir mimarisinin şeffaflık ve izlenebilirlik özelliklerini uygulamalı olarak kanıtlamaktadır.

Adım-5: Eczanenin Ürünü Reddetme İşleminin Blok Zincir Üzerinde İzlenmesi

Şekil 7.21. *Hyperledger explorer üzerinden eczane tarafından gerçekleştirilen ürün reddine ait blok zinciri kaydının görselleştirilmesi*



Bu görsel, eczane organizasyonu (Org3) tarafından yapılan ve sıcaklık ihlali tespit edilen bir sevkiyata ilişkin reddetme işleminin blok zincir üzerinde nasıl kayıt altına alındığını göstermektedir. Explorer üzerinden incelenen işlem detayları şu şekildedir:

- Creator MSP: pharmacyMSP — Bu işlem eczane organizasyonuna ait kullanıcı tarafından başlatılmıştır.

- Chaincode Name: distributor-retailer-channel-chaincode — İşlem, ilgili kanalın chaincode'u aracılığıyla yürütülmüştür.
- Key: Shipment-2db8951f-75f9-4175-abb9-7d0f3de55aac — Red işlemi bu sevkiyat kimliğine bağlıdır.
- Value: JSON formatında gösterilen işlem içeriğinde, comment alanında açıkça "Shipment Delivery Rejected" başlığı ile, IoT cihazlarının gönderdiği sıcaklık verisinin belirlenen sınırları aştığı ifade edilmektedir.
- Batch ID Referansı: BATCH-2173005d-77b8-459d-a58f-e9526a1780dd — Bu sevkiyat, daha önce zincire kaydedilen belirli bir parti ile ilişkilidir. Bu bilgi, sistemdeki kayıtların birbirine referansla ilerlediğini ve veri bütünlüğünün sağlandığını ortaya koymaktadır.
- Zaman Damgası: İşlemin gerçekleştiği an UTC formatında sisteme işlenmiş, böylece olayın zaman doğruluğu güvence altına alınmıştır.

Bu işlemle birlikte sistem, eczanenin kalite standartlarını kontrol ettiğini, zincirdeki geçmiş verilere erişerek bağımsız bir karar mekanizması işletebildiğini ve işlemin kalıcı, izlenebilir bir kaydını oluşturduğunu göstermektedir. Red kararı teknik olarak doğrulanabilir olduğu gibi yönetişimsel şeffaflık açısından da sistemin güvenilirliğini desteklemektedir.

7.4. Modelin Uygulanabilirliği ve Stratejik Katkılar

Bu bölümde, çalışmada geliştirilen Hyperledger Fabric tabanlı blok zincir modelinin teknik olarak uygulanabilirliği ve farklı düzeylerde sunduğu katkılar çok boyutlu biçimde ele alınmaktadır. Uygulamanın yalnızca bir prototip olarak değil, aynı zamanda gerçek dünyadaki yönetişim süreçlerine entegre edilebilir bir sistem mimarisi sunduğu ortaya konulmaktadır. Modelin Türkiye'deki İTS ile kıyaslanarak sunduğu yapısal ve işlevsel üstünlükler değerlendirilmekte; ayrıca teknik, kavramsal ve yönetişimsel düzeylerde sağladığı katkılar detaylandırılmaktadır.

Ayrıca sistemin mevcut durumdaki sınırlılıkları ve gelecekte geliştirilebilecek yönleri de bu bağlamda tartışmaya açılmakta; böylece hem çözümün kapsamı netleştirilmekte hem de literatürdeki boşluklara yönelik stratejik bir katkı sunulmaktadır. Bu doğrultuda, modelin katkıları dört başlık altında analiz edilmektedir: teknik düzeyde sağlanan katkılar, İTS ile farklılıklar, yönetişimsel faydalar ve geliştirme potansiyelleri.

7.4.1. Teknik Düzeyde Sağlanan Katkılar

Geliştirilen model, Hyperledger Fabric'in sunduğu dağıtık defter altyapısı ve modüler mimari yetenekleri temelinde kurgulanmış olup, farmasötik tedarik zincirindeki işlem güvenliği, veri bütünlüğü ve otomasyon ihtiyaçlarına yanıt verecek şekilde teknik olarak detaylı biçimde yapılandırılmıştır. Modelin teknik katkıları, sadece yazılım bileşenlerinin çalışabilirliğinden ibaret olmayıp, aynı zamanda kurumsal rollerin ayrıştırılması, işlem sınırlarının belirlenmesi, olay bazlı otomatik veri üretimi ve çok düzeyli izlenebilirlik gibi kritik açılarda da yenilik sunmaktadır.

Bu kapsamda modelin teknik düzeyde sağladığı başlıca katkılar aşağıda özetlenmektedir:

- Otomatik IoT Verisi Entegrasyonu: Sıcaklık verileri, taşıma sürecinde manuel müdahaleye gerek kalmadan IoT cihazları tarafından sistemle entegre biçimde zincire kaydedilmekte, böylece veri manipülasyonu riski ortadan kaldırılmaktadır. Sensör verileri, eşik değerlerle anlık karşılaştırılarak ihlal tespiti otomatik olarak gerçekleştirilmekte ve sistem tarafından zincire "incident" varlığı olarak kaydedilmektedir.
- Zaman Damgası ve İşlem Kimliğiyle Gerçek Zamanlı İzlenebilirlik: Sisteme kaydedilen her işlem UTC zaman damgası ve benzersiz bir işlem kimliği (txID) ile ilişkilendirilmektedir. Bu yapı hem işlemlerin kronolojik takibini kolaylaştırmakta hem de olası uyuşmazlıklarda işlem geçmişinin adli bilişim düzeyinde doğrulanmasına olanak sağlamaktadır.
- Rol Bazlı Chaincode Yetkilendirmesi: Geliştirilen chaincode yapısı, MSP sistemiyle birlikte çalışmakta ve yalnızca belirli rollerin belirli fonksiyonlara erişimine izin verecek şekilde yapılandırılmıştır. Örneğin, yalnızca üretici organizasyon ürün kaydı yapabilirken, yalnızca eczane teslimat kararı alabilmektedir.
- Çok Katmanlı Veri Doğrulama: Sistem, üç düzeyde veri doğrulaması sağlamaktadır: (1) API seviyesinde kimlik ve yetki kontrolü, (2) World State (CouchDB) düzeyinde son veri durumu takibi, (3) Hyperledger Explorer üzerinden blok düzeyinde işlem geçmişi izleme. Bu yapı sayesinde hem teknik hem de kurumsal denetim süreçleri desteklenmektedir.
- REST API ile İnsan-Makine Etkileşimi: Model, kullanıcıların yalnızca komut satırı düzeyinde değil; web tabanlı arayüzler ve Postman gibi test araçları üzerinden de

sisteme erişmesine olanak tanımaktadır. API üzerinden gerçekleştirilen tüm işlemler, JWT token yapısıyla doğrulanmakta ve işlem yetkileri kontrol edilmektedir.

- Distribütör Taraflı Sevkiyat Süreci Otomasyonu: Ürünün üretimden dağıtıcıya ve oradan eczaneye aktarılması süreci, sahiplik aktarımı fonksiyonlarıyla dijitalleştirilmiş; sevkiyat ve çevresel veri takibi süreci tamamen blok zincir altyapısı üzerinden yürütülebilir hâle getirilmiştir.
- Veri Tutarlılığı ve World State Eşleşmesi: CouchDB tabanlı world state veritabanında saklanan her kayıt, chaincode ve API katmanlarında gönderilen veri ile birebir uyumlu olacak şekilde sistematik biçimde işlenmektedir. Bu durum, veri bütünlüğünün sürdürülebilirliğini teknik olarak garanti altına almaktadır.

Bu bağlamda değerlendirildiğinde, geliştirilen sistem, Hyperledger Fabric altyapısını esas alan teknik mimarisiyle ilaç tedarik zinciri süreçlerinde kullanılabilecek temel işlevleri yerine getirebilir nitelikte bir uygulama modeli ortaya koymuştur. Uygulamanın sahip olduğu otomatik veri işleme, rol bazlı erişim, çok düzeyli izlenebilirlik ve zaman damgalı kayıt gibi özellikler, sistemin teknik açıdan uygulanabilirliğini destekleyen başlıca unsurlar arasında yer almaktadır.

7.4.2. İTS ile Kavramsal ve Uygulamalı Farklılıklar

Türkiye'de 2010 yılından bu yana kullanılmakta olan İTS, temel olarak üretimden satışa kadar olan süreçte ilaç hareketlerini barkod temelli bildirimler aracılığıyla izlemeye dayanmaktadır. Sistem, merkezi bir veri tabanına bağlı olarak çalışmakta; tüm aktörler yalnızca kendi yaptığı işlemleri bildirmekle yükümlü tutulmaktadır. Bu yapı, izlenebilirlik açısından belirli bir çerçeve sağlasa da bazı kritik alanlarda sınırlılıklar göstermektedir.

Geliştirilen blok zincir tabanlı model, İTS'nin sınırlılık gösterdiği noktalara alternatif bir yaklaşım sunmayı amaçlamakta ve özellikle niteliksel veri izlenebilirliği, işlem şeffaflığı ve kurumsal sorumluluk paylaşımı gibi alanlarda farklılaşmaktadır. Aşağıda, İTS ile önerilen model arasındaki temel kavramsal ve uygulamalı farklar karşılaştırmalı olarak özetlenmiştir:

- <u>Veri Yapısı ve Dağıtım Modeli:</u>

- İTS: Merkezi bir veri tabanında toplanan ve büyük ölçüde yetkili kurumlarca erişilebilen bir yapıya sahiptir.

✓ Blok Zincir Modeli: Dağıtık defter yapısı sayesinde veriler ağ üzerinde paydaşlar arasında eş zamanlı olarak paylaşılmakta ve güncellenebilmektedir.

➢ Veri Türü:

- İTS: Ürün kimlikleri, hareket kayıtları ve bildirim verilerini kapsar; çevresel koşullar (örneğin sıcaklık, nem) sistem kapsamında değildir.

✓ Model: IoT sensörleri aracılığıyla sıcaklık gibi çevresel bilgiler zincire kaydedilebilmekte, bu sayede taşıma koşulları da izlenebilir hâle gelmektedir.

➢ İşlem Kapsamı:

- İTS: Bildirim esaslı çalışmakta olup, gerçek zamanlı ihlal tespiti gibi gelişmiş fonksiyonlar sınırlıdır.

✓ Model: İşlem anında IoT verisi ile eşik aşımı algılandığında sistem otomatik olarak ihlal kaydı oluşturabilmektedir.

➢ Yetki Paylaşımı:

- İTS: Karar ve kontrol mekanizmaları ağırlıklı olarak merkezi otorite tarafından yürütülmektedir.

✓ Model: Her organizasyon yalnızca kendi işlemlerinden sorumludur. Denetleyici kurum işlemleri şeffaf biçimde izleyebilmekte, ancak doğrudan müdahale etmemektedir.

➢ Veri Değiştirilemezliği:

- İTS: Merkezi yapıda verilerin sonradan güncellenebilmesi ve erişim geçmişinin sınırlı şekilde görülebilmesi söz konusu olabilmektedir.

✓ Model: Her işlem blok zincire zaman damgası ile kalıcı olarak kaydedildiğinden, kayıtlar değiştirilemez ve geriye dönük denetim yapılabilmektedir.

➢ Karar Süreçleri:

- İTS: Eczaneler, çoğunlukla fiziksel kontrole dayalı olarak karar vermekte; sistemin sunduğu bilgiler karar süreçlerini sınırlı ölçüde desteklemektedir.

✓ Model: Eczaneler, geçmiş sevkiyat ve ihlal verilerini sistem üzerinden görüntüleyerek karar verebilmekte ve gerekçelerini zincire kaydedebilmektedir.

Bu karşılaştırma, geliştirilen sistemin mevcut İTS yapısına kıyasla veri kapsamı ve süreç yönetimi açısından daha esnek ve izlenebilir bir yapı sunduğunu göstermektedir. Blok zincir modelinin dağıtık yapısı, veri güvenliği ile organizasyonel sorumluluk paylaşımı bakımından ek avantajlar sağlamaktadır. Böylece sistem, yalnızca ürün hareketlerini kaydetmekle kalmamakta; aynı zamanda bu hareketlerin kalite ve güvenlik parametrelerinin de izlenmesine imkân tanımaktadır.

