



**MAAS EKOSİSTEMLERİNDE BLOKZİNCİR
TABANLI SİSTEM ÖNERİSİ**

Sümeyya Şuheda CEYLAN

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Bilal USANMAZ

İkinci Tez Danışmanı: Prof. Dr. Burak ERKAYMAN

Yüksek Lisans Tezi

Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2025

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

MAAS EKOSİSTEMLERİNDE BLOKZİNCİR TABANLI SİSTEM ÖNERİSİ
(Blockchain Based System Proposal in MaaS Ecosystems)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sümeyya Şuheda CEYLAN

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Bilal USANMAZ
İkinci Tez Danışmanı: Prof. Dr. Burak ERKAYMAN

Erzurum
Temmuz, 2025



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü
TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

MAAS EKOSİSTEMLERİNDE BLOKZİNCİR TABANLI SİSTEM ÖNERİSİ

Bilal USANMAZ danışmanlığında, Sümeyya Şuheda CEYLAN tarafından hazırlanan bu çalışma, 16/07/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı Bilgisayar Mühendisliği Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Doç. Dr. Mete YAĞANOĞLU Atatürk Üniversitesi	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Dr. Öğr. Üyesi Bilal USANMAZ Atatürk Üniversitesi	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Ahmet COŞKUNÇAY Atatürk Üniversitesi	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Şeyma EMEÇ Erzurum Teknik Üniversitesi	Aslı ıslak imzalıdır
İkinci Tez Danışmanı:	Prof. Dr. Burak ERKAYMAN Atatürk Üniversitesi	Aslı ıslak imzalıdır

Enstitü Yönetim
Kurulunun .../.../.... tarih
ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof.Dr. Alper NUHOĞLU
Enstitü Müdürü
Aslı ıslak imzalıdır

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Dr. Öğr. Üyesi Bilal USANMAZ ın danışmanlığında sunulan “MaaS Ekosistemlerinde Blokzincir Tabanlı Sistem Önerisi ” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	4	30
Kuramsal Temeller	1	30
Materyal ve Metot	0	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	0	20
Sonuçlar	0	20
Tezin Geneli	1	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Sümeyya Şuheda CEYLAN	Dr. Öğr. Üyesi Bilal USANMAZ
16.7.2025	16.7.2025
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bilgi ve deneyimleriyle her aşamada yanımda olan, bilimsel rehberlikleri ve değerli katkılarıyla yolumu aydınlatadan, kıymetli danışman hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Bilal USANMAZ ve Prof. Dr. Burak ERKAYMAN'a,

Hayatımın her anında yanımda olan, beni koşulsuz destekleyen, inançları ve sevgileriyle güç veren değerli annem, babam, kardeşim, kuzenlerim ve yakın arkadaşlarıma,

Teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Sümeyya Şuheda CEYLAN



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAAS EKOSİSTEMLERİNDE BLOKZİNCİR TABANLI SİSTEM ÖNERİSİ

Sümeyya Şuheda CEYLAN

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Bilal USANMAZ

İkinci Tez Danışmanı: Prof. Dr. Burak ERKAYMAN

Amaç: Bu tez çalışmasında, üretim süreçlerinin dijitalleştirilmesine yönelik yeni nesil bir çözüm önerisi olarak, blokzincir teknolojisinin kullanıldığı, dağıtık ve güvenli bir üretim ağı modeli sunulmuştur. Manufacturing as a Service (MaaS) yaklaşımı çerçevesinde, çok paydaşlı üretim senaryolarında güven, şeffaflık ve otomasyon ihtiyaçlarına yanıt verebilecek blokzincir tabanlı bir sistem mimarisi tasarlanması amaçlanmıştır. Geliştirilen sistem önerisi, kullanıcıların üretim talebinde bulunabildiği, tedarikçileri doğrudan seçebildiği ve servis zincirlerinin akıllı sözleşmeler aracılığıyla otomatik olarak oluştuğu bir yapı üzerine inşa edilmiştir.

Yöntem: Araştırma, senaryo temelli modelleme yaklaşımı doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Hyperledger Fabric altyapısı kullanılarak önerilen sistemin işleyişi teorik olarak modellenmiş ve geliştirilen mimarinin teknik bileşenleri detaylı biçimde tanımlanmıştır. Çalışma kapsamında blokzincir ağı, akıllı sözleşmeler (chaincode), istemci uygulamaları, API ağ geçidi ve veri saklama yapıları senaryo düzeyinde ele alınmıştır.

Bulgular: Senaryo temelli modelleme sonucunda, blokzincir teknolojisinin üretim ekosistemlerinde veri güvenliği, işlem izlenebilirliği ve süreç bütünlüğü açısından önemli avantajlar sunduğu görülmüştür. Kullanıcının sipariş oluşturmaktan tedarikçi seçimine ve sürecin tamamlanmasına kadar olan adımların, akıllı sözleşmeler aracılığıyla sistematik şekilde yürütülebildiği varsayılmıştır. Her işlem blokzincir üzerine zaman damgalı ve değiştirilemez kayıtlar olarak işlenmiş; böylece sistemin şeffaflık, doğrulanabilirlik ve hesap verebilirlik özelliklerini desteklediği değerlendirilmiştir ayrıca, manuel onay süreçlerinin ortadan kalkması ve otomasyonun artmasıyla, üretim sürecinin hız ve verimlilik açısından optimize edilebileceği öngörülmüştür.

Sonuç: Tez kapsamında önerilen blokzincir tabanlı MaaS mimarisi, üretim sistemlerinde çoklu paydaş yapısını destekleyen, güvene dayalı işlem akışı sağlayan ve merkeziyetsiz bir veri yönetimi sunan yapısıyla önemli katkılar sağlamaktadır. Sistem, kullanıcı kontrollü servis oluşturma mantığıyla esnekliği artırmakta; akıllı sözleşme temelli otomasyon sayesinde ise süreçlerin dijitalleştirilmesini ve standardize edilmesini olanaklı kılmaktadır. Bu yönüyle önerilen model, üretim sektöründe dijital dönüşümün temel dinamiklerinden biri olarak değerlendirilebilecek niteliktedir.

Anahtar Kelimeler: Blokzincir, Hyperledger Fabric, Manufacturing as a Service, Akıllı Sözleşme, Endüstri 4.0, Üretim İzlenebilirliği.

Temmuz 2025, 66 sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

BLOCKCHAIN BASED SYSTEM PROPOSAL IN MAAS ECOSYSTEMS

Sümeyya Şuheda CEYLAN

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Bilal USANMAZ

Co-supervisor Prof. Dr. Burak ERKAYMAN

Purpose: This thesis proposes a next-generation solution model that utilizes blockchain technology to digitalize manufacturing processes by designing a distributed and secure production network. Within the framework of the Manufacturing-as-a-Service (MaaS) approach, the aim is to develop a blockchain-based system architecture capable of addressing the needs of trust, transparency, and automation in multi-stakeholder production scenarios. The proposed system allows users to submit production requests, directly select suppliers, and automatically establish service chains through smart contracts.

Method: The research was conducted using a scenario-based modeling approach. The proposed system was theoretically modeled using the Hyperledger Fabric infrastructure, and the technical components of the developed architecture were defined in detail. Within the scope of the study, the blockchain network, smart contracts (chaincode), client applications, API gateway, and data storage mechanisms were addressed at the scenario level.

Findings: The scenario-based modeling demonstrated that blockchain technology offers significant advantages in terms of data security, transaction traceability, and process integrity within manufacturing ecosystems. It was assumed that all process steps—from the creation of a user's order to the selection of suppliers and the completion of the workflow—can be systematically executed via smart contracts. Each transaction was theoretically recorded on the blockchain with a timestamp and in an immutable format, thereby supporting the system's transparency, verifiability, and accountability. Furthermore, the elimination of manual approval stages and the increase in automation were projected to optimize speed and efficiency in the production process.

Results: The blockchain-based MaaS architecture proposed in this thesis provides a valuable contribution by enabling a trust-oriented transaction flow, decentralized data management, and support for multi-stakeholder collaboration in manufacturing systems. The user-driven service formation structure enhances flexibility, while automation through smart contracts enables digitalization and standardization of the production process. In this regard, the proposed model can be regarded as one of the foundational elements of digital transformation in the manufacturing sector.

Keywords: Blockchain, Hyperledger Fabric, Manufacturing as a Service, Smart Contract, Industry 4.0, Production Traceability

July 2025, 66 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	ix
GİRİŞ	1
KURAMSAL TEMELLER	3
Dağıtılmış Defter Teknolojisi (DLT)	3
Blokzincir.....	4
Kamuya Açık (Public) Blokzincir	6
İzinli (Private) Blokzincir	6
Mutabakat (Konsensüs) Mekanizmaları	7
Ethereum.....	7
Hyperledger	9
Hyperledger Fabric.....	10
Hyperledger Fabric Temel Bileşenleri	11
Eş Düğümler (Peer nodes)	11
Sıralayıcı (Orderer).....	12
Akıllı Sözleşmeler (Chaincode).....	12
Üyelik Hizmet Sağlayıcısı (Membership Service Provider (MSP))	12
Membership Service Provider	12
Dağıtılmış Defter (Ledger)	12
State Database (CouchDB veya LevelDB).....	13
Kanal Yapısı (Channel).....	13
Sertifika Yetkilisi (Certificate Authority (CA))	13
Akıllı Sözleşme	13
Merkeziyetsiz Uygulamalar (Decentralized Applications).....	15
Hizmet Olarak Üretim (Manufacturing as a Service)	16
Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)	16
Gerçek Zamanlı Veri (Real-Time Data)	17

MATERYAL VE METOT	18
Blokzincir Tabanlı MaaS Metodoloji Geliştirme	21
Platform katmanı	22
Uygulama katmanı	23
Kaynak katmanı	24
Blokzincir katmanı	26
Kullanılan Geliştirme Araçları ve Test Ortamı	27
Remix IDE	27
Ganache.....	28
Solidity	30
Hyperledger Fabric.....	31
Simülasyon ortamı ve test süreci	32
Ethereum tabanlı geliştirme ve test ortamı	33
Kullanılması önerilen yapı: Hyperledger Fabric test ortamı	33
Genel değerlendirme	34
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	35
Buzdolabı Üretimi için Blokzincir Tabanlı MaaS Örneği	42
Blokzincir Tabanlı MaaS Mimarisi.....	35
Kullanıcı katmanı	37
Uygulama katmanı	37
Blokzincir katmanı	38
Sistem İşleyişine İlişkin Bulgular.....	38
Güvenlik ve Şeffaflık Bulguları	39
Otomasyon ve Verimlilik Bulguları.....	40
Örnek İşlem Çıktılarının Analizi	41
Tartışma	44
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	49
KAYNAKLAR.....	50
ÖZGEÇMİŞ.....	57

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Dağıtılmış defter teknolojisi	4
Şekil 2. Ethereum uygulama alanları şekil alt çizgisi burada var	9
Şekil 3. Hyperledger çerçeveleri	10
Şekil 4. Blokzincir blok yapısı	18
Şekil 5. Blokzincir kullanım alanları	19
Şekil 6. Temel blokzincir mimarisi	20
Şekil 7. Blokzincir tabanlı MaaS metodoloji mimarisi	22
Şekil 8. Ganache programı ile akıllı sözleşme kod bloklarını görüntüleme	29
Şekil 9. Ganache programı ile akıllı sözleşme kod blokları hash kodlarını görüntüleme	30
Şekil 10. Buzdolabı üretimi için blokzincir tabanlı MaaS örneği	43
Şekil 11. Blokzincir Tabanlı MaaS Mimarisi	36

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

DLT	: Distributed Ledger Technology (Dağıtılmış Defter Teknolojisi)
ERP	: Kurumsal Kaynak Planlama
EVM	: Ethereum Virtual Machine
IoT/Nİ	: Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)
MaaS	: Manufacturing as a Service
MSP	: Üyelik Hizmet Sağlayıcısı
Node	: Katılımcı/Kullanıcı/Düğüm
PBFT	: Practical Byzantine Fault Tolerance
PoS	: Proof of Stake
PoW	: Proof of Work
SCADA	: Supervisory Control and Data Acquisition

GİRİŞ

Günümüzde dijital dönüşüm, işletmelerin üretimden pazarlamaya kadar tüm süreçlerini yeniden yapılandırmasını zorunlu kılmaktadır. Bu dönüşüm sürecinde güvenilirlik ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak doğrudan veri güvenliğinin sağlanmasına bağlıdır. Özellikle Endüstri 4.0 kapsamında üretim sistemlerinin dijitalleşmesi, yapay zekâ destekli otomasyonlar, nesnelerin interneti (Nİ) ve büyük veri analitiği gibi teknolojilerle akıllı sistemlerin entegrasyonunu gerektirmektedir (Lu et al., 2020). Bu teknolojiler sayesinde üretim süreçleri daha esnek, özelleştirilebilir ve gerçek zamanlı hale gelmekte ve siber güvenlik tehditlerine karşı daha kırılgan bir yapıya dönüşmektedir. Bu nedenle, dijitalleşme ile birlikte ortaya çıkan veri hacminin nasıl saklanacağı, kimlerle ve ne ölçüde paylaşılacağı gibi sorular, yeni nesil güvenlik çözümlerine olan ihtiyacı artırmaktadır.

Blokzincir teknolojisi, güven, şeffaflık ve değiştirilemezlik gibi temel prensipleriyle bu yeni ihtiyaçlara yanıt veren yapılar arasında öne çıkmaktadır (Casino et al., 2019). İlk olarak 2008 yılında Satoshi Nakamoto tarafından Bitcoin altyapısı olarak tanıtılmış olsa da blokzincir zamanla yalnızca finans sektörünün değil, birçok endüstrinin temel yapı taşı hâline gelmiştir. Temelde dağıtılmış defter teknolojisine (Distributed Ledger Technology- DLT) dayanan blokzincir, verilerin bloklar halinde ve kronolojik sırayla kaydedildiği, değiştirilemez ve doğrulanabilir bir kayıt sistemidir (Zheng et al., 2020a). Bu özellikleri sayesinde yalnızca kripto para işlemleri değil; tedarik zinciri, sağlık hizmetleri, enerji yönetimi, akıllı şehir altyapıları ve daha birçok alanda blokzincir tabanlı uygulamalar geliştirilmektedir (Kouhizadeh et al., 2021; Pournader et al., 2021).

Blokzincirin sunduğu en kritik avantajlardan biri, merkezi otoriteleri ortadan kaldırarak işlemlerin dağıtık bir yapı üzerinden gerçekleştirilmesini sağlamasıdır. Geleneksel sistemlerde verilerin merkezi sunucularda tutulması, bu sistemleri hedef hâline getirirken; blokzincir sistemlerinde her bir kullanıcı (node) verilerin tamamına ya da bir kısmına sahip olup işlemler ağın ortak mutabakatı (konsensüs) ile onaylanmaktadır. Günümüzde Proof of Stake (PoS), Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT) ve Proof of Authority (PoA) gibi daha verimli konsensüs algoritmaları kullanılmakta ve ağ güvenliği artırılmaktadır (P. Zhang et al., 2020). Bu yapı, özellikle çok paydaşlı üretim ve tedarik zinciri ortamlarında, güvenli veri paylaşımı ve işlem doğruluğu açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Tönnissen & Teuteberg (2020), ürünlerin ham madde aşamasından nihai tüketiciye ulaşmasına kadar olan tüm süreçleri zaman

damgalı bloklarla kayıt altına alarak sahtecilik, kalite kaybı ve gecikme gibi risklerin önüne geçilmesini sağlamaktadır.

Blokzincir, aracı kurumları devre dışı bırakarak işlemlerin otomasyonunu ve maliyet etkinliğini mümkün kılar. Akıllı sözleşmeler sayesinde önceden tanımlanmış koşullar gerçekleştiğinde işlemler otomatik olarak yürütülmekte, insan müdahalesine ihtiyaç kalmadan süreçler yönetilmektedir (Wang et al., 2021). Bu yapı, taraflar arasında güven ilişkisinin kod düzeyinde inşa edilmesini sağlar. Üretim ve hizmet süreçlerinde akıllı sözleşmeler, makineler arası etkileşimde, üretim planlamasında, tedarik yönetiminde ve denetim mekanizmalarında kullanılmaktadır (Perera et al., 2022) .

Sonuç olarak, blokzincir teknolojisi dijitalleşen sanayi ortamlarında güven, şeffaflık, izlenebilirlik ve otomasyon ihtiyacını bütüncül bir şekilde karşılayabilen bir mimari sunmaktadır. Endüstri 4.0'ın temel ilkeleri ile uyumlu olan bu teknoloji, yalnızca mevcut sistemleri desteklemekle kalmayıp, aynı zamanda iş modellerini dijitalleştirerek yeniden inşa etme potansiyeline sahiptir. Özellikle çok aktörlü, dağıtık ve güven gerektiren ekosistemlerde, blokzincirin sunduğu yapı, güvenilir dijital altyapı oluşturmak için önemli bir araç olarak değerlendirilmektedir (Hewa et al., 2021; Galvez et al., 2021).

KURAMSAL TEMELLER

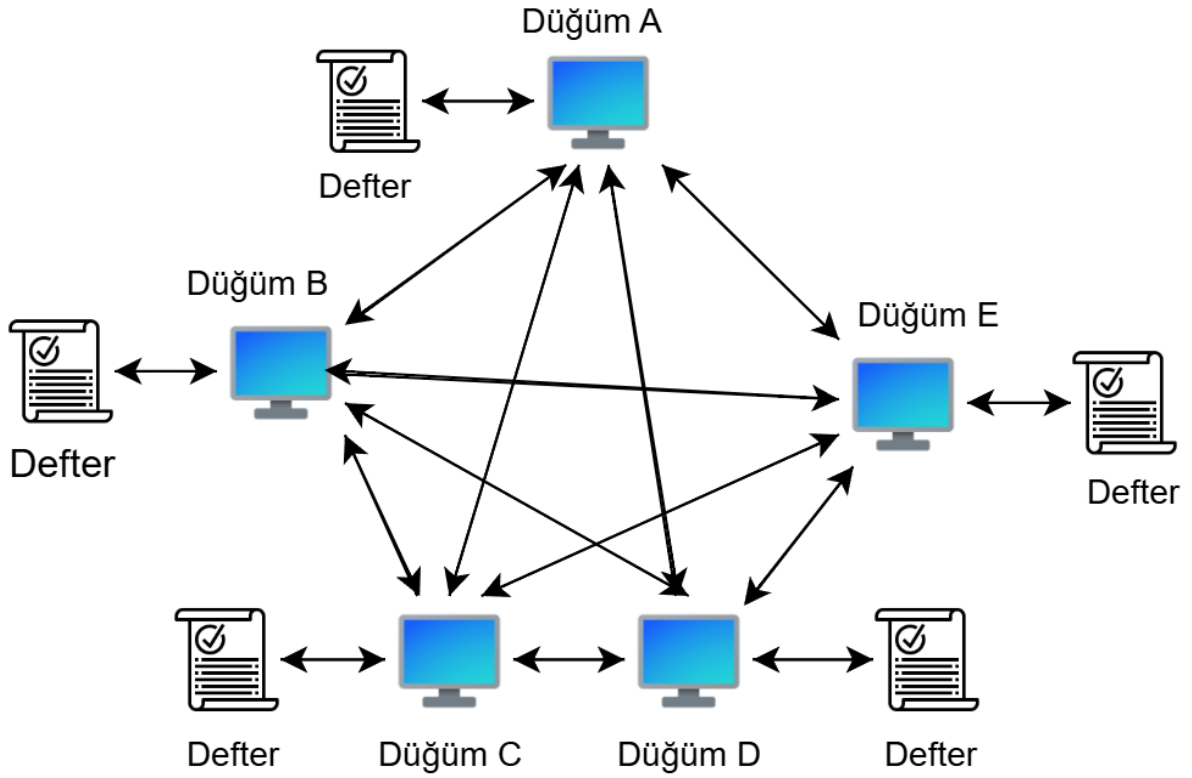
Dağıtılmış Defter Teknolojisi (DLT)