7.4.3. Kurumsal ve Yönetişimsel Katkılar

Blok zincir tabanlı sistemlerin en belirgin özelliklerinden biri, yalnızca veri kaydı sağlayan bir araç olmaktan öte, işlemlerin hangi aktör tarafından, ne zaman ve hangi koşullar altında gerçekleştirildiğini güvenli biçimde takip edebilme kapasitesine sahip olmalarıdır. Bu özellik, geleneksel merkezi sistemlerin çoğunda eksik olan kurumsal sorumluluk zinciri ve denetlenebilirlik gibi yönetişimsel unsurlar açısından önemli katkılar sunar.

Geliştirilen Hyperledger Fabric tabanlı model, kurumsal işleyişi yalnızca teknik düzeyde değil, aynı zamanda yönetişim ilkeleriyle uyumlu şekilde yapılandırmayı hedeflemiştir. Bu kapsamda modelin yönetişimsel katkıları şu şekilde özetlenebilir:

- Rol Bazlı İşlem Sınırlamaları ve Kurumsal Sorumluluk Ayrımı: Her organizasyon yalnızca kendi tanımlı görev alanı kapsamında işlem gerçekleştirebilecek şekilde yetkilendirilmiştir. Üretici ürün ve parti kaydı yaparken, dağıtıcı yalnızca sevkiyat işlemleri ve sensör verilerini yönetebilmekte; eczane ise ürün geçmişini görüntüleyerek teslim kararı verebilmektedir. Bu yapı, kurumsal sorumlulukların dijital olarak ayrıştırılmasını ve izlenmesini sağlamaktadır.
- Eczane Tarafından Sistem Tabanlı Kalite Kontrolü: Geliştirilen modelde, eczane fiziksel muayene dışında, sistem üzerinden ürünün sevkiyat geçmişini ve ihlal verilerini sorgulayabilmektedir. Bu sayede teslimat kararı, şeffaf ve gerekçelendirilmiş bir şekilde verilmektedir. Red kararı da sistem üzerinde kalıcı olarak kayda geçmekte, bu kararın denetlenebilirliğini mümkün kılmaktadır.
- Denetleyici Kurumun Şeffaf İzleme Yetkisi: Sistemde tanımlı olan denetleyici kurum, blok zincir üzerinde gerçekleşen tüm işlemleri salt-okunur (read-only) erişimle izleyebilmekte; ancak sisteme doğrudan müdahale edememektedir. Bu yapı, dış denetimin bağımsız şekilde yürütülmesine olanak tanıyarak yönetişimsel şeffaflığı artırmaktadır.

- İzlenebilirlik ve Hesap Verebilirlik: Her işlem, kullanıcı kimliği ve zaman damgası ile sisteme kaydedilmekte; böylece kim tarafından ne zaman hangi işlem yapıldığı denetlenebilir hale gelmektedir. İşlemler yalnızca teknik olarak değil, aynı zamanda kurumsal düzeyde de izlenebilir ve gerekirse sorgulanabilir durumdadır.
- Şeffaflık Odaklı Arayüzler ve Görsel Denetim: Sisteme entegre edilen Hyperledger Explorer aracı, blok düzeyinde işlemlerin görselleştirilmesine olanak sağlamakta ve kurumsal izleme süreçlerine destek sunmaktadır. Denetleyici kurum ya da başka bir gözlemci, herhangi bir zamanda hangi işlemin hangi aktör tarafından yapıldığını blok düzeyinde izleyebilmektedir.
- Yetkisiz Erişimin Engellenmesi ve Kurumsal Güvenlik: Kimlik doğrulama süreçleri, yalnızca ilgili organizasyona bağlı kullanıcıların sistemde işlem yapabilmesine izin verecek şekilde yapılandırılmıştır. Bu durum hem veri güvenliğini hem de işlem disiplinini desteklemektedir.

Bu yönleriyle sistem, yalnızca teknik bir altyapı sunmakla kalmamakta; aynı zamanda kurumsal düzeyde sorumluluk ayrımı, işlem şeffaflığı ve hesap verebilirlik gibi yönetişim ilkelerini dijital ortamda uygulanabilir hale getirmektedir. Bu katkıların, özellikle sağlık alanı gibi yüksek denetim gerektiren sektörlerde önemli bir değer yaratma potansiyeline sahip olduğu düşünülmektedir.

7.4.4. Sınırlılıklar ve Geliştirilebilir Alanlar

Geliştirilen blok zincir tabanlı izlenebilirlik modeli, ilaç tedarik zincirinde sıkça karşılaşılan kritik bir problem olan soğuk zincir kırılmasını ele alan önemli bir yapıyı ortaya koymaktadır. Ancak her uygulama gibi bu model de belirli teknik, operasyonel ve kurumsal sınırlılıklarla karşı karşıyadır. Bu sınırlılıkların farkında olmak, hem yapılan çalışmanın sınırlarını doğru şekilde çizmek hem de gelecekteki geliştirme alanlarına dair daha sağlıklı değerlendirmeler yapabilmek açısından önemlidir.

Bu çerçevede modelin mevcut durumdaki sınırlılıkları ve geliştirilmesi mümkün görülen yönleri aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır:

- Gerçek Zamanlı Uyarı ve Bildirim Mekanizması Bulunmamaktadır: Mevcut yapı, IoT verilerini zincire başarılı şekilde kaydedebilmekte; ancak sıcaklık ihlali gibi olayların gerçekleştiği anda ilgili aktörlere otomatik bildirim gönderme mekanizmasına sahip değildir. Bu durum, olaylara gerçek zamanlı müdahale yerine, yalnızca geriye dönük

denetleme yapılmasına olanak tanımaktadır. Gelecekte bu yapıya SMS, e-posta veya mobil bildirim sistemlerinin entegrasyonu planlanabilir.

- IoT Verileri Gerçek Zamanlı Cihazlardan Değil, Test Ortamından Sağlanmıştır: Modelde kullanılan sensör verileri, test ortamında manuel olarak oluşturulmuş ve API aracılığıyla sisteme gönderilmiştir. Gerçek hayattaki taşıma senaryolarında karşılaşılabilecek bağlantı sorunları, veri gecikmeleri veya donanımsal arızalar gibi durumlar test edilmemiştir. Bu durum, uygulamanın saha koşullarına doğrudan hazır olmadığını göstermektedir.
- Mobil Uygulama Entegrasyonu Bulunmamaktadır: Geliştirilen sistem, kurumsal aktörler için API düzeyinde erişilebilir bir yapı sunsa da son kullanıcıların (örneğin eczacılar ya da denetçiler) mobil cihazlar üzerinden ürün sorgulaması yapabileceği bir uygulama geliştirilememiştir. QR kod okuma ve geçmiş veriye anlık erişim gibi işlevler, ilerleyen aşamalarda sistemin yaygınlaşmasını kolaylaştırabilir.
- Yalnızca Belirli Bir Senaryoya Odaklanılmıştır: Model, özellikle sıcaklık ihlali gibi soğuk zincir odaklı bir soruna çözüm üretmektedir. Ancak taşıma gecikmeleri, ürün sahteciliği, stok yönetimi gibi diğer tedarik zinciri riskleri çalışmanın kapsamı dışında bırakılmıştır. İlerleyen çalışmalarda bu alanlara dair modüllerin geliştirilmesiyle sistemin kapsayıcılığı artırılabilir.
- Akıllı Sözleşme Mantığı Sınırlı İş Kurallarıyla Sınırlandırılmıştır: Mevcut chaincode yapısı temel işlevleri başarıyla yerine getirse de karmaşık iş kurallarını otomatik olarak yürütebilecek gelişmiş sözleşme mantıkları (örneğin otomatik bloke etme, ürünün statüsünü değiştirme, tedarikçiye uyarı gönderme) henüz uygulanmamıştır. Bu yapıların geliştirilmesi, sistemin yalnızca kayıt yapan değil, karar alabilen bir yapıya dönüşmesini sağlayacaktır.
- Yasal ve Politik Çerçeve Henüz Tanımlanmamıştır: Geliştirilen model, teknik olarak çalışabilir olmakla birlikte, Türkiye'deki mevzuatlarla nasıl uyumlu hale getirileceği konusunda henüz somut bir düzenleyici çerçeveye oturtulmamıştır. Blok zincir tabanlı sistemlerin sağlık gibi regülasyon yoğun sektörlerde benimsenebilmesi için hem teknik standartların hem de veri sorumluluğu rejimlerinin netleştirilmesi gerekmektedir.

Bu sınırlılıklar, çalışmanın kapsamı ve uygulama koşulları göz önüne alındığında beklenen doğal kısıtlar olarak değerlendirilmektedir. Ancak aynı zamanda bu noktalar, sistemin gelecek aşamalarında geliştirilebilecek yönleri tanımlamak açısından da yol göstericidir. Özellikle mobil uyumluluk, gerçek zamanlı müdahale mekanizmaları, sahadan veri toplama kapasitesi ve akıllı iş kuralları gibi alanlar, sistemin hem kullanıcı deneyimi hem de kurumsal bütünlüğü açısından önemli gelişim potansiyelleri taşımaktadır.

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, ilaç tedarik zincirinde sıklıkla karşılaşılan ve halk sağlığını doğrudan etkileyen bir sorun olan soğuk zincir kırılması problemine yönelik, blok zincir teknolojisinin potansiyelleri kullanılarak geliştirilen bir model ortaya konmuştur. Geliştirilen Hyperledger Fabric tabanlı sistem, yalnızca teknik bir çözüm değil, aynı zamanda merkeziyetçi yapıların sınırlılıklarını aşarak, dağıtık defter teknolojisinin şeffaflık, güvenlik ve denetlenebilirlik gibi temel ilkeleriyle bütünleşen çok yönlü bir yönetişim modeli olarak tasarlanmıştır.

Çalışma boyunca, yalnızca teknolojik araçlar değil; aynı zamanda kamu politikaları, dijital izlenebilirlik, veri bütünlüğü, farmasötik lojistik ve kurumsal sorumluluk gibi kavramlar da birlikte ele alınmış; geliştirilen sistemin mevcut yapılarla karşılaştırıldığında ne gibi katkılar sunduğu detaylı biçimde analiz edilmiştir. Sistemde tanımlanan dört temel organizasyon (üretici, dağıtıcı, eczane ve denetleyici kurum) Hyperledger Fabric mimarisi içinde kendi rol ve sorumlulukları çerçevesinde kurgulanmış; işlem yapma yetkileri rol bazlı erişim kontrolleriyle sınırlanmıştır.

Sistem mimarisi, ürün kaydı, parti oluşturma, sevkiyat başlatma, sıcaklık verisi işleme, ihlal tespiti ve ürün teslim kontrolü gibi süreçlerin tümünü uçtan uca yöneten, doğrulayan ve kayıt altına alan bir yapıda kurgulanmıştır. Özellikle taşıma sürecinde yaşanabilecek sıcaklık ihlallerinin IoT cihazlarıyla otomatik tespiti ve bu ihlallerin sistem üzerinden zaman damgasıyla zincire kaydedilmesi, uygulamanın en dikkat çeken özelliklerinden biri olmuştur. Bu sayede, yalnızca işlem gerçekleştiren aktörün değil, işlemin kendisinin de teknik olarak doğrulanabilirliği sağlanmıştır. Test senaryosu kapsamında gerçekleştirilen uygulamada, sıcaklık sınırının aşıldığı bir senaryo başarıyla simüle edilmiş; eczane bu ihlali sistem üzerinden tespit ederek ürünü reddetmiş ve bu karar hem world state hem de blok düzeyinde sistemsel olarak doğrulanabilir hâle gelmiştir.

Model, yalnızca teknik başarıyla sınırlı kalmamış, aynı zamanda Türkiye'de hâlihazırda kullanılan İTS ile karşılaştırıldığında farklı yönlerden öne çıkan özellikler sunmuştur.

İTS'nin merkezi yapısı ve bildirim esaslı işleyişi nedeniyle taşıma koşulları, sıcaklık ihlalleri veya soğuk zincir bozulmaları gibi niteliksel veriler sistem tarafından doğrudan kaydedilememektedir. Buna karşın geliştirilen sistem, bu tür verileri zincire kaydetmenin yanı sıra, ilgili durumlara ilişkin otomatik aksiyonların alınmasına da imkân tanımaktadır. Bu yaklaşım, yönetişim kapasitesi ve hasta güvenliği bakımından mevcut sistemin tamamlayıcısı niteliğinde alternatif bir dijital altyapı olarak değerlendirilebilmektedir.