DLT, verilerin merkezi bir otoriteye ihtiyaç duyulmaksızın, birden çok node arasında senkronize biçimde paylaşıldığı ve güncellendiği dijital bir kayıt sistemidir. Bu yapı sayesinde her bir katılımcı, ağın tamamının ya da yetkili olduğu kısmının güncel durumuna erişebilir ve işlemler yalnızca ağdaki konsensüs algoritmasıyla onaylandığında geçerli sayılır. DLT sistemleri, merkezi veri tabanlarına kıyasla daha yüksek düzeyde güvenlik, şeffaflık ve veri bütünlüğü sağlar; çünkü yapılan her işlem yalnızca bir düğümde değil, tüm ağda iz bırakacak şekilde kayıt altına alınır (Francisco & Swanson, 2021; Zheng et al., 2020b).

Bu yapıyı somutlaştırmak adına Şekil 1’de, DLT mimarisinin temel bileşenleri ve düğümler arası etkileşim şematik olarak sunulmuştur. Her bir düğüm, kendi defter kopyasını tutmakta olup, işlemler ağ genelinde dağıtık biçimde güncellenmektedir. Şekilde yer alan çok düğümlü yapı, merkeziyetsizliğin temelini oluşturan karşılıklı eşit katılımı ve konsensüs yoluyla sağlanan işlem doğrulama mekanizmasını temsil etmektedir. Böylece tek bir hata ya da saldırı noktasının ortadan kaldırılması mümkün olmakta, güvenlik ve şeffaflık ilkeleri korunmaktadır.

DLT, özellikle çok aktörlü sistemlerde güvene dayalı olmayan iş birliği senaryoları için ideal bir altyapı sunar. Günümüzde finans (Chukwu & Garg, 2020), tedarik zinciri (Queiroz et al., 2021), kamu hizmetleri (Salah et al., 2021), sağlık sektörü (Agbo et al., 2021), enerji ticareti (Andoni et al., 2021) ve dijital kimlik yönetimi gibi alanlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu teknolojinin temelinde, işlemlerin doğruluğunun ağdaki düğümler arasında ortak mutabakatla sağlanmasını mümkün kılan konsensüs algoritmaları (PoS, PBFT, PoA) yer alır. Böylece merkezi sistemlerin aksine, tek bir hata veya saldırı noktasının ortadan kaldırılması sağlanmış olur (Zhang et al., 2021).

Endüstri 4.0 çerçevesinde, akıllı üretim sistemlerinin siber-fiziksel yapılarla desteklendiği dijital ekosistemlerde DLT, güvenlik, şeffaflık ve sistemler arası birlikte çalışabilirlik açısından kritik bir bileşen olarak değerlendirilmektedir (Treiblmaier & Beck, 2020) Bu nedenle DLT, dijital ekonominin güvenlik temelli omurgasını oluşturarak sürdürülebilir ve izlenebilir sistemler geliştirilmesine olanak tanımaktadır.



Şekil 1. Dağıtılmış defter teknolojisi

Blokzincir

Blokzincir, dijital işlemlerin güvenli, şeffaf ve merkeziyetsiz bir biçimde kaydedilmesini sağlayan, DLT temelli bir sistemdir. Bu teknoloji, verilerin bloklar halinde gruplandırılarak her bloğun kendinden önceki bloğa kriptografik olarak bağlanmasıyla bir zincir oluşturur; böylece veri bütünlüğü sağlanır ve sonradan değiştirilmesi neredeyse imkânsız hale gelir (Zheng et al., 2017a). Bu yapı, tek bir merkezi otoriteye ihtiyaç duymadan, sistemdeki katılımcılar arasında ortak bir mutabakat mekanizması ile işlem doğrulamasına olanak tanır. PoW, PoS ve PBFT gibi algoritmalar, ağda gerçekleştirilen işlemlerin geçerliliğini kolektif biçimde onaylayarak sistemin güvenilirliğini sağlar (Lu & Xu, 2019; Zhang et al., 2021). Blokzincir ilk olarak Bitcoin'in arkasındaki yapı olarak önerilmiş ancak daha sonra finans, sağlık, tedarik zinciri, eğitim, enerji ve kamu hizmetleri gibi birçok sektöre yayılmıştır (Christidis & Devetsikiotis, 2016; Casino et al., 2020; Agbo et al., 2021; Kouhizadeh et al., 2021). Bu teknolojinin en dikkat çeken özelliklerinden biri, değiştirilemez kayıt ve işlemlerin tüm ağ tarafından doğrulanabilir olmasıdır; bu durum, veri manipülasyonu riskini büyük ölçüde ortadan kaldırır ve sistemler arası güveni teknoloji aracılığıyla sağlar. Özellikle çok taraflı, karmaşık ve güven temelli yapıların söz konusu olduğu sistemlerde blokzincir sayesinde işlemler izlenebilir, şeffaf ve otomatik hale getirilebilmektedir (Queiroz et al., 2020). Blokzincir teknolojisinin bir diğer güçlü yönü ise programlanabilirliği sayesinde akıllı sözleşmeleri

desteklemesidir. Bu dijital sözleşmeler, belirlenen koşullar sağlandığında otomatik olarak yürürlüğe girer ve işlem süreçlerinin otomasyonunu mümkün kılar (Wang et al., 2021). Böylece araçların ortadan kalktığı, işlem maliyetlerinin azaldığı ve güvenliğin artırıldığı bir dijital işlem ortamı oluşur. Blokzincir, veri güvenliği, sistem bütünlüğü ve işlem şeffaflığı gibi temel ihtiyaçların karşılandığı, dijital dönüşüm süreçlerinde stratejik bir rol üstlenen devrimsel bir teknolojidir.

Yapılan araştırmalar, blokzincirin üretim sektöründe önemli fırsatlar sunduğunu göstermektedir. Üretim süreçlerinin şeffaflık, izlenebilirlik ve otomasyon gibi alanlarda güçlendirilmesi, operasyonel verimliliği artırmakta ve hata oranlarını azaltmaktadır (Guo et al., 2022; McGibney et al., 2024).

Blokzincir teknolojisinin merkeziyetsiz yapısı, değiştirilemez veri yapısı ve yüksek güvenlik özellikleri, çeşitli sektörlerde yenilikçi uygulamalara zemin hazırlamış ve dijital dönüşüm süreçlerinin temel yapı taşlarından biri hâline gelmiştir. Özellikle çok aktörlü, güvene dayalı veri paylaşımı gerektiren süreçlerde blokzincir teknolojisi; şeffaflık, izlenebilirlik ve işlem güvenliği sağlayarak operasyonel riskleri minimize etmekte ve süreç verimliliğini artırmaktadır. Tedarik zinciri yönetimi bu alanların başında gelmektedir. Günümüzde birçok şirket, tedarik zincirindeki ürün hareketlerini izlemek, sahteciliği önlemek ve tüketicilere şeffaf bilgi sağlamak amacıyla blokzincir tabanlı sistemler kullanmaktadır. IBM ile Walmart arasında geliştirilen "Food Trust" sistemi, gıda ürünlerinin üretim noktasından raflara kadar olan tüm hareketlerini blokzincir üzerinde kayıt altına almakta, bu sayede gıda güvenliği ve ürün takibi konusunda yüksek düzeyde şeffaflık sağlamaktadır (Kamath, 2018). Benzer şekilde, De Beers'in "Tracr" adlı platformu, elmasların kaynağını ve yolculuğunu takip ederek hem etik üretimi garanti altına almakta hem de endüstrideki güven sorunlarını azaltmaktadır (Casino et al., 2019).

Sağlık sektörü de blokzincir uygulamalarının etkin biçimde kullanıldığı alanlardan biridir (Agbo et al., 2019). Tıbbi kayıtların saklanması, hasta mahremiyetinin korunması ve sağlık hizmeti sağlayıcıları arasında güvenli veri paylaşımının sağlanması gibi konular, blokzincir altyapısıyla daha güvenilir bir biçimde yönetilebilmektedir. Özellikle pandemi sürecinde, aşı dağıtımı ve takibi gibi kritik süreçlerde blokzincir teknolojisinin güvenlik ve izlenebilirlik katkıları dikkat çekmiştir (Mettler, 2016). Kamu hizmetlerinde ise Estonya örneği öne çıkmaktadır; bu ülkede vatandaşlık verileri, tapu kayıtları, vergi sistemleri ve hatta seçim süreçleri blokzincir altyapısıyla entegre edilmiştir (Ølnes et al., 2017). Bu sayede vatandaş ile devlet arasındaki güven ilişkisi teknolojik olarak pekiştirilmiş ve bürokratik süreçler dijitalleştirilmiştir.

Sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda çevresel etki takibinde de blokzincir teknolojisi giderek daha fazla kullanılmaktadır. Karbon ayak izi hesaplamaları, enerji tüketim değerleri, atık yönetimi gibi çevresel veriler blokzincir üzerinde güvenli bir şekilde kaydedilerek raporlanabilmekte ve bu verilerin doğruluğu tüm paydaşlar tarafından denetlenebilmektedir (Saber et al., 2019; Lee et al., 2022). Bu da sadece yasal yükümlülüklerin yerine getirilmesini değil, aynı zamanda şirketlerin sosyal sorumluluklarını daha şeffaf biçimde yürütmesini sağlamaktadır. Blokzincir teknolojisi, dijital dönüşüm sürecindeki en kritik teknolojilerden biri hâline gelmiş; operasyonel güvenliği artıran, süreçleri otomatikleştiren ve paydaşlar arasında güven ilişkisini teknolojik temelde yeniden inşa eden bir araç olarak konumlanmıştır.

Kamuya Açık (Public) Blokzincir

Kamuya açık blokzincir yapıları, tüm kullanıcıların ağda kimlik belirtmeksizin işlem yapabildiği, işlem geçmişini okuyabildiği ve hatta ağa katılım sağlayarak blok üretme yetkisine sahip olabildiği dağıtık defter sistemleridir. Bitcoin, Ethereum ve Litecoin gibi ağlar, kamuya açık blokzincir yapısının öncü örnekleri arasında yer almaktadır (Y. Zhang et al., 2021; Zheng et al., 2020c). Konsensüs mekanizmaları genellikle hesaplama gücüne dayalı (PoW) veya varlık miktarına bağlı (PoS) olarak çalışır ve herhangi bir merkezi otoriteye ihtiyaç duyulmaz. Bu sayede sistemin güvenliği, kriptografi ve çok taraflı katılım ilkeleriyle sağlanır. Public blokzincirlerin temel avantajı, tam anlamıyla merkeziyetsiz, sansür dirençli ve izlenebilir yapılar sunmasıdır ancak yüksek işlem maliyetleri, düşük işlem hızı ve gizlilik eksikliği gibi dezavantajlar özellikle kurumsal sistemler için sınırlayıcı olabilmektedir (Atzei et al., 2017). Özellikle düşük işlem hızları, yüksek işlem ücretleri, gizlilik eksikliği ve veri büyüklüğünün zamanla artması, kamuya açık blokzincirlerin kurumsal uygulamalar açısından sınırlayıcı olmasına neden olabilmektedir (Dinh et al., 2020). Bu nedenle kurumsal firmalar genellikle izinli blokzincir yapılarına yönelmekte; ancak kamuya açık blokzincirlerin merkeziyetsizlik avantajı, yenilikçi uygulamaların temelini oluşturmaya devam etmektedir.

İzinli (Private) Blokzincir

İzinli blokzincirler yalnızca belirli kullanıcıların katılabildiği, erişimin kontrollü ve işlem yetkisinin önceden tanımlanmış rollere göre verildiği izinli blokzincir yapılarıdır. Hyperledger Fabric bu izinli ağlardan biridir. Hyperledger Fabric gibi platformlarda uygulandığı her katılımcı kimlik doğrulama sürecinden geçerek sisteme dahil olur ve yalnızca yetkilendirildiği işlemleri gerçekleştirebilir (Liu et al., 2025). Bu yapı sayesinde veri gizliliği sağlanırken aynı zamanda işlem hızı ve ölçeklenebilirlik artırılabilir. Private blokzincirlerde

konsensüs mekanizması, çok sayıda düğümün mutabakatına gerek kalmadan, güvenilir düğümler arasında daha hızlı gerçekleşebilir. Bu sistemler genellikle tedarik zinciri yönetimi, üretim süreçleri, dijital kimlik doğrulama gibi kurumsal uygulamalarda tercih edilmektedir. Ağ yöneticileri, sistem üzerinde erişim denetimi, veri paylaşımı ve işlem sınırlarını detaylı biçimde tanımlayabilir. Bu yönüyle private blokzincirler, şeffaflığı ve güvenliği merkezi olmayan bir yapıda sunarken, organizasyonel kontrol ve ölçeklenebilirlik açısından da esneklik sağlamaktadır (Zheng et al., 2017a).

İzinli blokzincirlerin dikkat çeken bir diğer özelliği, izole işlem alanları sağlayan kanal yapılarıdır. Bu yapı sayesinde, yalnızca ilgili tarafların erişebildiği özel işlem alanları oluşturulabilir. Bu özellik, özellikle ticari sırların korunması, gizli üretim reçetelerinin saklanması veya müşteri özel sipariş bilgilerinin güvenli paylaşımı gibi senaryolarda oldukça kritiktir (Nguyen et al., 2021).

Mutabakat (Konsensüs) Mekanizmaları

Blokzincir teknolojisinin temelinde yer alan en kritik bileşenlerden biri, dağıtık ağ üzerindeki düğümler arasında ortak bir veri bütünlüğü ve güven tesis eden konsensüs mekanizmalarıdır. Konsensüs algoritmaları, ağdaki katılımcıların merkezi bir otoriteye ihtiyaç duymadan, hangi işlemlerin geçerli sayılacağı konusunda fikir birliğine ulaşmasını sağlar (Xiao et al., 2020). Public blokzincirlerde yaygın olarak kullanılan PoW, yüksek hesaplama gücü gerektiren ve enerji tüketimi açısından yoğun bir yapıya sahiptir. Alternatif olarak geliştirilen PoS ve Delegated Proof of Stake (DPoS) gibi algoritmalar ise enerji verimliliğini artırırken, doğrulayıcı seçimini varlık miktarına dayandırmaktadır. Öte yandan, kurumsal düzeyde geliştirilen Hyperledger Fabric gibi izinli blokzincir sistemler, daha hızlı ve özelleştirilebilir konsensüs yöntemleri sunmaktadır. Hyperledger Fabric'de, işlemlerin onaylanması için “onay politikası (endorsement policy)” adı verilen kurallar tanımlanır; belirlenen kuruluşların işlemi doğrulaması yeterlidir. Bu yapı, klasik konsensüs algoritmalarının aksine, işlem simülasyonu ve imzalama yoluyla uygulanan önceden tanımlı kurallara dayalı bir mutabakat modeli sağlar. Böylece ağ performansı artarken, merkeziyetsizlik ilkesi sistemin güvenilirliğini korur (Piao et al., 2023).

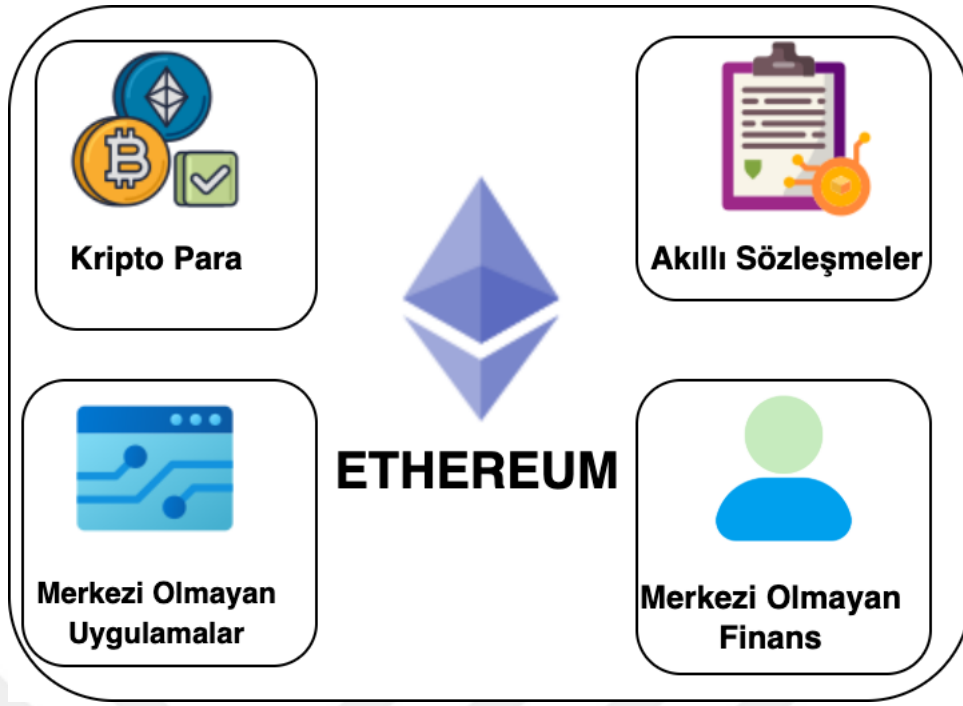
Ethereum

Ethereum, blokzincir teknolojisinin gelişiminde önemli bir dönüm noktası oluşturan ve bu teknolojiyi yalnızca dijital para transferiyle sınırlı bırakmayan öncü bir platformdur. Vitalik Buterin'in 2013 yılında ortaya koyduğu vizyon doğrultusunda geliştirilen Ethereum, 2015 yılında hayata geçirilmiş ve kullanıcıların kendi koşullarını tanımlayabildikleri,

programlanabilir akıllı sözleşmeler yazmalarına imkân tanımıştır (Vitalik Buterin, 2014). Bitcoin'in sınırlı komut seti yalnızca basit değer transferlerine imkân tanırken, Ethereum çok daha geniş kapsamlı, bir dil olan Solidity ile akıllı sözleşmelerin esnek şekilde geliştirilmesini mümkün kılar. Bu durum, Ethereum'u bir "dünya bilgisayarı" haline getirerek kullanıcıların merkezi otoriteye ihtiyaç duymadan dijital sözleşmeler oluşturmaya ve çalıştırmaya olanak sağlamaktadır.

Ethereum'un temel bileşenlerinden biri olan Ethereum Sanal Makinesi (Ethereum Virtual Machine (EVM)), ağdaki tüm düğümlerde sözleşme kodunun aynı şekilde yürütülmesini sağlar. Bu mekanizma sayesinde ağda oluşabilecek tutarsızlıkların önüne geçilirken, güvenlik ve işlem bütünlüğü garanti altına alınır (Wood, 2014). Söz konusu sözleşmelerin çalıştırılması için gereken işlem gücü "gas" birimiyle ölçülmekte, bu ücret Ether (ETH) cinsinden ödenmektedir. Ether, Ethereum ekosisteminde hem bir değer transfer aracı hem de sözleşme yürütme maliyetlerini karşılayan temel ekonomik birim olarak işlev görmektedir. Bu yapı, platformun yalnızca teknik değil, aynı zamanda ekonomik olarak da sürdürülebilir olmasını sağlamaktadır.

Ethereum'un gelişim sürecindeki en önemli adımlardan biri, çevresel sürdürülebilirlik ve işlem ölçeklenebilirliği amacıyla başlatılan Ethereum 2.0 dönüşümüdür. Bu geçiş, PoW konsensüs mekanizmasının yüksek enerji tüketimine ve sınırlı işlem kapasitesine bir çözüm olarak, PoS algoritmasına geçişi içermektedir. 2022 yılında başarıyla tamamlanan bu dönüşüm, ağın enerji tüketimini %99'dan fazla azaltmış ve aynı zamanda işlemlerin doğrulanmasını daha ekonomik ve erişilebilir hâle getirmiştir (Vitalik Buterin, 2014). PoS sisteminde, kullanıcılar sahip oldukları Ether miktarı oranında işlem doğrulayıcı olabilmekte ve ağın güvenliğine katkı sunmaktadır. Bu sayede, Ethereum ağı hem daha demokratik hem de daha çevre dostu bir yapıya kavuşmuştur.



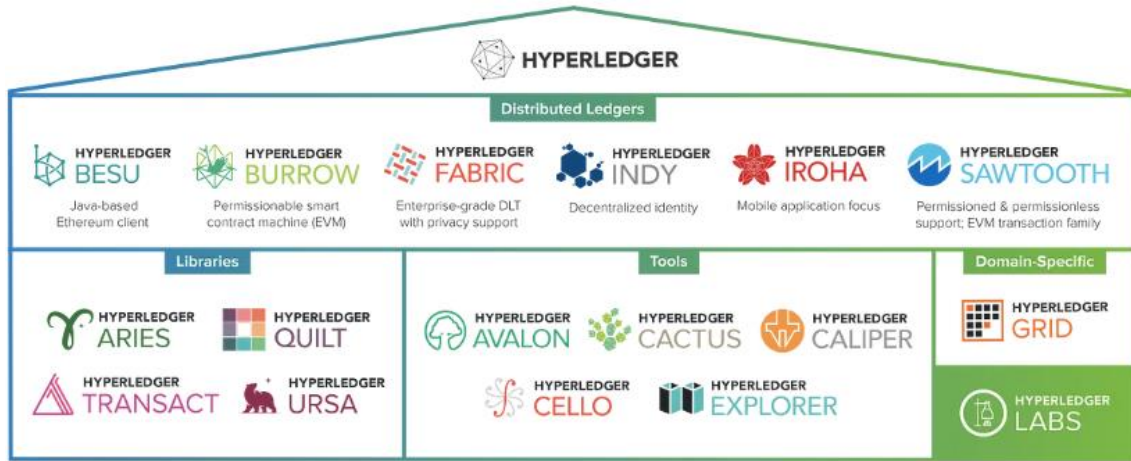
Şekil 2. Ethereum uygulama alanları şekil alt çizgisi

Ethereum, yalnızca blokzincir teknolojisinin uygulanabilirliğini genişletmekle kalmamış, aynı zamanda dijital sistemlerin merkeziyetsizleştirilmesi ve güven temelli olmayan (trustless) etkileşimlerin mümkün kılınması açısından bir paradigma değişimi yapmıştır. Bugün gelinen noktada Ethereum, uygulama geliştiriciler için kapsamlı araçlar, güvenli altyapılar ve ekonomik teşvik modelleri sunmakta; özel sektör, kamu ve akademi tarafından aktif olarak araştırılan ve kullanılan en gelişmiş blokzincir platformlarından biri olma özelliğini sürdürmektedir. Şekil 2’de yer alan uygulama alanları bu çok yönlülüğü somutlaştırmaktadır: Kripto Para alanında Ethereum, ETH aracılığıyla ağ üzerinde işlem ücretlerini karşılayan ve değer transferi sağlayan bir dijital varlık sunar; akıllı sözleşmeler, koşullara bağlı olarak otomatik çalışan ve güvene dayalı olmayan işlem yapıları oluşturarak taraflar arasında şeffaflık ve güvenlik sağlar; merkezi olmayan uygulamalar, kullanıcıların merkezi otoriteler olmadan işlem yapmasına imkân tanıyan yazılımlar geliştirilebilmesini mümkün kılar; merkezi olmayan finans (Decentralized Finance) uygulamaları ise geleneksel finansal sistemlere alternatif olarak, aracı kurumlara gerek duymadan borç verme, yatırım ve varlık yönetimi gibi işlemlerin yürütülmesini sağlar.

Hyperledger

Hyperledger, 2015 yılında Linux Foundation tarafından başlatılan ve kurumsal düzeyde blokzincir çözümleri geliştirmeye odaklanan açık kaynaklı bir proje topluluğudur. Projenin temel amacı, farklı sektörlerdeki işletmelerin ihtiyaçlarına yanıt verebilecek izinli blokzincir altyapılarını geliştirmek ve bunların sürdürülebilirliğini sağlamaktır (Cachin, C. (2016)).

Hyperledger çatısı altında geliştirilen sistemler, kamuya açık blokzincirlerde karşılaşılan anonimlik, performans düşüklüğü ve veri gizliliği eksikliği gibi sorunlara çözüm üretmeyi hedefler. Hyperledger, bu amaçla birden fazla alt proje barındırmaktadır: Hyperledger Fabric, modüler yapısı ve kanal tabanlı gizlilik modeliyle dikkat çekerken; Hyperledger Sawtooth, farklı konsensüs algoritmalarını desteklemesiyle öne çıkar. Hyperledger Besu, Ethereum uyumlu bir izinli blokzincir platformu sunarken; Hyperledger Indy, dijital kimlik çözümlerine odaklanmaktadır. Bu projelerin her biri farklı kurumsal ihtiyaçlara cevap verebilecek biçimde tasarlanmış olup, ortak bir mimari çerçevede geliştirilmektedir. Hyperledger, üyeleri arasında IBM, Intel, SAP, Accenture, Fujitsu gibi büyük teknoloji şirketlerinin bulunduğu bir konsorsiyum yapısına sahiptir ve blokzincir teknolojisinin güvenli, ölçeklenebilir ve uyarlanabilir biçimde kullanılmasına yönelik standartları teşvik etmektedir (Zhang et al., 2018). Şekil 3'te, Hyperledger çatısı altında geliştirilen dağıtık defter teknolojileri ile ilgili çerçeve bileşenleri ve araçlara ilişkin genel mimari sunulmaktadır.



Şekil 3. Hyperledger çerçeveleri (Ramirez Lopez et al., 2022)

Hyperledger Fabric

Hyperledger Fabric, dağıtılmış defter teknolojilerinin kurumsal düzeyde uygulamaları için geliştirilen, izinli ve modüler bir blokzincir platformudur. Özellikle çok paydaşlı üretim sistemleri, tedarik zinciri yönetimi ve finansal hizmetlerde güvenlik, gizlilik ve işlem hızının ön planda olduğu senaryolarda tercih edilmektedir (Androulaki et al., 2018). Fabric, klasik halka açık blokzincir sistemlerinden farklı olarak, ağdaki her katılımcının kimliğinin dijital sertifikalarla tanımlandığı ve işlemlerin sadece yetkilendirilmiş düğümler tarafından gerçekleştirilip onaylandığı bir yapı sunar. Akıllı sözleşmeler yerine kullanılan chaincode yapısı, işletmelerin kendi üretim süreçlerine özgü iş kurallarını özelleştirilmiş şekilde tanımlamasına imkân tanır. Bu durum, Hyperledger Fabric'in Nİ, gerçek zamanlı veri işleme,

siber-fiziksel sistemler ve bulut üretim altyapıları ile entegrasyonunu mümkün kılar (Lu & Xu, 2019).

Fabric'in işlem yapısı, "execute-order-validate" olarak adlandırılan üç aşamalı bir modelle çalışır. Bu model, önce işlemin simüle edilmesi (execute), ardından sıralama hizmetiyle bloklara dahil edilmesi (order) ve son olarak ağ düğümlerince doğrulanıp deftere yazılması (validate) aşamalarını içerir. Bu ayrıştırma sayesinde yüksek işlem performansı ve ölçeklenebilirlik elde edilirken, işlemler üzerinde daha detaylı kontrol sağlanır (C. Wang & Chu, 2021). Fabric'in kanal (channel) yapısı, belirli kurumlar arasında izole edilmiş işlem alanları oluşturulmasına olanak tanır. Bu özellik, özellikle gizli üretim reçeteleri, tedarikçi fiyatlandırmaları ya da müşteri özel üretim emirleri gibi hassas verilerin paylaşımını sınırlandırmak açısından kritik öneme sahiptir (Casino et al., 2019).

Blokzincirin güven, şeffaflık ve değiştirilemezlik gibi temel niteliklerini koruyarak daha özelleştirilebilir ve denetlenebilir bir yapı sunan Hyperledger Fabric, günümüzde Ethereum gibi halka açık sistemlerin sunduğu avantajların ötesine geçerek kurumsal dijital dönüşüm stratejilerinin temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir. Özellikle Endüstri 4.0 çerçevesinde şekillenen üretim altyapılarında, DLT, akıllı sözleşmeler, gerçek zamanlı veri ve merkeziyetsiz uygulamalar gibi kavramlarla bütünleşik çalışan Fabric, güvenli ve sürdürülebilir dijital üretim sistemlerinin inşasında kritik bir rol oynamaktadır.