Ayrıca, sistemin her bileşeni yalnızca teknik olarak değil, yönetsel süreçler açısından da değerlendirilmiştir. Örneğin, her işlem çağrısının yalnızca yetkili organizasyon tarafından gerçekleştirilebilmesi; transaction'ların MSP kimlikleriyle ilişkilendirilmesi, chaincode seviyesinde erişim denetiminin yapılması ve tüm verilerin zaman damgası ile zincire yazılması, modelin güvenliğini artıran yapısal unsurlar arasında yer almıştır. Sisteme entegre edilen Hyperledger Explorer ve CouchDB arayüzleri, işlemlerin hem world state düzeyinde hem de blok zincir katmanında izlenebilmesini sağlamış; geliştirilen modelin teknik olarak bütünleşik ve doğrulanabilir olduğunu ortaya koymuştur.

Elde edilen bulgular, geliştirilen modelin yalnızca akademik bir prototip olarak değil, gerçek dünyada uygulanabilir bir sistem mimarisi olarak da değerlendirilebileceğini göstermektedir. Blok zincir temelli bu yapı, özellikle kamu hizmetlerinin dijitalleşmesi sürecinde alternatif bir yönetişim aracı olarak değerlendirilebilir. Modelin dağıtık mimarisi sayesinde merkezi arızalara ve veri manipülasyonlarına karşı daha dayanıklı olduğu; verinin kaynağına kadar izlenebildiği ve taraflar arasında güvene dayalı bir işlem mekanizması oluşturduğu açıkça ortaya konmuştur.

Bununla birlikte, sistemin uygulandığı ortam simülasyon tabanlıdır ve gerçek zamanlı saha verisi ile test edilmemiştir. IoT verileri test ortamında manuel olarak gönderilmiştir ve gerçek zamanlı sensör entegrasyonu, bağlantı güvenliği, enerji verimliliği ve donanımsal arızalar gibi faktörler ilerleyen aşamalarda sistemin dayanıklılığını etkileme potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, gerçek ortamda bir pilot proje çerçevesinde uygulanması, sistemin saha koşullarına uygunluğunu değerlendirmek açısından önemli bir adım olacaktır.

Çalışmanın ulaştığı en önemli sonuçlardan biri de blok zincir tabanlı sistemlerin yalnızca finans sektörü ile sınırlı olmadığını; ilaç tedarik zinciri gibi kamu sağlığını doğrudan ilgilendiren alanlarda da somut katkılar sunabileceğini göstermesidir. Geliştirilen model,

yalnızca bir teknolojik çözüm değil, aynı zamanda kamusal hesap verebilirlik, veri şeffaflığı ve süreç güvenliği gibi ilkelerin de destekçisi olan bir yönetişim aracıdır.

Bu bağlamda, gelecekteki geliştirme alanları büyük önem arz etmektedir. Öncelikle sistemin bir mobil uygulama ile desteklenmesi, sahada çalışan eczacılar, denetçiler ve sağlık çalışanları için kullanım kolaylığı sağlayabilir. Son kullanıcı doğrulaması, QR kodla ürün geçmişi sorgulama ve mobil bildirim sistemleri entegre edilebilir. Yapay zekâ destekli analiz modülleri ile taşıma sırasında sık tekrar eden ihlal örüntüleri tespit edilerek erken uyarı sistemleri geliştirilebilir. Örneğin, belirli firmaların sevkiyatlarında sıklıkla sıcaklık ihlali yaşanıyorsa, sistem bu firmalara yönelik uyarı ya da denetim çağrısı oluşturabilir.

Bunun yanında, akıllı sözleşmelerin daha da genişletilmesi ile ihlallerin tespiti hâlinde otomatik yaptırım mekanizmaları (örneğin sistem içi puan düşümü, denetim başlatma, tedarikçi uyarısı) devreye alınabilir. Bu da sistemi yalnızca pasif bir kayıt mekanizmasından çıkararak, aktif bir yönetişim platformuna dönüştürebilir. Modelin Sağlık Bakanlığı gibi ulusal düzeyde yetkili kurumların sistemleriyle entegre çalışması da mümkündür. Böyle bir entegrasyon, merkezi sistemlerin verisini dışa kapalı şekilde yönetme pratiğinden uzaklaşılarak, şeffaf ve tarafsız bir veri mimarisi üzerinden sağlık yönetiminin dijitalleştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Diğer yandan, geliştirilen bu modelin yalnızca ilaç sektöründe değil, benzer risk yapısına sahip diğer alanlarda da uygulanabilirliği bulunmaktadır. Tarım ürünlerinin soğuk zincirle taşınması, aşıların dağıtımı, kan torbası lojistiği ve bozulabilir gıda ürünleri gibi alanlarda benzer mimarilerle çalışma yapılabilir. Böylece, geliştirilen model bir sektöre değil, bir izlenebilirlik paradigmasına dönüşebilir.

Blok zincir tabanlı bu izlenebilirlik sisteminin kurumsal yapılara entegrasyonu, yalnızca teknolojik bir dönüşüm değil; aynı zamanda yönetimsel paradigma değişimi olarak da değerlendirilmelidir. Özellikle merkeziyetsiz ve denetlenebilir yapılar, geleneksel kamu kurumlarının veri saklama ve paylaşım biçimlerinde köklü bir değişimi gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda, sistemin hukuki düzenlemelerle desteklenmesi, etik veri paylaşım protokollerinin geliştirilmesi ve kamu-özel sektör iş birliklerinin güçlendirilmesi önemli bir gelişim ekseni olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca sistemin sürdürülebilirliği açısından, açık kaynak kodlu yazılım yapısının korunması ve sürekli güncellenebilir modüler mimarinin teşvik edilmesi gerekir. Bu gelişmeler sayesinde, blok

zincir temelli izlenebilirlik sistemleri, yalnızca teknik uygulamalar olmaktan çıkarak; regülasyon, güvenlik ve hesap verebilirlik gibi yönetişim değerlerini kurumsal yapılar içinde kalıcı hâle getiren stratejik bileşenlere dönüşebilir.

Sonuç olarak, bu tez yalnızca teknik bir uygulama örneği değil; dijital kamu hizmetlerinin nasıl yeniden yapılandırılabileceğine dair stratejik bir vizyon sunmaktadır. Soğuk zincir kırılması gibi somut bir sorun üzerinden yola çıkılarak geliştirilen model hem akademik literatürde hem de kamusal uygulamalarda referans gösterilebilecek düzeyde bir katkı sağlamış; blok zincirin sadece bir teknoloji değil, aynı zamanda bir yönetişim aracı olabileceğini güçlü biçimde ortaya koymuştur.

KAYNAKÇA

Abdallah, S., & Nizamuddin, N. (2023). Blockchain-based solution for pharma supply chain industry. *Computers & Industrial Engineering*, *177*, 108997.

Accenture. (2020). *Only 10% of Companies Have the Customer-Centric Supply Chains Required for Resilience, According to New Accenture Report*. https://newsroom.accenture.com/news/2020/only-10-percent-of-companies-have-the-customer-centric-supply-chains-required-for-resilience-according-to-new-accenture-report Erişim Tarihi: 27.02.2025

Adeyemo, K. S., Mbata, A. O., & Balogun, O. D. (2021). The Role of Cold Chain Logistics in Vaccine Distribution: Addressing Equity and Access Challenges in Sub-Saharan Africa.

Agbeyangi, A., Oki, O., & Mgidi, A. (2024). Blockchain in Healthcare: Implementing Hyperledger Fabric for Electronic Health Records at Frere Provincial Hospital. *arXiv preprint arXiv:2407.15876*.

Agrawal, D., Minocha, S., Namasudra, S., & Gandomi, A. H. (2022). A robust drug recall supply chain management system using hyperledger blockchain ecosystem. *Computers in Biology and Medicine*, *140*, 105100.

Agrawal, T. K., Kumar, V., Pal, R., Wang, L., & Chen, Y. (2021). Blockchain-based framework for supply chain traceability: A case example of textile and clothing industry. *Computers & industrial Engineering*, *154*, 107130.

AgriDigital. (2022). *In the News*. https://www.agridigital.io/news/in-the-news Erişim Tarihi:04.05.2025.

Ahmad, K., Islam, M. S., Jahin, M. A., & Mridha, M. F. (2024). Analysis of Internet of things implementation barriers in the cold supply chain: An integrated ISM-MICMAC and DEMATEL approach. *Plos One*, *19*(7), e0304118.

Ahmad, R. W., Hasan, H., Yaqoob, I., Salah, K., Jayaraman, R., & Omar, M. (2021). Blockchain for aerospace and defense: Opportunities and open research challenges. *Computers & Industrial Engineering*, *151*, 106982.

Ahn, H. I., Olivar, S., Mehta, H., & Song, Y. C. (2024). Generative Probabilistic Planning for Optimizing Supply Chain Networks. *arXiv Preprint arXiv:2404.07511*.

Al Salih, A. (2024). *Byzantine Fault Tolerant Consensus for Hyperledger Fabric* (Doctoral dissertation, The University of North Carolina at Charlotte).

Alamsyah, A., & Syahrir, S. (2023). The taxonomy of blockchain-based technology in the financial industry. *F1000Research*, *12*, 457.

Allende, M., León, D. L., Cerón, S., Pareja, A., Pacheco, E., Leal, A., ... & Venegas-Andraca, S. E. (2023). Quantum-resistance in blockchain networks. *Scientific Reports*, *13*(1), 5664.

Almarri, S., & Aljughaiman, A. (2024). Blockchain technology for IoT security and trust: a comprehensive SLR. *Sustainability*, *16*(23), 10177.

Alonge, E. O., Eyo-Udo, N. L., Ubanadu, B. C., Daraojimba, A. I., Balogun, E. D., & Ogunsola, K. O. (2023). Real-time data analytics for enhancing supply chain efficiency. *Journal of Supply Chain Management and Analytics*, *10*(1), 49-60.

Alsadi, M., Arshad, J., Ali, J., Prince, A., & Shishank, S. (2023). TruCert: Blockchain-based trustworthy product certification within autonomous automotive supply chains. *Computers and Electrical Engineering*, *109*, 108738.

Alshinwan, M., Shdefat, A. Y., Mostafa, N., M AlSokkar, A. A., Alsarhan, T., & Almajali, D. (2023). Integrated cloud computing and blockchain systems: A review. *International Journal of Data & Network Science*, *7*(2).

Alzhrani, F., Saeedi, K., & Zhao, L. (2023). Architectural patterns for blockchain systems and application design. *Applied Sciences*, *13*(20), 11533.

American Hospital Association. (2021, June 30). *FDA: 43 new drug shortages, 86 ongoing shortages in 2020*. https://www.aha.org/news/headline/2021-06-30-fda-43-new-drug-shortages-86-ongoing-shortages-2020

Amin, M. R., Zuhairi, M. F., & Saadat, M. N. (2021, January). Transparent data dealing: Hyperledger fabric based biomedical engineering supply chain. In *2021 15th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM)* (pp. 1-5). IEEE.

Androulaki, E., Barger, A., Bortnikov, V., Cachin, C., Christidis, K., De Caro, A., ... & Yellick, J. (2018, April). Hyperledger fabric: a distributed operating system for

permissioned blockchains. In *Proceedings of the thirteenth EuroSys conference* (pp. 1-15).

Anozie, U. C., Pieterson, K., Onyenahazi, O. B., Chukwuebuka, U. O., & Ekeocha, P. C. (2024). Integration of IoT technology in lean manufacturing for real-time supply chain optimization. *International Journal of Science and Research Archive*, *12*(2), 1948-1957.

Antonopoulos, A. M. (2014). *Mastering Bitcoin: unlocking digital cryptocurrencies*. " O'Reilly Media, Inc.".

APICS. (2017). *Supply Chain Operations Reference model (SCOR), Version 12.0: Quick Reference Guide*. Chicago, IL: APICS.

Appinventiv. (2023). *Blockchain for enterprise: Use cases, features, and challenges.* Appinventiv. Erişim adresi: https://appinventiv.com/blog/blockchain-use-cases-in-enterprise

Årdal, C., Baraldi, E., Beyer, P., Lacotte, Y., Larsson, D. J., Ploy, M. C., ... & Smith, I. (2021). Supply chain transparency and the availability of essential medicines. *Bulletin of the World Health Organization*, *99*(4), 319.

Asif, R., & Hassan, S. R. (2023). Shaping the future of Ethereum: Exploring energy consumption in Proof-of-Work and Proof-of-Stake consensus. *Frontiers in Blockchain*, *6*, 1151724.

Aslan, A. (2023). Örgütsel Adaptasyon Yeteneği ve Tedarik Zinciri Performansı İlişkisinde Tedarik Zinciri Dijitalleşmesinin Aracı Rolü ve Ölçeklerin Türkiye Bağlamında Geçerlilikleri. *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (59), 19-43.

Atkins, R., & Caldwell, C. (2020). Supply Chain Responsibility and Sustainability. *Business & Professional Ethics Journal*, *39*(2), 147-168.

Ayhan, E., Aytekin, M., & Güvener, H. (2021). Türkiye'de İlaç Tedarik Zincirinde Kullanılan İlaç Takip Sistemi ile Blok Zincir Tabanlı İlaç Tedarik Zinciri Uygulamalarının Karşılaştırılması. *In 7th İnternational Istanbul Scientific Research Congress* (pp. 18-19).

Babu, E. S., Kavati, I., Nayak, S. R., Ghosh, U., & Al Numay, W. (2024). Secure and transparent pharmaceutical supply chain using permissioned blockchain network. *International Journal of Logistics Research and Applications*, *27*(12), 2839-2866.

Back, A. (2002). Hashcash-a denial of service counter-measure.

Bakos, Y., & Halaburda, H. (2021). Permissioned vs permissionless blockchain platforms: Tradeoffs in trust and performance. *NYU Stern School of Business Working Paper*.

Bali, V., Soni, P., Khanna, T., Gupta, S., Chauhan, S., & Gupta, S. (2021). Blockchain application design and algorithms for traceability in pharmaceutical supply chain. *International Journal of Healthcare Information Systems and Informatics (IJHISI)*, *16*(4), 1-18.

Baliga, A. (2017). Understanding blockchain consensus models. *Persistent*, *4*(1), 14.

Bapatla, A. K., Mohanty, S. P., Kougianos, E., Puthal, D., & Bapatla, A. (2023). PharmaChain: A blockchain to ensure counterfeit-free pharmaceutical supply chain. *IET Networks*, *12*(2), 53-76.

Bapatla, A. K. (2024). *PharmaChain: Distributed ledger based robust solutions to ensure counterfeit-free pharmaceutical supply chain* (Doctoral dissertation). University of North Texas.

Barhmi, A. (2023). Risk management, robustness and resilience: mechanisms for stabilizing and improving agility performance. *Production*, *33*, e20220119.

Baset, S. A., Desrosiers, L., Gaur, N., Novotny, P., O'Dowd, A., & Ramakrishna, V. (2018). *Hands-on blockchain with Hyperledger: building decentralized applications with Hyperledger Fabric and composer*. Packt Publishing Ltd.

Bettín-Díaz, R., Rojas, A. E., & Mejía-Moncayo, C. (2022, November). Colombian origin coffee supply chain traceability by a blockchain implementation. In *Operations Research Forum* (Vol. 3, No. 4, p. 64). Cham: Springer International Publishing.

BMW Group. (2022). BMW Group uses Blockchain to drive supply chain transparency. https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0307164EN/bmw-group-uses-blockchain-to-drive-supply-chain-transparency?language=en

Bozarth, C. C., Warsing, D. P., Flynn, B. B., & Flynn, E. J. (2009). The impact of supply chain complexity on manufacturing plant performance. *Journal of Operations Management*, *27*(1), 78-93.

Bratić, D. (2011). Achieving a competitive advantage by SCM. *IBIMA Business Review*, *2011*, 1-13.

Bulut, S., & Bilgener, E. (2022). Evaluation of turkish pharmaceutical track and trace system (ITS): perspective of community pharmacists. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, *58*, e20407.

Burt, A. (2018). *Views from APICS 2018: The evolution of a fragmented supply chain industry*. Supply Chain Dive. https://www.supplychaindive.com/news/supply-chain-profession-evolution-APICS/539250/ Erişim Tarihi: 16.02.2025

Buterin, V. (2014). A next-generation smart contract and decentralized application platform. *White Paper*, *3*(37), 2-1.

Büyüközkan, G., & Çifçi, G. (2012). Evaluation of the green supply chain management practices: a fuzzy ANP approach. *Production Planning & Control*, *23*(6), 405-418.

Büyüközkan, G., & Göçer, F. (2018). Digital Supply Chain: Literature review and a proposed framework for future research. *Computers in Industry*, *97*, 157-177.

Cachin, C. (2016, July). Architecture of the hyperledger blockchain fabric. In *Workshop on distributed cryptocurrencies and Consensus Ledgers* (Vol. 310, No. 4, pp. 1-4).

Caro, F., & Gallien, J. (2010). Inventory management of a fast-fashion retail network. *Operations Research*, *58*(2), 257-273.

Castro, M., & Liskov, B. (1999). *Practical Byzantine fault tolerance*. In M. Dahlin (Ed.), Proceedings of the Third Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI '99) (pp. 173–186). USENIX Association.

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.

Centobelli, P., Cerchione, R., Del Vecchio, P., Oropallo, E., & Secundo, G. (2022). Blockchain technology for bridging trust, traceability and transparency in circular supply chain. *Information & Management*, *59*(7), 103508.

Chen, C. L., Lim, Z. Y., & Liao, H. C. (2023). Blockchain-based alcoholic beverages supply chain management system. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, *14*(3), 2493-2523.

Chen, C. L., Shang, X., Tsaur, W. J., Weng, W., Deng, Y. Y., Wu, C. M., & Cui, J. (2021). An anti-counterfeit and traceable management system for brand clothing with hyperledger fabric framework. *Symmetry*, *13*(11), 2048.

Chen, C. L., Zhan, W. B., Huang, D. C., Liu, L. C., Deng, Y. Y., & Kuo, C. G. (2023). Hyperledger fabric-based tea supply chain production data traceable scheme. *Sustainability*, *15*(18), 13738.

Chen, C. L., Zhu, Z. P., Zhou, M., Tsaur, W. J., Wu, C. M., & Sun, H. (2022). A secure and traceable vehicles and parts system based on blockchain and smart contract. *Sensors*, *22*(18), 6754.

Chen, R. (2024). Sustainable supply chain management as a strategic enterprise innovation. *Advances in Economics, Management and Political Sciences*, *85*, 24-29.

Chhay, S., & Scheckelhoff, D. (2023). Cold chain management in health systems: Navigating a complex and evolving landscape. *American Journal of Health-System Pharmacy*, *80*(22), 1601-1602.

Christopher, M. (2005). *Logistics and Supply Chain Management: Creating Value-Adding Networks* (3rd ed.). Harlow, UK: Pearson Education.

Christopher, M. (2016). *Logistics & Supply Chain Management* (5th ed.). Harlow, UK: Pearson.

Chohan, U. W. (2019). The limits to Blockchain? Scaling vs. decentralization.

Chronicled & The LinkLab. (2017). *The MediLedger Project: A blockchain-based system to safeguard the pharmaceutical industry* [White paper]. Chronicled. https://uploads-ssl.webflow.com

Chronicled. (2023). *MediLedger: Contracts and Chargebacks Overview*. Erişim adresi: https://www.chronicled.com/one-pager/mediledger-contracts-and-chargebacks-overview

Chronicled. (2024). *Chronicled's 2023 Annual MediLedger Progress Report*. https://www.chronicled.com/content-resources/chronicleds-2023-annual-mediledger-progress-report

Chopra, S., & Meindl, P. (2016). Supply Chain Management–Strategy, Planning, and Operation 6 th Edition.

Chopra, S., & Meindl, P. (2019). *Supply chain management: Strategy, planning, and operation* (7th ed.). Pearson.

Chu, T. T., & Pham, T. T. T. (2024). Vertical coordination in agri-food supply chain and blockchain: A proposed framework solution for Vietnamese cashew nut business. *Regional Science Policy & Practice*, *16*(3), 12576.

Click, K., Singh, A., Parizi, R. M., Srivastava, G., & Dehghantanha, A. (2020). Immutable and secure IP address protection using blockchain. *Blockchain Cybersecurity, Trust and Privacy*, 233-246.

Cong, L. W., Li, Y., & Wang, N. (2018). *Token-based corporate finance*. Working paper.

Cong, L. W., Li, Y., & Wang, N. (2021). Tokenomics: Dynamic adoption and valuation. *The Review of Financial Studies*, *34*(3), 1105-1155.

Cooper, M. C., Lambert, D. M., & Pagh, J. D. (1997). Supply chain management: more than a new name for logistics. *The international journal of Logistics Management*, *8*(1), 1-14.

ConsenSys. (2022). *Quorum Overview: Enterprise-Grade Blockchain Solutions*. Erişim adresi: https://consensys.net/quorum/

Criollo-C, S., Altamirano-Suarez, E., Jaramillo-Villacís, L., Vidal-Pacheco, K., Guerrero-Arias, A., & Luján-Mora, S. (2022). Sustainable teaching and learning through a mobile application: A case study. *Sustainability*, *14*(11), 6663.

Croom, S., Romano, P., & Giannakis, M. (2000). Supply chain management: an analytical framework for critical literature review. *European Journal of Purchasing & Supply Management*, *6*(1), 67-83.

Crossland, V., Dellwo, C., Bashar, G., & Dagher, G. G. (2023). Janus: Toward preventing counterfeits in supply chains utilizing a multi-quorum blockchain. *Blockchain: Research and Applications*, *4*(4), 100157.

Çalıkuşu, M., & Özçelikay, G. (2024). Opinions of pharmacists in Turkiye on drug shortages and effects on treatment. *Hacettepe University Journal of the Faculty of Pharmacy*, *44*(1), 18-28.

Dai, W. (1998). B-Money-an anonymous, distributed electronic cash system. *Distributed Ledger], Weidai.com*.

Dai, Y., Lu, G., & Huang, Y. (2024). A Blockchain-Based Access Control System for Secure and Efficient Hazardous Material Supply Chains. *Mathematics*, *12*(17), 2702.

Das, P., Singh, M., Karras, D. A., & Roy, D. G. (2023). Block-a-city: An agricultural application framework using blockchain for next-generation smart cities. *IETE Journal of Research*, *69*(9), 5773-5783.

Dash, S., Ghugar, U., Godavarthi, D., & Mohanty, S. N. (2024). HCSRL: hyperledger composer system for reducing logistics losses in the pharmaceutical product supply chain using a blockchain-based approach. *Scientific Reports*, *14*(1), 13528.

Dave, M., Patil, K., Jaiswal, R., & Pawar, R. (2022, February). Monitoring supply chain of pharmaceutical drugs using blockchain. In *2022 IEEE Delhi Section Conference (DELCON)* (pp. 1-5). IEEE.

Davis, T. (1993). Effective supply chain management. *Sloan Management Review*, *34*, 35-35.

Daoud, E. (2019). Decentralizing of transparency: using blockchain to reduce counterfeiting. In *17th International Conference on e-Society 2019*.

Das, S. R., Zaman, D. N., Asirvatham, D., Ashfaq, F., Masud, M., & Shorfuzzaman, M. (2025). Empirical Performance Analysis of Hyperledger Fabric. *Available at SSRN 5127328*.

De Giovanni, P. (2020). Blockchain and smart contracts in supply chain management: A game theoretic model. *International Journal of Production Economics*, *228*, 107855.

Deepu, T. S., & Ravi, V. (2021). A conceptual framework for supply chain digitalization using integrated systems model approach and DIKW hierarchy. *Intelligent Systems with Applications*, *10*, 200048.

Douaioui, K., Oucheikh, R., Benmoussa, O., & Mabrouki, C. (2024). Machine Learning and Deep Learning Models for Demand Forecasting in Supply Chain Management: A Critical Review. *Applied System Innovation (ASI)*, *7*(5).

Dow & BanQu. (2024). Blockchain in Supply Chain Management: Project 2Life. https://www.banqu.co/blog/blockchain-in-supply-chain-management

EBSI-VECTOR. (2024). *Annual – Summary of dissemination and communication activitie.* https://www.ebsivector.eu/wpcontent/uploads/2024/06/D7.5_Approved_Red.pdf

EIN Presswire. (2021). *Zimbabwe Signs MOU, Developing and Implementing MediConnectUK Blockchain-based Supply-Chain System*. EIN Presswire. https://www.einpresswire.com/article/544381386/zimbabwe-signs-mou-developing-and-implementing-mediconnectuk-blockchain-based-supply-chain-system

Ekawati, R., Arkeman, Y., Suprihatin, S., & Sunarti, T. C. (2023). Implementation of ethereum blockchain on transaction recording of white sugar supply chain data. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, *29*(1), 396-403.

El Baz, J., & Ruel, S. (2021). Can supply chain risk management practices mitigate the disruption impacts on supply chains' resilience and robustness? Evidence from an empirical survey in a COVID-19 outbreak era. *International Journal of Production Economics*, *233*, 107972.