Hyperledger Fabric Temel Bileşenleri

Hyperledger Fabric, uygulamalar ve sistem yöneticileri için güvenli, ölçeklenebilir ve özelleştirilebilir bir blokzincir altyapısı sunmaktadır. Bu platformda oluşturulan ağ yapısı, genellikle iki veya daha fazla kuruluşun ya da paydaş grubunun bir araya gelerek iş birliği yapmasıyla şekillenir. Fabric'in işlevsel hâle getirilebilmesi için ise belirli temel sistem bileşenlerinin fiziksel ve yazılımsal olarak yapılandırılması gerekmektedir. Bu nedenle, platformun kurulum ve çalıştırma sürecine ilişkin bileşenlerin özlü ve açık biçimde tanımlanması hem mimari anlayışın netleşmesi hem de uygulama sürecinin doğru planlanabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Eş Düğümler (Peer nodes)

Hyperledger Fabric'in ağ mimarisinde en temel bileşen olan peer node'lar, işlemlerin çalıştırılmasından ve defterin (ledger) tutulmasından sorumlu olan düğümlerdir. Her kuruluş, kendi peer node'larını barındırabilir ve bu düğümler, ağın genel işleyişinde aktif rol oynar. Peer'lar farklı görevler üstlenebilir: "endorsing peer" olarak, gelen işlem önerilerini chaincode üzerinden çalıştırıp simüle eder ve dijital olarak imzalar; "committing peer" olarak ise

orderer'dan gelen blokları deftere yazar. Bu farklı roller, sistemin performansını optimize ederken, yetkilendirme politikalarının da esnek şekilde uygulanmasını sağlar. Her peer, ledger'in bir kopyasını tutar ve böylece dağıtık yapı korunur.

Sıralayıcı (Orderer)

Ordering service, Fabric'in klasik blokzincirlerden farklılaşan “execute-order-validate” modelinin sıralama katmanını temsil eder. Peer node'lardan gelen onaylanmış işlem tekliflerini toplar, belirli bir sıraya göre sıralar ve bloklar hâline getirir. Bu bloklar daha sonra tüm peer node'lara dağıtılır. Fabric, enerji yoğun konsensüs algoritmaları yerine daha verimli ve güvenilir sıralama protokollerini destekler. Özellikle Raft protokolü, hata toleranslı ve merkeziyetsiz sıralama sağlarken yüksek işlem performansı sunar. Ordering service, işlemlerin bütün ağda tutarlı ve güvenli biçimde kaydedilmesini garanti eder.

Akıllı Sözleşmeler (Chaincode)

Hyperledger Fabric'de chaincode, akıllı sözleşmeleri ifade eder ve sistemdeki iş kurallarının yazıldığı yazılım bileşenidir. Peer node'lar, chaincode'u simüle ederek işlem önerisini değerlendirir ve sonuçlarını imzalar. Chaincode, genellikle Go diliyle yazılır; ancak JavaScript (Node.js) veya Java gibi diller de desteklenir. Her kanal, kendine özgü chaincode setine sahip olabilir. Bu yapı, farklı taraflar arasında iş süreçlerinin özelleştirilmiş ve izole biçimde yürütülmesine olanak tanır.

Üyelik Hizmet Sağlayıcısı (Membership Service Provider (MSP))

Membership Service Provider (MSP), Fabric ağında kimlik doğrulama ve yetkilendirme işlevlerini yerine getirir. Katılımcıların işlemleri gerçekleştirebilmesi için dijital sertifikalarla tanımlanması gerekir. Bu sertifikalar genellikle X.509 standardına uygundur ve MSP, bu kimlikleri tanıyarak ağ içi rol dağılımını yapar. Böylece yalnızca yetkilendirilmiş kullanıcılar işlem teklifinde bulunabilir veya blokları yazabilir. MSP ile, kuruluşların ağ üzerinde kendi üyelerini yönetmesi ve erişim kontrollerini detaylı şekilde uygulaması mümkün hâle gelir. Bu yapı, özellikle kurumsal blokzincir ağlarında güvenliği ve veri gizliliğini sağlayan kilit bir bileşendir.

Dağıtılmış Defter (Ledger)

Ledger, sistemde gerçekleşen tüm işlemlerin değiştirilemez biçimde kayıt altına alındığı defter yapısını temsil eder. Hyperledger Fabric'de her peer, kendi ledger kopyasını tutar. Ledger, iki bileşenden oluşur: işlem geçmişini içeren transaction log ve en güncel durumu gösteren world state. İşlem geçmişi sabit kalırken, world state, chaincode tarafından

güncellenen verilere anlık olarak erişim sağlar. Bu yapı sayesinde hem geçmişe dönük denetim izleri hem de güncel sistem durumu eşzamanlı şekilde takip edilebilir. Ledger'ın değiştirilemez yapısı, blokzincirin güvenlik ve şeffaflık özelliklerini sağlar.

State Database (CouchDB veya LevelDB)

World state olarak adlandırılan güncel zincir durumu, Fabric'in state database bileşeninde saklanır. Varsayılan olarak LevelDB kullanılsa da gelişmiş veri sorgulama yetenekleri nedeniyle çoğu uygulamada CouchDB tercih edilir. CouchDB, JSON tabanlı belge yapısıyla REST API üzerinden karmaşık sorgulara olanak tanır. Chaincode, state database'deki verilere erişerek güncelleme yapabilir ya da sorgulama gerçekleştirebilir. Bu katman, uygulamaların performansını ve veri işleme kapasitesini doğrudan etkiler ayrıca CouchDB sayesinde, zincir verisi dış sistemlerle daha kolay entegre edilebilir.

Kanal Yapısı (Channel)

Hyperledger Fabric'in çoklu taraflar arasında veri gizliliğini sağlamak için sunduğu en güçlü yapılardan biri kanal mimarisidir. Her kanal, izole bir iletişim ve işlem alanı oluşturur; yalnızca kanal üyeleri bu kanaldaki işlemleri görebilir ve işlem gerçekleştirebilir. Her kanal kendi ledger'ına ve chaincode'una sahiptir. Bu yapı hem veri gizliliği hem de işlem bağımsızlığı açısından Fabric'in kurumsal çözümlere en uygun yönlerinden biridir.

Sertifika Yetkilisi (Certificate Authority (CA))

Fabric Certificate Authority (CA), ağ katılımcılarına kimlik sertifikaları sağlayan merkezi bileşendir. Bu sertifikalar, üyelerin MSP tarafından tanınması ve yetkilendirilmesi için gereklidir. CA, kullanıcıları ağa kaydetmek (enrollment) ve bu kullanıcılar için dijital sertifikalar oluşturmak üzere iki ana işlevi yerine getirir. CA aynı zamanda, yetki seviyelerine göre farklı kullanıcı rolleri tanımlayabilir (örneğin admin, client, peer). Fabric CA ile, merkeziyetsiz yapı korunurken aynı zamanda sistem güvenliği ve kullanıcı kimlik doğrulaması yüksek güvenilirlikle sağlanmış olur.

Akıllı Sözleşme

Akıllı sözleşmeler (smart contract/chaincode), belirli koşullar sağlandığında otomatik olarak yürürlüğe giren, blokzincir teknolojisi üzerinde çalışan dijital protokollerdir. Bu yapılar, merkezi otoritelere veya üçüncü taraf araçlara ihtiyaç duymadan işlemlerin yürütülmesini ve kayıt altına alınmasını mümkün kılar. İlk olarak Nick Szabo tarafından 1997 yılında ortaya atılan bu kavram, sözleşme süreçlerinin otomasyonunu ve dijital güvenliğini sağlamaya yönelik bir yaklaşımı temsil eder. Szabo'nun öne sürdüğü fikir, otomat makineleri gibi belirli girdilere

karşılık belirli çıktılar üreten yapılarla dijital sözleşme süreçlerini modellemeyi amaçlamaktadır (Szabo, n.d.). Günümüzde, bu vizyon Ethereum gibi platformların gelişimiyle birlikte gerçek zamanlı, programlanabilir sözleşmelere dönüşmüş ve uygulama alanı oldukça genişlemiştir.

Ethereum platformu, akıllı sözleşme geliştirme konusunda en yaygın kullanılan altyapılardan biri olup, Solidity adlı yüksek seviyeli ve nesne yönelimli bir programlama dili sunar. Solidity ile geliştirilen sözleşmeler EVM üzerinde çalışır ve dağıtık defter teknolojisinin avantajlarını kullanarak tüm ağ katılımcıları tarafından doğrulanabilir hale gelir. Bu yapı sayesinde işlemler şeffaf, güvenli ve merkezi müdahalelere kapalı bir biçimde yürütülür (Wood, 2014). Özellikle güvene dayalı olmayan ortamlarda, tarafların birbirlerini tanımadan işlemleri güvenle gerçekleştirebilmesi mümkün olmaktadır. Akıllı sözleşmeler yalnızca dijital anlaşmaların kodlanması değil, aynı zamanda sistem güvenliğinin, iş akışlarının ve organizasyonel iş birliğinin yeniden inşası anlamına da gelir.

Diğer yandan, kurumsal düzeyde blokzincir uygulamaları için geliştirilen Hyperledger Fabric, akıllı sözleşmelere karşılık gelen yapı olarak “chaincode” kavramını kullanmaktadır. Chaincode, sistemin mantıksal işleyişini belirleyen ve işlemleri yönetmek için kullanılan kod bloklarıdır. Hyperledger Fabric’in mimarisi, Ethereum’dan farklı olarak izinli bir yapıya sahiptir ve işletmelere özel ağ topolojileriyle yüksek ölçeklenebilirlik ve gizlilik sunar. Fabric üzerindeki chaincode’lar, Go, JavaScript ya da Java dilleri ile yazılmakta ve ağdaki her işlem bu chaincode’lar üzerinden tetiklenerek doğrulanmaktadır. Bu yapı, özelleştirilmiş konsensüs mekanizmaları ve çoklu kanal (channel) yapıları ile birlikte çalıştığında, farklı kurumsal aktörlerin birbirinden izole biçimde işlem yapmasına olanak tanır (Androulaki et al., 2018).