Elliott, M., Golub, B., & Leduc, M. V. (2022). Supply network formation and fragility. *American Economic Review*, *112*(8), 2701-2747.

Ellram, L. M. (1991). Supplychain management: the industrial organisation perspective. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, *21*(1), 13-22.

Energy Web Foundation. (2022). Energy Web: Building operating systems for energy grids with blockchain. https://www.energyweb.org/

Erdal, M. (2018). *Satınalma ve tedarik zinciri yönetimi.* Beta yayınları.

European Commission. (2016). *Commission Delegated Regulation (EU) 2016/161 of 2 October 2015 supplementing Directive 2001/83/EC as regards the rules and technical specifications for safety features for medicinal products for human use*. Official Journal of the European Union, L32, 1–9. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2016/161/oj Erişim Tarihi:19.03.2025

Esan, O., Ajayi, F. A., & Olawale, O. (2024). Supply chain integrating sustainability and ethics: Strategies for modern supply chain management. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, *22*(1), 1930-1953.

FarmaTrust (2018). *Pharmaceutical tracking & data*. https://www.farmatrust.com/copy-of-pharmaceutical-tracking-dat

Farooq, M. S., Riaz, S., Rehman, I. U., Khan, M. A., & Hassan, B. (2023). A blockchain-based framework to make the rice crop supply chain transparent and reliable in agriculture. *Systems*, *11*(9), 476.

Fernández-Caramés, T. M., Blanco-Novoa, O., Froiz-Míguez, I., & Fraga-Lamas, P. (2019). Towards an autonomous industry 4.0 warehouse: A UAV and blockchain-based system for inventory and traceability applications in big data-driven supply chain management. *Sensors*, *19*(10), 2394.

Francis, J. R., Mairose, B. M., & Tichy, E. M. (2021). 2020—The Year the World was awakened to the importance of Supply Chain Management. *Mayo Clinic Proceedings: Innovations, Quality & Outcomes*, *5*(1), 187-192.

Franco, P. (2014). *Understanding Bitcoin: Cryptography, engineering and economics*. John Wiley & Sons.

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.

Ginting, V. N. S., & Tesselhof, K. (2023). How Does Starbucks Implement The Blockchaın System In Supply Chaın Management To Maıntaın Its Product Qualıty? *Diponegoro Journal of Accounting*, *12*(4).

Girma, M., Mekasha, Y. T., Yami, M. F., Tegegne, A. A., Asfaw, A., Beyene, G., & Usure, R. E. (2024). Effect of cold chain management practices on health centers operational performance: A facility Based cross-sectional study.

Gomasta, S. S., Dhali, A., Tahlil, T., Anwar, M. M., & Ali, A. M. S. (2023). PharmaChain: Blockchain-based drug supply chain provenance verification system. *Heliyon*, *9*(7).

Gómez, J. C. O., & España, K. T. (2020). Operational risk management in the pharmaceutical supply chain using ontologies and fuzzy QFD. *Procedia Manufacturing*, *51*, 1673-1679.

Goswami, A., Baveja, A., Ding, X., Melamed, B., & Roberts, F. (2024). An integrated framework for modeling pharmaceutical supply chains with disruptions and risk mitigation. *Annals of Operations Research*, 1-26.

Gramoli, V., Guerraoui, R., Lebedev, A., & Voron, G. (2024). Stabl: Blockchain Fault Tolerance. *arXiv preprint arXiv:2409.13142*.

Guo, Y., Liu, F., Song, J. S., & Wang, S. (2025). Supply chain resilience: A review from the inventory management perspective. *Fundamental Research*, *5*(2), 450-463.

Gupta, S., & Sadoghi, M. (2021). Blockchain transaction processing. *arXiv preprint arXiv:2107.11592*.

Güçlü, K. (2019). *Blokzincir teknolojisi ve uygulama alanları*. [Uzmanlık Tezi, T.C. Ticaret Bakanlığı]. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.

Haber, S., & Stornetta, W. S. (1991). *How to time-stamp a digital document* (pp. 437-455). Springer Berlin Heidelberg.

Handfield, R., & Linton, T. (2017). *The Living supply chain: The evolving imperative of operating in real time*. John Wiley & Sons.

Haque, B., Hasan, R., & Zihad, O. M. (2021). SmartOil: Blockchain and smart contract-based oil supply chain management. *IET Blockchain*, *1*(2-4), 95-104.

HealthManagement.org. *UAE launches health data storage blockchain*. HealthManagement.org. https://healthmanagement.org/c/it/News/uae-launches-health-data-storage-blockchain

Hendijani, R., & Saeidi Saei, R. (2020). Supply chain integration and firm performance: the moderating role of demand uncertainty. *Cogent Business & Management*, *7*(1), 1760477.

Herburger, M., Wieland, A., & Hochstrasser, C. (2024). Building supply chain resilience to cyber risks: a dynamic capabilities perspective. *Supply Chain Management: An International Journal*, *29*(7), 28-50.

Hoek, R. I. V. (1998). Reconfiguring the supply chain to implement postponed manufacturing. *The International Journal of Logistics Management*, *9*(1), 95-110.

Hoffman, M. R., Ibáñez, L. D., & Simperl, E. (2020). Toward a formal scholarly understanding of blockchain-mediated decentralization: A systematic review and a framework. *Frontiers in Blockchain*, *3*, 35.

Hong Kong Institute for Monetary and Financial Research [HKIMR]. (2024). *The Metaverse*. Hong Kong Academy of Finance. https://www.aof.org.hk/docs/default-source/hkimr/applied-research-report/metarep.pdf

Hu, B., Zhang, Z., Liu, J., Liu, Y., Yin, J., Lu, R., & Lin, X. (2021). A comprehensive survey on smart contract construction and execution: paradigms, tools, and systems. *Patterns*, *2*(2).

Huan, S. H., Sheoran, S. K., & Wang, G. (2004). A review and analysis of supply chain operations reference (SCOR) model. *Supply chain management: An international Journal*, *9*(1), 23-29.

Huang, J., Tan, L., Mao, S., & Yu, K. (2021). Blockchain network propagation mechanism based on P4P architecture. *Security and Communication Networks*, *2021*(1), 8363131.

Huang, K., Wang, K., Lee, P. K., & Yeung, A. C. (2023). The impact of industry 4.0 on supply chain capability and supply chain resilience: A dynamic resource-based view. *International Journal of Production Economics*, *262*, 108913.

Hussein, Z., Salama, M. A., & El-Rahman, S. A. (2023). Evolution of blockchain consensus algorithms: a review on the latest milestones of blockchain consensus algorithms. *Cybersecurity*, *6*(1), 30.

Hyperledger Architecture Working Group. (2017). *Hyperledger architecture, volume 1: Introduction to Hyperledger business blockchain design philosophy and consensus*. Linux Foundation. https://lists.hyperledger.org/g/architecture-wg/attachment/61/0/HyperLedger_Arch_WG_Paper_1_Consensus_Finalv1.pdf Erişim Tarihi:15.04.2025

Hyperledger. (2022). *About Hyperledger*. https://www.hyperledger.org/about

Hyperledger Fabric Documentation. (2025). *How Fabric networks are structured*. https://hyperledger-fabric.readthedocs.io/en/latest/network/network.html

Hyperledger Foundation. (2020). *Hyperledger Fabric Documentation (Release 2.2)*. https://hyperledger-fabric.readthedocs.io/en/release-2.2/index.html

Hyperledger Foundation. (2025). *About Hyperledger*. https://www.hyperledger.org/about Erişim Tarihi: 14.04.2025

IBM. (2020). *IBM Food Trust Delivers Traceability, Quality Assurance to Major Olive Oil Brands with Blockchain*. IBM Newsroom. https://newsroom.ibm.com/2020-11-11-IBM-Food-Trust-Delivers-Traceability-Quality-Assurance-to-Major-Olive-Oil-Brands-with-Blockchain

IBM Canada Newsroom. (2019). *Boehringer Ingelheim Canada Ltd. and IBM Canada Announce First-of-its-Kind Collaboration to Integrate Blockchain Technology into Clinical Trials*. IBM Canada Newsroom. https://canada.newsroom.ibm.com/2019-02-12-Boehringer-Ingelheim-Canada-Ltd-and-IBM-Canada-Announce-First-of-its-Kind-Collaboration-to-Integrate-Blockchain-Technology-into-Clinical-Trials

IBM Community. (2024). *2024 insights from the X-Force Threat Intelligence Index Report are here!* https://community.ibm.com/community/user/discussion/2024-insights-from-the-x-force-threat-intelligence-index-report-are-here Erişim Tarihi:18.02.2025

IBM Newsroom. (2021, March 4). *Moderna and IBM plan to collaborate on COVID-19 vaccine supply chain and distribution data sharing*. IBM Newsroom. https://newsroom.ibm.com/2021-03-04-Moderna-and-IBM-Plan-to-Collaborate-on-COVID-19-Vaccine-Supply-Chain-and-Distribution-Data-Sharing

Imai, M. (1986). *Kaizen: The key to Japan's competitive success*. McGraw-Hill.

Innovative Health Initiative. (2020). *PharmaLedger project factsheet*. Innovative Health Initiative. https://www.ihi.europa.eu/projects-results/project-factsheets/pharmaledger

International Organization for Standardization (ISO). (2024). *ISO/TC 307 – Blockchain and distributed ledger technologies*. https://www.iso.org/committee/6266604.html

ISDA, L. (2017). *Whitepaper: smart contracts and distributed ledger–a legal perspective*.

Ishfaq, R., Davis, Sramek, B., & Gibson, B. (2022). Digital supply chains in omnichannel retail: A conceptual framework. *Journal of Business Logistics*, *43*(2), 169-188.

Ismail, S., Nouman, M., Reza, H., Vasefi, F., & Zadeh, H. K. (2024). A Blockchain-Based Fish Supply Chain Framework for Maintaining Fish Quality and Authenticity. *IEEE Transactions on Services Computing*.

Ivanov, D., & Dolgui, A. (2020). Viability of intertwined supply networks: extending the supply chain resilience angles towards survivability. A position paper motivated by COVID-19 outbreak. *International journal of production research*, *58*(10), 2904-2915.

IQVIA Institute for Human Data Science. (2024). *The Use of Medicines in the U.S. 2024: Usage and Spending Trends and Outlook to 2028*. IQVIA. https://www.iqvia.com/insights/the-iqvia-institute/reports/the-use-of-medicines-in-the-us-2024

İlaç Takip Sistemi. (2023). *İlaç Takip Sistemi Nedir?*https://www.its.gov.tr/ Erişim Tarihi: 20.03.2025

İpekçi, E., & Tanyaş, M. (2021). Soğuk zincir lojistiği uygulamalari ve Türkiye'de soğuk zincir lojistiğinin swot analizi. *Dicle Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (26), 46-64.

Jamil, F., Hang, L., Kim, K., & Kim, D. (2019). A novel medical blockchain model for drug supply chain integrity management in a smart hospital. *Electronics*, *8*(5), 505.

Jean, G. (2024). Supply Chain Cybersecurity and Data Privacy.

Jha, R. K., Alam, P., Priyadarshi, N., Ghazi, M. A., & Bhargavi, M. S. (2023, January). Counterfeit drug prevention in pharma supply chain using blockchain technology. In *2023 3rd International Conference on Intelligent Communication and Computational Techniques (ICCT)* (pp. 1-6). IEEE.

Jodlbauer, H., Brunner, M., Bachmann, N., Tripathi, S., & Thürer, M. (2023). Supply chain management: a structured narrative review of current challenges and recommendations for action. *Logistics*, *7*(4), 70.

Kanstrén, T. (2021, February 16). Merkle Trees: Concepts and Use Cases. Coinmonks via Medium. https://medium.com/coinmonks/merkle-trees-concepts-and-use-cases-5da873702318. Erişim Tarihi: 12.03.2025.

Karim, M. R., Rodgers, D. C., & Hossain, M. A. (2024). The Role of Internet of Things (IoT) in Real-Time Supply Chain Monitoring. *International Journal of Research and Innovation in Social Science*, *8*(10), 1800-1816.

Kaylor, A. (2023). Fundamentals of the Pharmaceutical Supply Chain. *Supply Chain News. Retrieved on*, *9*(18), 2023.

Kemp, L. (2021). *Looking To 2021: The Future Is There For The Making*. Everledger. https://everledger.io/looking-to-2021-the-future-is-there-for-the-making/

Khan, M. M., Khan, F. S., Nadeem, M., Khan, T. H., Haider, S., & Daas, D. (2025). Scalability and Efficiency Analysis of Hyperledger Fabric and Private Ethereum in Smart Contract Execution. *Computers*, *14*(4), 132.

Khanna, A., Jain, S., Burgio, A., Bolshev, V., & Panchenko, V. (2022). Blockchain-enabled supply chain platform for Indian dairy industry: Safety and traceability. *Foods*, *11*(17), 2716.

Kim, D. Y., Kumar, V., & Kumar, U. (2010). Performance assessment framework for supply chain partnership. *Supply Chain Management: An International Journal*, *15*(3), 187-195.

Kim, S., Sarin, A., & Virdi, D. (2018). Crypto-assets unencrypted. *Journal of Investment Management, Forthcoming*.

King, S., & Nadal, S. (2012). Ppcoin: Peer-to-peer crypto-currency with proof-of-stake. *Self-Published Paper, August*, *19*(1).

Kshetri, N. (2018). 1 Blockchain's roles in meeting key supply chain management objectives. *International Journal of Information Management*, *39*, 80-89.

Kumar, A., Chatterjee, I., Pallavi, Sharma, K., & Thakur, M. (2024). Real-Time-Based Blood Wastage Management Using IoT and Blockchain Technology. *SN Computer Science*, *5*(3), 310.

Kumar, S., Lim, W. M., Sivarajah, U., & Kaur, J. (2023). Artificial intelligence and blockchain integration in business: trends from a bibliometric-content analysis. *Information Systems Frontiers*, *25*(2), 871-896.

Kumiawan, H., Kim, J., & Ju, H. (2020, September). Utilization of the blockchain network in the public community health center medicine supply chain. In *2020 21st Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS)* (pp. 235-238). IEEE.

Kuznetsov, O., Rusnak, A., Yezhov, A., Kuznetsova, K., Kanonik, D., & Domin, O. (2024). Merkle trees in blockchain: A study of collision probability and security implications. *Internet of Things*, 101193.

Lamming, R. (1996). Squaring lean supply with supply chain management. *International Journal of Operations & Production Management*, *16*(2), 183-196.

Lambert, D. M., & Cooper, M. C. (2000). Issues in supply chain management. *Industrial Marketing Management*, *29*(1), 65-83.

Lamport, L., Shostak, R., & Pease, M. (1982). The Byzantine Generals Problem. *ACM Transactions on Programming Languages and Systems*, *4*(3), 382-401.

Lashkari, B., & Musilek, P. (2021). A comprehensive review of blockchain consensus mechanisms. *IEEE access*, *9*, 43620-43652.

Lazarovitz, L. (2021). Deconstructing the solarwinds breach. *Computer Fraud & Security*, *2021*(6), 17-19.

LeMay, S., Helms, M. M., Kimball, B., & McMahon, D. (2017). Supply chain management: the elusive concept and definition. *The International Journal of Logistics Management*, *28*(4), 1425-1453.

Ligar, B., Madenda, S., Mardjan, S., & Kusuma, T. (2024). Design of a traceability system for a coffee supply chain based on blockchain and machine learning. *Journal of Industrial Engineering and Management*, *17*(1), 151-167.

Linux Foundation. (2025). *Case Study: Hyperledger Foundation*. https://www.linuxfoundation.org/resources/case-studies/hyperledger Erişim Tarihi:03.05.2025

Liu, X., Barenji, A. V., Li, Z., Montreuil, B., & Huang, G. Q. (2021). Blockchain-based smart tracking and tracing platform for drug supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, *161*, 107669.

Liu, Y., Lu, Q., Yu, G., Paik, H. Y., & Zhu, L. (2022). Defining blockchain governance principles: A comprehensive framework. *Information Systems*, *109*, 102090.

Lopez, L. J. R., Babativa, J. M. C., & Reales, W. M. R. (2022). Blockchain apply to the supply chain of essential medicines for the treatment of Covid-19 in Colombia. *Informatics in Medicine Unlocked*, *33*, 101100.

Lummus, R. R., Krumwiede, D. W., & Vokurka, R. J. (2001). The relationship of logistics to supply chain management: developing a common industry definition. *Industrial Management & Data Systems*, *101*(8), 426-432.

Maersk. (2022). *A.P. Moller - Maersk and IBM to discontinue TradeLens, a blockchain-enabled global trade platform*. https://www.maersk.com/news/articles/2022/11/29/maersk-and-ibm-to-discontinue-tradelens

Maersk. (2023). *The importance of supply chain C-suite alignment*. https://www.maersk.com/insights/integrated-logistics/2023/02/06/supply-chain-c-suite Erişim Tarihi:15.02.2025.

Maleh, Y., Abd El-Latif, A. A., & Motahhir, S. (2022). Cybersecurity-Based Blockchain for Cyber-Physical Systems. In *Security Engineering for Embedded and Cyber-Physical Systems* (pp. 109-142). CRC Press.

Mangala, N., Naveen, D. R., Reddy, B. E., Buyya, R., Venugopal, K. R., Iyengar, S. S., & Patnaik, L. M. (2024). Secure pharmaceutical supply chain using blockchain in IoT cloud systems. *Internet of Things*, *26*, 101215.

Mani, V., Prakash, M., & Lai, W. C. (2022). Cloud-based blockchain technology to identify counterfeits. *Journal of Cloud Computing*, *11*(1), 67.

Markus, S., & Buijs, P. (2022). Beyond the hype: how blockchain affects supply chain performance. *Supply Chain Management: An International Journal*, *27*(7), 177-193.

McGeeney, J. D., McAden, E., Sertkaya, A., & Eastern Research Group. (2025). Analysis of Drug Shortages, 2018-2023.

Mendoza, R. L. (2021). Continuity and change in the drug supply chain: Actors, actions, and aversions. *Journal of Medical Economics*, *24*(1), 689-697.

Menesha, A. H., & Mwanaumo, E. T. (2023). Supply chain management practice and competitive advantage: Systematic literature review. *Logistic and Operation Management Research (LOMR)*, *2*(2), 44-57.

Mentzer, J. T., DeWitt, W., Keebler, J. S., Min, S., Nix, N. W., Smith, C. D., & Zacharia, Z. G. (2001). Defining supply chain management. *Journal of Business Logistics*, *22*(2), 1-25.

Merck & Co. (2019, Haziran 13). *IBM, KPMG, Merck and Walmart to collaborate as part of FDA's program to evaluate the use of blockchain to protect pharmaceutical product integrity*. Merck Newsroom. https://www.merck.com/news/ibm-kpmg-merck-and-walmart-to-collaborate-as-part-of-fdas-program-to-evaluate-the-use-of-blockchain-to-protect-pharmaceutical-product-integrity/

Min, S., Zacharia, Z. G., & Smith, C. D. (2019). Defining supply chain management: In the past, present, and future. *Journal of Business Logistics*, *40*(1), 44-55.

Ministry of Health and Prevention - UAE. (2021, December 9). *Tatmeen platform*. United Arab Emirates Ministry of Health and Prevention. https://mohap.gov.ae/en/w/tatmeen

Milicevic, V., Jovic, J., & Zdravkovic, N. (2021). An overview of Hyperledger blockchain technologies and their uses.

Monrat, A. A., Schelén, O., & Andersson, K. (2019). A survey of blockchain from the perspectives of applications, challenges, and opportunities. *Ieee Access*, *7*, 117134-117151.

Moosivand, A., Ghatari, A. R., & Rasekh, H. R. (2019). Supply chain challenges in pharmaceutical manufacturing companies: Using qualitative system dynamics methodology. *Iranian Journal of Pharmaceutical Research: IJPR*, *18*(2), 1103.

Morris, P., & Sweeney, E. (2019). Responding to disruptions in the pharmaceutical supply chain. *Clinical Pharmacist*, *11*(2).

Munasinghe, U. J., & Halgamuge, M. N. (2023). Supply chain traceability and counterfeit detection of COVID-19 vaccines using novel blockchain-based Vacledger system. *Expert Systems with Applications*, *228*, 120293.

Narayanan, A., Bonneau, J., Felten, E., Miller, A., & Goldfeder, S. (2016). *Bitcoin and cryptocurrency technologies: a comprehensive introduction*. Princeton University Press.

Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system.

Nasir, N. M., Hassan, S., & Zaini, K. M. (2024). Securing Permissioned Blockchain-based Systems: An Analysis on the Significance of Consensus Mechanisms. *IEEE Access*.

Natarajan, H., Krause, S., & Gradstein, H. (2017). Distributed ledger technology and blockchain.

National Informatics Centre, Govt. of India. (2023). *Centre of Excellence for Blockchain Technology*. Erişim adresi: https://blockchain.gov.in/

Naqvi, M. H., Asim, D. M., & Manzoor, S. (2020). Analysing the impact of supply chain agility on customer satisfaction through responsiveness and innovation. *CenRaPS Journal of Social Sciences*, *2*(1), 26-40.

Nawaz, A., Wang, L., Irfan, M., & Westerlund, T. (2024). Hyperledger sawtooth based supplychain traceability system for counterfeit drugs. *Computers & Industrial Engineering*, *190*, 110021.

Naveen, P., Manikandan, P., Maragatharajan, M., Kumar, S. A., Saravanan, M., & Puviarasu, A. (2022, October). Traceability of tea powder supply chain based on Hyperledger Fabric. In *2022 3rd International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC)* (pp. 303-307). IEEE.

Naylor, J. B., Naim, M. M., & Berry, D. (1999). Leagility: Integrating the lean and agile manufacturing paradigms in the total supply chain. *International Journal of Production Economics*, *62*(1-2), 107-118.

Nguyen, G. T., & Kim, K. (2018). A survey about consensus algorithms used in blockchain. *Journal of Information Processing Systems*, *14*(1), 101-128.

Nofer, M., Gomber, P., Hinz, O., & Schiereck, D. (2017). *Blockchain. Business & Information Systems Engineering, 59 (3), 183–187*.

Nowvaratkoolchai, P., Thawesaengskulthai, N., Viriyasitavat, W., & Rangsunvigit, P. (2024). Blockchain-based Cannabis Traceability in Supply Chain Management. *International Journal of Advanced Computer Science & Applications*, *15*(2).

Nweje, U., & Taiwo, M. (2025). Leveraging Artificial Intelligence for predictive supply chain management, focus on how AI-driven tools are revolutionizing demand forecasting and inventory optimization. *International Journal of Science and Research Archive*, *14*(1), 230-250.

Nwoke, J. (2024). Regulatory compliance and risk management in pharmaceuticals and healthcare. *International Journal of Health Sciences*, *7*(6), 60-88.

Nyirimanzi, J. D., Ngenzi, J., Kagisha, V., Bizimana, T., & Kayitare, E. (2023). Assessment of medicines cold chain storage conformity with the requirements of the World Health Organization in health facilities of the Eastern Province of Rwanda. *Journal of Pharmaceutical Policy and Practice*, *16*(1), 31.

Oğuz, A., & Perçin, S. (2022). Tedarik Zinciri Entegrasyonu ve Dijitalleşmenin Performansa Etkisi: Alıcı-Tedarikçi Risk Yönetiminin Aracılık Rolü. *Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, *40*(4), 837-860.

Omar, I. A., Hasan, H. R., Jayaraman, R., Salah, K., & Omar, M. (2024). Using blockchain technology to achieve sustainability in the hospitality industry by reducing food waste. *Computers & Industrial Engineering*, *197*, 110586.

OPTEL Group. (2020). *Disruptive technologies and the intelligent supply chain* [White paper].OPTEL.https://www.optelgroup.com/app/uploads/2021/07/wp_fb_disruptive-technologies-and-the-intelligent-supply-chain_web.pdf

Ozdemir, D., Sharma, M., Dhir, A., & Daim, T. (2022). Supply chain resilience during the COVID-19 pandemic. *Technology in Society*, *68*, 101847.

Padmavathi, U., & Rajagopalan, N. (2020, October). An Interactive Drug Supply Chain Tracking System Using Blockchain 2.0. In *IEEE International Conference on Electronics*.

Pajic, V., Andrejic, M., & Chatterjee, P. (2024). Enhancing cold chain logistics: A framework for advanced temperature monitoring in transportation and storage. *Mechatron. Intell Transp. Syst*, *3*(1), 16-30.

Pambudi, N. A., Sarifudin, A., Gandidi, I. M., & Romadhon, R. (2022). Vaccine cold chain management and cold storage technology to address the challenges of vaccination programs. *Energy Reports*, *8*, 955-972.

Papalexi, M., Bamford, D., Nikitas, A., Breen, L., & Tipi, N. (2022). Pharmaceutical supply chains and management innovation?. *Supply Chain Management: An International Journal*, *27*(4), 485-508.