Her iki sistemin karşılaştırılması, akıllı sözleşmelerin uygulama alanlarına göre özelleştirilebileceğini göstermektedir. Ethereum tabanlı sözleşmeler, daha çok kamuya açık uygulamalar ve token tabanlı modeller için uygundur; çünkü merkeziyetsizlik, sansür direnci ve topluluk odaklı gelişim burada ön plandadır. Buna karşılık Hyperledger Fabric, çok taraflı kurumsal iş birliği, yüksek veri gizliliği ve rol tabanlı erişim kontrolü gerektiren iş süreçleri için daha elverişli bir yapıya sahiptir. Örneğin tedarik zinciri, finansal mutabakat, üretim izlenebilirliği gibi kurumsal ortamlarda chaincode kullanımı, operasyonel güvenlik ve mevzuata uyumluluk açısından önemli avantajlar sunar (Thakkar et al., 2018).

Sonuç olarak, akıllı sözleşmeler, blokzincir teknolojisinin sunduğu güven, şeffaflık ve otomasyon avantajlarını yazılım düzeyinde hayata geçiren en güçlü araçlardır. Ethereum’un sunduğu merkeziyetsizlik ve topluluk desteği ile Fabric’in kurumsal düzeyde güvenlik ve yapılandırılabilirlik özellikleri, farklı ihtiyaçlara göre farklı çözümler sunar.

Merkeziyetsiz Uygulamalar (Decentralized Applications)

Merkeziyetsiz uygulamalar (Decentralized Applications – DApps), klasik merkezi mimarinin aksine herhangi bir merkezi otoriteye ya da sunucuya bağılı olmadan çalışan, blokzincir teknolojisi ile desteklenen ve kullanıcıların doğrudan akıllı sözleşmelerle etkileşime geçmesine imkân tanıyan dijital uygulamalardır. DApp'ler, dağıtık bir mimari üzerine kuruludur ve veriler, merkezi bir veritabanı yerine blokzincir ağı üzerindeki tüm katılımcılar tarafından paylaşılan defterlerde saklanır. Bu sayede uygulama içerisinde gerçekleştirilen işlemler, tüm kullanıcılar tarafından doğrulanabilir ve izlenebilir hâle gelir; böylece hem şeffaflık hem de güvenlik önemli ölçüde artar (Johnston et al., 2014). Bu yapı aynı zamanda sansüre karşı direnci de artırır; çünkü herhangi bir merkezi sunucuya yapılan saldırılar, dağıtık mimari nedeniyle sistemin tamamını çökertemez.

DApp'lerin temel özelliklerinden biri, açık kaynaklı olmalarıdır. Kaynak kodun herkes tarafından erişilebilir olması hem uygulamanın denetlenebilirliğini artırır hem de geliştirici topluluklarının katkı sunmasına olanak tanır, uygulama mantığının merkeziyetsizliği, aracı kurumlara olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Uygulamanın işlem kuralları, blokzincir üzerinde çalışan akıllı sözleşmeler aracılığıyla otomatik olarak yürütülür. Böylece kullanıcılar, merkezi bir yapıdan onay almadan, doğrudan sistemle etkileşime geçebilirler. Ethereum, EOS, Binance Smart Chain gibi platformlar, geliştiricilerin DApp oluşturmalarını mümkün kılan altyapı ve programlama dilleri ile bu alandaki gelişimin öncüsü konumundadır (Xu et al., 2019).

Günümüzde DApp'ler sadece finansal işlemlerle sınırlı kalmayıp oyun, eğlence, dijital içerik üretimi, sosyal medya, e-ticaret, kimlik doğrulama, sağlık hizmetleri ve kamu uygulamaları gibi çok geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Özellikle merkeziyetsiz finans (DeFi) alanında DApp'ler, kullanıcıların kredi alıp verme, teminatlandırma, likidite sağlama, otomatik piyasa yapıcılığı ve takas işlemlerini merkeziyetsiz biçimde yürütmesine olanak tanımaktadır (Schär, 2020). Bu tür sistemlerde kullanıcılar kendi fonları üzerinde tam kontrole sahip olurken; işlemler de açık, güvenli ve otomatik biçimde yürütülmektedir. Örneğin Uniswap, Aave ve Compound gibi popüler DApp'ler milyonlarca kullanıcıya merkeziyetsiz finansal hizmetler sunarak geleneksel bankacılık sistemlerine alternatifler yapmıştır.

DApp'lerin sunduğu avantajlar, sadece teknik değil, aynı zamanda sosyo-politik açılardan da dikkate değerdir. Sansüre karşı dayanıklılık, kullanıcı gizliliği ve küresel erişilebilirlik gibi özellikler, dijital platformların geleceğinde merkeziyetsiz modellerin daha çok tercih edileceğini göstermektedir.

Merkeziyetsiz uygulamalar, blokzincir teknolojisinin uygulama düzeyinde somutlaştığı ve kullanıcıların merkezi otoritelerden bağımsız biçimde işlem yapabildiği yapılar olarak dijital dönüşüm sürecinde kilit bir role sahiptir.

Hizmet Olarak Üretim (Manufacturing as a Service)

Manufacturing as a Service (MaaS), üretim kapasitelerinin, dijital platformlar aracılığıyla farklı müşterilere ihtiyaç duydukları anda hizmet olarak sunulması esasına dayanan yeni nesil bir üretim modelidir. Bu yaklaşımda fiziksel üretim kaynakları tıpkı bulut bilişimdeki gibi esnek ve isteğe bağlı bir biçimde sunulur; böylece küçük ve orta ölçekli işletmeler yüksek sermaye yatırımları yapmaksızın, ihtiyaca göre üretim altyapısından faydalanabilirler (Zheng et al., 2017a. MaaS modeli, geleneksel üretimden farklı olarak, tedarikçi ve müşteri arasında doğrudan dijital arayüzler aracılığıyla iletişim kurmayı ve üretim siparişlerinin otomatik olarak işlenmesini mümkün kılar. Endüstri 4.0 çerçevesinde gelişen siber-fiziksel sistemler, bulut üretim altyapıları ve IoT teknolojileri MaaS platformlarının omurgasını oluşturmaktadır (F. Liu et al., 2019. Blokzincir ve akıllı sözleşmeler gibi güven temelli teknolojilerin bu gibi sistemlere entegre edilmesi, üretim emirlerinin doğruluğunu, şeffaflığını ve izlenebilirliğini artırarak taraflar arasında dijital güven tesis eder (Yu et al., 2019; Y. Zhang et al., 2020. MaaS, üretimin sadece fiziksel bir işlem değil, aynı zamanda veri merkezli, dinamik ve platform tabanlı bir hizmete dönüştüğü dijitalleşme sürecinin önemli bir bileşenidir. Bu nedenle, küresel tedarik zincirlerinin yeniden yapılandırılmasında ve kaynak temelli rekabetin yerini platform temelli işbirliğine bırakmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)

Nİ, fiziksel nesnelerin sensörler, yazılımlar ve ağ bağlantıları aracılığıyla internete entegre edilerek çevresel verileri algılamalarını, veri üretmelerini ve başka cihazlarla gerçek zamanlı olarak iletişim kurmalarını mümkün kılan bir teknolojik çerçevedir. Nİ sistemleri; üretim makinelerinden otonom araçlara, bina altyapılarından tıbbi cihazlara kadar birçok fiziksel varlığı dijital dünyaya entegre ederek, izleme, analiz etme ve otomatik tepki verme gibi işlevleri otonom biçimde gerçekleştirebilir hale getirir Fernandez-Carames & Fraga-Lamas (2024), Endüstri 4.0 kapsamında Nİ, üretim sistemlerinin dijitalleşmesinde kilit rol oynamaktadır; çünkü makineler ve sistemler arasında sürekli veri alışverişi sağlanarak süreçlerin daha esnek, özelleştirilebilir ve öngörülebilir hale gelmesi mümkün olmaktadır (Lu, 2017. Nİ sayesinde üretim hatlarında yer alan ekipmanlar arıza belirtilerini erken aşamada algılayabilir, bakım süreçleri önceden planlanabilir ve enerji tüketimi optimize edilebilir (Tariq & Khan, 2024; Herlianti et al., 2025). Bununla birlikte, Nİ sistemlerinde üretilen büyük

miktardaki verinin güvenli biçimde işlenmesi ve paylaşılması yeni risk alanları doğurmaktadır. Bu nedenle, blokzincir gibi güven temelli teknolojilerin Nİ altyapılarına entegre edilmesi; veri güvenliği, izlenebilirlik ve işlemlerin doğrulanabilirliği açısından kritik öneme sahiptir(Dorri et al., 2017. Sonuç olarak Nİ, fiziksel ve dijital sistemler arasında köprü işlevi görerek Endüstri 4.0'ın veri temelli karar alma, otomasyon ve siber-fiziksel sistem vizyonunun temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir.