Parmaksiz, K., Pisani, E., & Kok, M. O. (2020). What makes a national pharmaceutical track and trace system succeed? Lessons from Turkey. *Global Health: Science and Practice*, *8*(3), 431-441.

Patel, V., Cieslak, K., & Hertig, J. (2023). Improving safety by evaluating the impact of the supply chain and drug shortages on health-systems. *Hospital Pharmacy*, *58*(2), 120-124.

Patro, P. K., Jayaraman, R., Salah, K., & Yaqoob, I. (2022). Blockchain-based traceability for the fishery supply chain. *Ieee Access*, *10*, 81134-81154.

Paul, A., & Saha, S. C. (2025). A systematic literature review on flexible strategies and performance indicators for supply chain resilience. *Global Journal of Flexible Systems Management*, *26*(Suppl 1), 207-231.

Pennekamp, J., Matzutt, R., Klinkmüller, C., Bader, L., Serror, M., Wagner, E., ... & Wehrle, K. (2023). An interdisciplinary survey on information flows in supply chains. *ACM Computing Surveys*, *56*(2), 1-38.

Perumalsamy, S., & Kaliyamurthy, V. (2023). Leveraging Blockchain with Optimal Deep Learning-Based Drug Supply Chain Management for Pharmaceutical Industries. *Computers, Materials & Continua*, *77*(2).

Pharmaceutical Inspection Co-operation Scheme (PIC/S). (2023). *About PIC/S*. https://picscheme.org/en/about/pic-s Erişim Tarihi:22.03.2025

PharmaLedger Association. (2023a). PharmaLedger Association – Digital Trust Ecosystem in Healthcare (DTE-H). Erişim adresi: https://pharmaledger.org/pla-newsroom/

PharmaLedger Association. (2023b). Electronic Product Information (ePI). Erişim adresi: https://pharmaledger.org/epi-electronic-medical-product-information/

PharmaLedger Association. (2023c). Electronic Informed Consent (eConsent). Erişim adresi: https://collaboration.pharmaledger.org/page/eCon

Pilkington, M. (2016). Blockchain technology: principles and applications. In *Research handbook on digital transformations* (pp. 225-253). Edward Elgar Publishing.

Ponis, S. T., & Koronis, E. (2012). Supply Chain Resilience? Definition of concept and its formative elements. *The journal of applied business research*, *28*(5), 921-935.

Porter, M. E. (1985). *Competitive advantage: Creating and sustaining superior performance.* NY: Free Press.

Prakash, P. (2020). *Supply Chain Innovation: The Role of Continuous Improvement in the Supply Chain*. Retail IT Insights. https://www.retailitinsights.com/doc/supply-chain-innovation-the-role-of-continuous-improvement-in-the-supply-chain-0001 Erişim Tarihi:01.03.2025

Provenance (2022). Provenance: Empowering brands to make supply chains transparent. https://www.provenance.org/

Radanliev, P., De Roure, D., Page, K., Nurse, J. R., Mantilla Montalvo, R., Santos, O., ... & Burnap, P. (2020). Cyber risk at the edge: current and future trends on cyber risk analytics and artificial intelligence in the industrial internet of things and industry 4.0 supply chains. *Cybersecurity*, *3*, 1-21.

Rahaman, M., Tabassum, F., Arya, V., & Bansal, R. (2024). Secure and sustainable food processing supply chain framework based on Hyperledger Fabric technology. *Cyber Security and Applications*, *2*, 100045.

Raj, R., Rai, N., & Agarwal, S. (2019, October). Anticounterfeiting in pharmaceutical supply chain by establishing proof of ownership. In *Tencon 2019-2019 ieee region 10 conference (tencon)* (pp. 1572-1577). IEEE.

Rana, M., Khokale, R., Makesar, M. S., Sall, S., & Mestry, S. R. (2024). Uprising Smart Technology Based Solutions: Food Safety and Traceability in the Cold Supply Chain through Digital Technologies.

Ren, T., Ren, J., & Matellini, D. B. (2024). The Development of a Cold-Chain-Packaging Risk Management Model Based on Fuzzy Bayesian Network. *Applied Sciences*, *14*(11), 4446.

Rennie, E., Holcombe-James, I., Kushnir, A., Webster, T., & Morgan, B. (2022). Developments in Web3 for the creative industries.

Resmî Gazete. (2017, Ekim 21). *Beşeri Tıbbi Ürünler İmalathaneleri Yönetmeliği* [Yönetmelik]ResmîGazete.https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2017/10/20171021-9.htm Erişim Tarihi: 19.03.2025

R3. (2020). *Corda: The Distributed Ledger for Financial Services*. Erişim adresi: https://www.r3.com/corda-platform/

Ribeiro, J. P., & Barbosa-Povoa, A. (2018). Supply Chain Resilience: Definitions and quantitative modelling approaches–A literature review. *Computers & Industrial Engineering*, *115*, 109-122.

Ripple Labs. (2021). *RippleNet: Instant Cross-Border Payments*. Erişim adresi: https://ripple.com/ripplenet/

Roche. (2023). *Procure to Pay - myBuy/GEP Smart for indirect suppliers*. Erişim adresi: https://www.roche.com/about/sustainability/suppliers/invoice/mybuy-gep-smart

Ruan, P., Loghin, D., Ta, Q. T., Zhang, M., Chen, G., & Ooi, B. C. (2020, June). A transactional perspective on execute-order-validate blockchains. In *Proceedings of the 2020 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data* (pp. 543-557).

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.

Samsung Developers. (2023). *Release Note Dec 29, 2023*. https://developer.samsung.com/blockchain/platform/release-note/release-note.html

Santosh, K., Dash, C., Aarif, M., Kumar, Y. S., Verma, M., & KiranBala, B. (2024, March). Blockchain-Based Smart Contracts for Supply Chain Management: A Strategic Analysis. In *2024 Third International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS)* (pp. 1-6). IEEE.

Saraswat, H., Jasola, S., & Manchanda, M. (2023). Efficient integration of big data with blockchain: Challenges, opportunity and future. *Journal of Autonomous Intelligence*, *6*(3).

SAP. (2019). *Zuellig Pharma eZTracker – Keeping us safe with every scan* [White paper]. SAP. https://www.sap.com/bin/sapdxc/proxy.inmsl.attachment.2775.pitch-deck.pdf

SAP. (2025). *SAP Advanced Track and Trace for Pharmaceuticals on SAP S/4HANA*. Erişim adresi: https://www.sap.com/products/scm/track-trace-pharmaceuticals.html

Schär, F. (2021). Decentralized finance: on blockchain and smart contract-based financial markets. *Review of the Federal Reserve Bank of St Louis*, *103*(2), 153-174.

Schatsky, D., Arora, A., & Dongre, A. (2018). Blockchain and the five vectors of progress. *Deloitte Insights*, 2-6.

Seeley, E. (2022). The impact of pharmaceutical wholesalers on US drug spending. *Published July*, *20*.

Servaes, H., & Tamayo, A. (2013). The impact of corporate social responsibility on firm value: The role of customer awareness. *Management Science*, *59*(5), 1045-1061.

Shahid, A., Almogren, A., Javaid, N., Al-Zahrani, F. A., Zuair, M., & Alam, M. (2020). Blockchain-based agri-food supply chain: A complete solution. *Ieee Access*, *8*, 69230-69243.

Shanthi, P., & Venkatesh, K. (2023, May). Blockchain Assisted Archimedes Optimization with Machine Learning Driven Drug Supply Management for Pharmaceutical Sector. In *2023 International Conference on Advances in Computing, Communication and Applied Informatics (ACCAI)* (pp. 1-8). IEEE.

Sharma, L., Gupta, R. K., Lamba, C. S., Kumar, A., & Lathar, P. (2024). Efficient practical Byzantine Consensus-based reputation method for IoT based electronic waste tracking and tracing system using blockchain. *Multimedia Tools and Applications*, *83*(37), 84639-84672.

Sharma, N., & Rohilla, R. (2023). A novel Hyperledger blockchain-enabled decentralized application for drug discovery chain management. *Computers & Industrial Engineering*, *183*, 109501.

Shore, C., Brown, L., Hopp, W. J., & National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2022). Causes and consequences of medical product supply chain failures. In *Building Resilience into the Nation's Medical Product Supply Chains*. National Academies Press (US).

Sönmez, S., & İlgün, G. (2018). Türkiye'de ilaç fiyatlandırma ve geri ödeme politikalarının AB ülkeleri ile karşılaştırılması. *Sayıştay Dergisi*, (108), 99-121.

Sim, C., Zhang, H., & Chang, M. L. (2022). Improving end-to-end traceability and pharma supply chain resilience using blockchain. *Blockchain in Healthcare Today*, *5*, 10-30953.

Sinclair, D., Shahriar, H., & Zhang, C. (2019, January). Security requirement prototyping with hyperledger composer for drug supply chain: a blockchain application.

In *Proceedings of the 3rd International Conference on Cryptography, Security and Privacy* (pp. 158-163).

Singh, S., Gupta, A., & Chaudhary, A. (2024, February). Enhancing Blockchain Security through quantum key distribution and evaluating QKD network in QKDNetSim environment. In *2024 3rd International Conference on Power Electronics and IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC)* (pp. 86-93). IEEE.

Sykes, C. (2018). Time-and temperature-controlled transport: supply chain challenges and solutions. *Pharmacy and Therapeutics*, *43*(3), 154.

Srivastava, A., & Desai, Y. (2021, December). Performance analysis of hyperledger fabric based blockchain for traceability in food supply chain. In *2021 IEEE 2nd International Conference on Technology, Engineering, Management for Societal impact using Marketing, Entrepreneurship and Talent (TEMSMET)* (pp. 1-5). IEEE.

Stephens, S. (2001). Supply chain operations reference model version 5.0: a new tool to improve supply chain efficiency and achieve best practice. *Information Systems Frontiers*, *3*, 471-476.

Suda, K. J., Kim, K. C., Hernandez, I., Gellad, W. F., Rothenberger, S., Campbell, A., ... & Tadrous, M. (2022). The global impact of COVID-19 on drug purchases: a cross-sectional time series analysis. *Journal of the American Pharmacists Association*, *62*(3), 766-774.

Sudha, C. N. (2024). TrackChain: Hyperledger based pharmaceutical supply chain–Resource utilization perspective. *Heliyon*, *10*(1).

Sukhwani, H., Martínez, J. M., Chang, X., Trivedi, K. S., & Rindos, A. (2017, September). Performance modeling of PBFT consensus process for permissioned blockchain network (hyperledger fabric). In *2017 IEEE 36th symposium on reliable distributed systems (SRDS)* (pp. 253-255). IEEE.

Sun, Y., Zhang, X., & Han, M. (2023, May). Research on the application of blockchain technology in big data auditing. In *Proceedings of the 2023 3rd International Conference on Robotics and Control Engineering* (pp. 49-54).

Sylim, P., Liu, F., Marcelo, A., & Fontelo, P. (2018). Blockchain technology for detecting falsified and substandard drugs in distribution: pharmaceutical supply chain intervention. *JMIR research protocols*, *7*(9), e10163.

Swan, M. (2015). *Blockchain: Blueprint for a new economy*. " O'Reilly Media, Inc.".

Tahmasbzadeh, A., & Kabirirad, S. (2023, May). A blockchain-based approach for data storage in drug supply chain. In *2023 9th International Conference on Web Research (ICWR)* (pp. 335-341). IEEE.

T.C. Sağlık Bakanlığı. (2025). *Sağlık İstatistikleri Yıllığı 2023* (Yayın No. SB-SİY-2025/01). Sağlık Bilgi Sistemleri Genel Müdürlüğü. https://ekutuphane.saglik.gov.tr/Ekutuphane/kitaplar/SİY2023_Türkçe(31.01.2025).pdf Erişim Tarihi: 26.04.2025

Taj, S., Imran, A. S., Kastrati, Z., Daudpota, S. M., Memon, R. A., & Ahmed, J. (2023). IoT-based supply chain management: A systematic literature review. *Internet of Things*, *24*, 100982.

Tapscott, D., & Tapscott, A. (2016). *Blockchain revolution: how the technology behind bitcoin is changing money, business, and the world*. Penguin.

Thejaswini, S., Karthik, S., Roopashree, H. B., Trupti, K. N., & Sushma, M. P. (2021, August). Med Secure: A Blockchain based Authenticated System for Counterfeit Medicine in DecentralizedPeer to Peer Network. In *2021 Asian Conference on Innovation in Technology (ASIANCON)* (pp. 1-7). IEEE.

Toprak, B., & Nebati, E. E. (2024). Dijital Tedarik Zincirinin Gelişen Trendleri: Bibliyometrik Bir Değerlendirme. *Uluslararası Yönetim Akademisi Dergisi*, *7*(2), 593-609.

Toumia, S. B., Berger, C., & Reiser, H. P. (2021). Evaluating blockchain application requirements and their satisfaction in Hyperledger Fabric. *arXiv preprint arXiv:2111.15399*.

TraceLink. (2019). *TraceLink Submits Interoperable Blockchain Network Solution for FDA DSCSA Pilot Project Program*. TraceLink. https://www.tracelink.com/about/news-room/tracelink-submits-an-interoperable-blockchain-network-solution-for-fda-dscsa-pilot-project-program

Treiblmaier, H. (2018). The impact of the blockchain on the supply chain: a theory-based research framework and a call for action. *Supply chain management: an international journal*, *23*(6), 545-559.

Tsai, W. C., & Shen, C. W. (2024). Using a smart contract for the floral supply chain. *Asia Pacific Management Review*, *29*(3), 347-361.

Tschorsch, F., & Scheuermann, B. (2016). Bitcoin and beyond: A technical survey on decentralized digital currencies. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, *18*(3), 2084-2123.

Tseng, J. H., Liao, Y. C., Chong, B., & Liao, S. W. (2018). Governance on the drug supply chain via gcoin blockchain. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *15*(6), 1055.

Tukamuhabwa, B., Mutebi, H., & Kyomuhendo, R. (2021). Competitive advantage in SMEs: effect of supply chain management practices, logistics capabilities and logistics integration in a developing country. *Journal of Business and Socio-Economic Development*, *3*(4), 353-371.

Tunçer, S. (2023). *Blokzincir Tabanlı akıllı sözleşme kullanarak güvenli veri saklama ve veri doğrulama* (Tez no. 821799) [Doktora Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi]. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.

Türk, H., & Güner, S. (2021). Türkiye'deki İlaç Tedarik Zinciri Yapısı ve Uygulamalarına İlişkin Bir Saha Çalışması. *Journal of Transportation and Logistics*, *6*(2), 177-196.

Uddin, M., Salah, K., Jayaraman, R., Pesic, S., & Ellahham, S. (2021). Blockchain for drug traceability: Architectures and open challenges. *Health Informatics Journal*, *27*(2), 14604582211011228.

UNICEF Innovation. (2023). *UNICEF Innovation Fund Graduate: StaTwig*. Retrieved from https://www.unicef.org/innovation/fundgraduate/StaTwig

U.S. Food and Drug Administration. (2023). *MediLedger DSCSA Pilot Project Final Report*. https://www.fda.gov/media/168283/download

U.S. Food and Drug Administration. (2024, February 12). *FDA's implementation of Drug Supply Chain Security Act (DSCSA) requirements*. Retrieved April 28, 2025, from

https://www.fda.gov/drugs/drug-supply-chain-security-act-dscsa/fdas-implementation-drug-supply-chain-security-act-dscsa-requirements Erişim Tarihi:19.03.2025

Van Engelenhoven, T., Kassahun, A., & Tekinerdogan, B. (2023). Systematic analysis of the supply chain operations reference model for supporting circular economy. *Circular Economy and Sustainability*, *3*(2), 811-834.

Visiott. (2023). *Pharmaceutical traceability in Turkey*. Visiott Insights. https://www.visiott.com/blog/pharmaceutical-traceability-in-turkey/#:~:text=The%20Turkish%20pharmaceutical%20industry%20consists,pharmacies%20and%20over%201000 Erişim Tarihi:12.03.2025

Volvo & Circulor. (2024). Volvo battery passport initiative. https://www.wsj.com/articles/volvo-says-users-can-track-source-of-battery-metals-in-its-evs-54f6e4f7

Wal, P., Wadhwa, S., & Wal, A. (2019). Current practices in insulin and vaccine storage. *Pharmacophore*, *10*(3-2019), 71-80.

Wang, C., Jiang, H., Zeng, J., Min, Y. U., Huang, Q., & Zuo, Z. (2021). A review of blockchain layered architecture and technology application research. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, *26*(5), 14.

Wang, K., & Du, N. (2025). Real-time monitoring and energy consumption management strategy of cold chain logistics based on the internet of things. *Energy Informatics*, *8*(1), 34.

Wang, S., Ouyang, L., Yuan, Y., Ni, X., Han, X., & Wang, F. Y. (2019). Blockchain-enabled smart contracts: architecture, applications, and future trends. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, *49*(11), 2266-2277.

Wattanakul, S., Henry, S., Bentaha, M. L., Reeveerakul, N., & Ouzrout, Y. (2018). Improving risk management by using smart containers for real-time traceability. *arXiv preprint arXiv:1810.13332*.

Wieland, A., & Durach, C. F. (2021). Two perspectives on supply chain resilience. *Journal of Business Logistics*, *42*(3), 315-322.

Wong, W. P., Saw, P. S., Jomthanachai, S., Wang, L. S., Ong, H. F., & Lim, C. P. (2023). Digitalization enhancement in the pharmaceutical supply network using a supply chain risk management approach. *Scientific Reports*, *13*(1), 22287.

World Health Organization. (2024, December 3). *Substandard and falsified medical products* [Fact sheet]. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/substandard-and-falsified-medical-products Erişim Tarihi: 25.03.2025

Xu, J., Wang, C., & Jia, X. (2023). A survey of blockchain consensus protocols. *ACM Computing Surveys*, *55*(13s), 1-35.

Xu, X., Sun, G., Luo, L., Cao, H., Yu, H., & Vasilakos, A. V. (2021). Latency performance modeling and analysis for hyperledger fabric blockchain network. *Information Processing & Management*, *58*(1), 102436.

Xue, F., & Li, F. (2023). A Quality Traceability System for Fruit and Vegetable Supply Chain Based on Multi-Chain Blockchain. *International Journal of Information Systems and Supply Chain Management (IJISSCM)*, *16*(1), 1-18.

Yaga, D., Mell, P., Roby, N., & Scarfone, K. (2019). Blockchain technology overview. *arXiv preprint arXiv:1906.11078*.

Yewale, A. (2018). *Study of blockchain-as-a-service systems with a case study of hyperledger fabric implementation on Kubernetes* [Master's thesis, University of Nevada, Las Vegas].

Yıldız, A. (2018). Endüstri 4.0 ile Bütünleştirilmiş Dijital Tedarik Zinciri. *Business & Management Studies: An International Journal*, *6*(4), 1215-1230.

Yigit, E., & Dag, T. (2024). Improving Supply Chain Management Processes Using Smart Contracts in the Ethereum Network Written in Solidity. *Applied Sciences*, *14*(11), 4738.

Yusuf, Y. Y., Gunasekaran, A., Musa, A., Dauda, M., El-Berishy, N. M., & Cang, S. (2014). A relational study of supply chain agility, competitiveness and business performance in the oil and gas industry. *International Journal of Production Economics*, *147*, 531-543.

Zanfino, G. (2024). *Enhancing privacy and scalability of permissioned blockchain* [Doctoral dissertation, University of Southampton].

Zervoudakis, P., Plevraki, M., Plevridi, E., & Fragkiadakis, A. (2022). SmartProduct: a prototype platform for product monitoring-as-a-service, leveraging IoT technologies and the EPCIS standard. *arXiv preprint arXiv:2210.09140*.

Zhang, J., Brintrup, A., Calinescu, A., Kosasih, E., & Sharma, A. (2021). Supply chain digital twin framework design: an approach of supply chain operations reference model and system of systems. *arXiv preprint arXiv:2107.09485*.

Zhang, X., Feng, X., Jiang, Z., Gong, Q., & Wang, Y. (2023). A blockchain-enabled framework for reverse supply chain management of power batteries. *Journal of Cleaner Production*, *415*, 137823.

Zheng, Z., Xie, S., Dai, H., Chen, X., & Wang, H. (2017). An overview of blockchain technology: Architecture, consensus, and future trends. In *2017 IEEE international congress on big data (BigData congress)* (pp. 557-564). Ieee.

Zheng, Z., Xie, S., Dai, H. N., Chen, X., & Wang, H. (2018). Blockchain challenges and opportunities: A survey. *International Journal of Web and Grid Services*, *14*(4), 352-375.

Zheng, Z., Xie, S., Dai, H. N., Chen, W., Chen, X., Weng, J., & Imran, M. (2020). An overview on smart contracts: Challenges, advances and platforms. *Future Generation Computer Systems*, *105*, 475-491.

TEZ İNTİHAL RAPORU

İLAÇ TEDARİK ZİNCİRİNDE YENİLİKÇİ BİR YAKLAŞIM: BLOK ZİNCİR TEMELLİ AĞ MİMARİSİ

Yazar Hakan ARSLANHAN

Gönderim Tarihi: 18-Ağu-2025 11:39ÖS (UTC+0300)
Gönderim Numarası: 2731567252
Dosya adı: Hakan-Arslanhan-Doktora-Tezi-18-08-2025_1_-_Kopya.docx (3.92M)
Kelime sayısı: 65205
Karakter sayısı: 464768

İLAÇ TEDARİK ZİNCİRİNDE YENİLİKÇİ BİR YAKLAŞIM: BLOK ZİNCİR TEMELLİ AĞ MİMARİSİ

ORİJİNALLİK RAPORU

%1	%1	%1	%0
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	<%1
2	vdocuments.site İnternet Kaynağı	<%1
3	Submitted to (school name not available) Öğrenci Ödevi	<%1
4	www.researchgate.net İnternet Kaynağı	<%1
5	dergipark.org.tr İnternet Kaynağı	<%1
6	www.iksadkongre.com İnternet Kaynağı	<%1
7	nek.istanbul.edu.tr:4444 İnternet Kaynağı	<%1
8	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	<%1
	libweb.kpfu.ru	

Alıntıları çıkart	üzerinde	Eşleşmeleri çıkar	< 5 words
Bibliyografyayı Çıkart	üzerinde		

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	Hakan ARSLANHAN
Uyruğu	T.C.

EĞİTİM BİLGİLERİ

Derece	Alan	Kurum	Mezuniyet Yılı
Lisans	Uluslararası Ticaret	Akdeniz Üniversitesi	2011-2016
Yüksek Lisans	Uluslararası Ticaret ve Lojistik	Akdeniz Üniversitesi	2016-2019
Doktora	Uluslararası Ticaret ve Lojistik	Kayseri Üniversitesi	2019-2025

İŞ DENEYİMLERİ

Derece	Kurum	Görev Süresi
Araştırma Görevlisi	Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi / Uluslararası Ticaret ve Lojistik	2017- Devam Ediyor

YAYINLAR

1. ARSLANHAN HAKAN, DELİCE YILMAZ (2025). Blok Zincir Teknolojisinin İlaç ve Gıda Tedarik Zincirindeki Rolü: Karşılaştırmalı Bir Bibliyometrik Literatür Taraması. Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 18(2), 749-776., Doi: 10.25287/Ohuiibf.1624897 (Yayın No: 9563064)
2. ARSLANHAN HAKAN, TOSUN ÖMÜR (2021). Ulaştırma modu seçimi probleminin bütünleşik en iyien kötü ve WASPAS yöntemleriyle çözülmesi. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 27(1), 13-23., Doi: 10.5505/pajes.2020.23427 (Yayın No: 7131778)
3. ARSLANHAN HAKAN, DELİCE YILMAZ (2024). Blok Zincir Teknolojisinin Tedarik Zincirine Entegrasyonu: Öne Çıkan Sektörler Üzerine Sistematik Bir

Literatür Taraması. ULUSLARARASI TİCARET VE LOJİSTİK 2024 KONGRESİ, 30-30. (Özet Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No: 9342416)

4. TOSUN NEDRET, ARSLANHAN HAKAN, TOSUN ÖMÜR (2019). Türkiye Mermer İhracat Değerinin Makine Öğrenmesi Algoritmaları ile Tahmin Edilmesi. 8. Ulusal Lojistik ve Tedarik Zinciri Kongresi, 128-135. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No: 5988395)
5. ARSLANHAN HAKAN, ÖZOĞLU BUKET, BÜYÜKKEKLİK ARZUM (2018). Lojistik Performansın Değerlendirilmesinde Çok Kriterli Karar Verme Tekniklerinin Kullanımı: Bir Literatür İncelemesi. 7. Ulusal Lojistik ve Tedarik Zinciri Kongresi, 566-571. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No: 4357946)

Uygulama ve Proje Odaklı, İş Dünyası ile Bütünleşen Üniversite