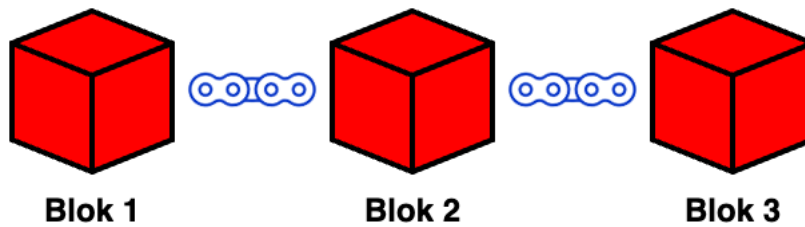
Gerçek Zamanlı Veri (Real-Time Data)

Gerçek zamanlı veri (real-time data), sistemlerin, cihazların veya sensörlerin ürettiği bilgilerin gecikme olmaksızın toplanması, işlenmesi ve anlamlandırılması sürecini ifade eder. Özellikle üretim, lojistik ve enerji yönetimi gibi dinamik sistemlerde, kararların saniyeler içinde verilmesi gereken ortamlarda gerçek zamanlı verinin önemi kritik düzeydedir (Lee et al., 2015 Endüstri 4.0 çerçevesinde geliştirilen siber-fiziksel sistemler ve IoT altyapıları sayesinde, üretim hatlarındaki makinelerden, tedarik zincirindeki taşıma araçlarına kadar pek çok fiziksel unsurdan sürekli veri akışı sağlanabilmektedir (Lu, 2017). Bu veriler anlık olarak bulut sistemlerine veya dağıtık veritabanlarına iletilerek uygulama katmanlarında analiz edilir ve üretim planlaması, bakım ihtiyacı, kaynak tahsisi gibi operasyonel kararlar sistem tarafından otomatik olarak alınabilir. Gerçek zamanlı veri kullanımı aynı zamanda blokzincir sistemleriyle entegre edilerek, işlemlerin anlık olarak güvenli biçimde kaydedilmesine olanak tanır; böylece sistemdeki her hareket hem izlenebilir hem de değiştirilemez hâle gelir. Özellikle kenar-blokzincir mimarileri, Nİ sensörlerinden gelen akış verilerini işleyerek hem gecikmeyi minimize etmekte hem de veri güvenliği ve izlenebilirliği sağlamaktadır (He et al., 2022; Hossain et al., 2024). Bu bağlamda gerçek zamanlı veri, yalnızca operasyonel verimliliği değil; aynı zamanda güvenlik, şeffaflık ve dijital karar destek süreçlerini de geliştiren stratejik bir bileşen olarak değerlendirilmektedir.

MATERYAL VE METOT

Bu araştırmanın temel amacı, blokzincir teknolojisinin tedarik zinciri yönetimi süreçlerinde nasıl uygulanabileceğini incelemek ve bu doğrultuda yenilikçi bir mimari çözüm önermektir. Geleneksel tedarik zinciri yapıları; güvenlik açıkları, veri tutarsızlıkları, manuel işlemler ve merkezi denetime olan bağımlılık gibi birçok sorun barındırmaktadır. Bu çalışma, söz konusu sorunlara çözüm getirebilecek blokzincir temelli dağıtık sistemlerin, üretim odaklı MaaS yapıları ile nasıl entegre edilebileceğini ele almaktadır. Mimari tasarımın oluşturulmasında mevcut sistemlerin karşılaştırmalı analizi yapılmış, blokzincir teknolojisinin şeffaflık, güvenilirlik, otomasyon ve maliyet verimliliği gibi avantajları dikkate alınmıştır. Bu kapsamda kullanılan temel teknolojiler ve yöntemsel yaklaşım aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Blokzincir teknolojisi, merkezi bir yapıdan bağımsız olarak çalışan, dijital verilerin güvenli ve kalıcı biçimde kaydedilmesini sağlayan bir sistemdir. Bu teknoloji, merkeziyetsiz yapısı sayesinde ağda yer alan her bir katılımcının aynı bilgiye sahip olmasını sağlar; böylelikle veri üzerinde tek bir otoritenin değişiklik yapması imkânsız hale gelir. Ağdaki tüm işlemler zaman damgası ile kaydedilir ve işlem geçmişi herkes tarafından izlenebilir durumdadır. Bu durum sistemin şeffaflığını ve güvenilirliğini artırırken, dış müdahalelere karşı da dayanıklılık kazandırır. Veriler kriptografi ile korunmakta ve her blok, önceki blokla kriptografik hash bağlantısı kurarak zinciri oluşturmaktadır. Bu yapı, herhangi bir blokta yapılacak değişikliğin tüm sistemde zincirleme etkiler oluşturmalarını sağlayarak veri bütünlüğünü garanti altına alır ve kötü niyetli müdahalelerin önüne geçilmesini sağlar. Şekil 4'te, blokzincir yapısının temel unsurları ile bloklar arasındaki bağlantı ilişkisi şematik olarak sunulmaktadır.

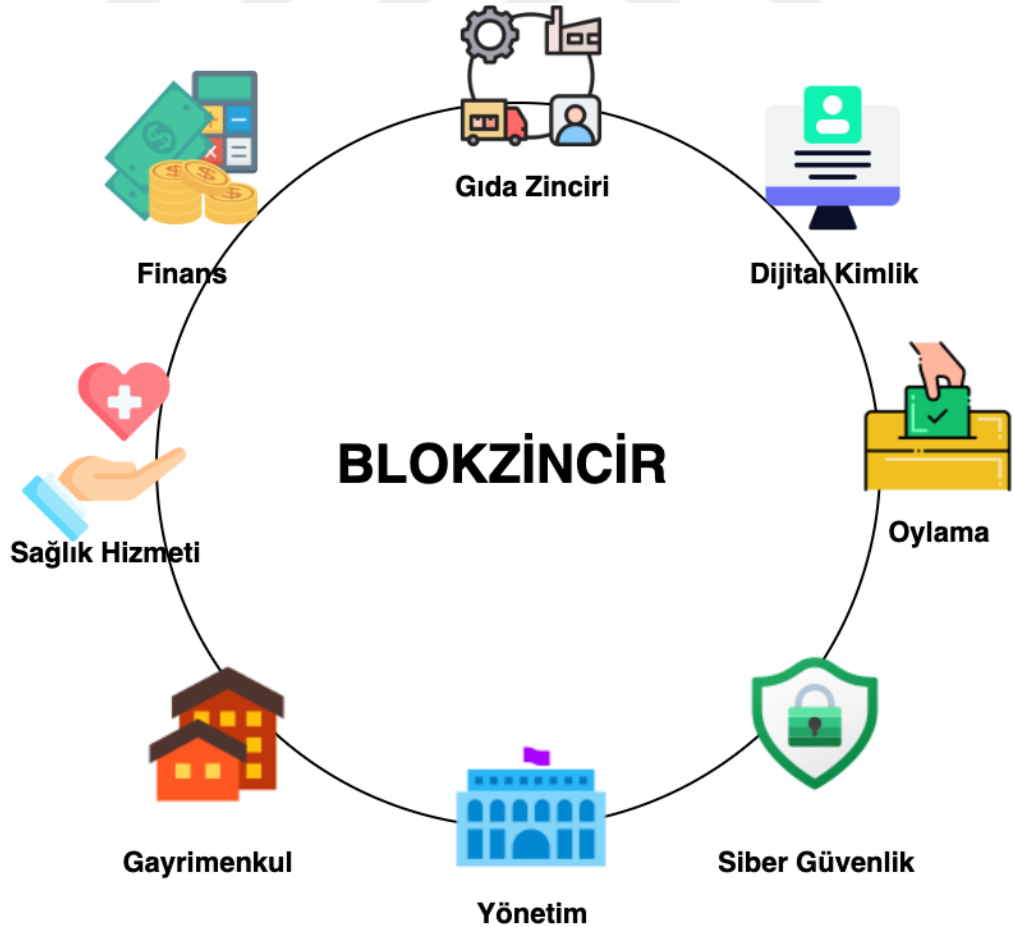


Şekil 4. Blokzincir blok yapısı

Blokzincirin temelinde yer alan dağıtık defter teknolojisi, verilerin birden fazla katılımcı tarafından kopyalanarak saklandığı bir yapıdır. Bu yapıda, yeni bir işlem gerçekleştiğinde tüm ağ katılımcıları bu işlemi doğrular ve oy birliği sağlandıktan sonra işlem geçerli sayılır. Bu

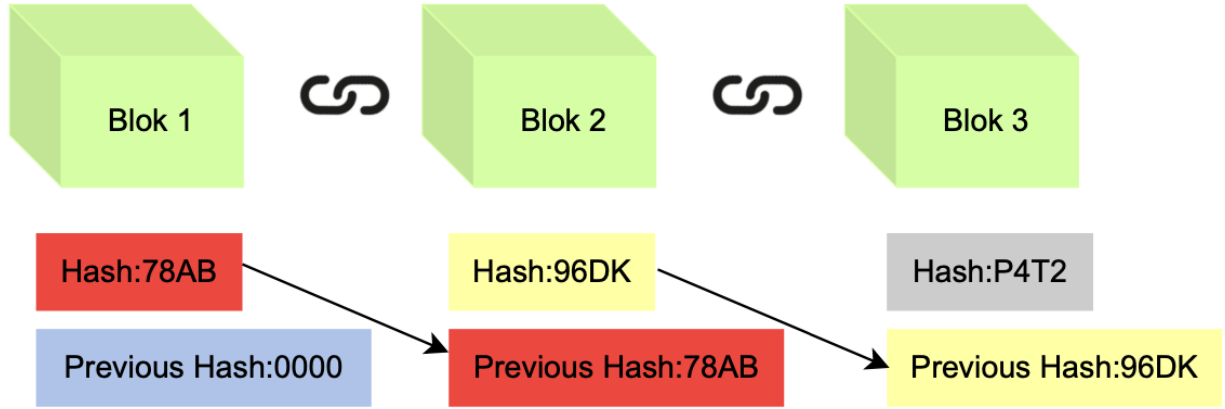
sistem sayesinde, merkezi bir otoriteye olan ihtiyaç ortadan kalkarken, işlem doğrulama süreçlerinde güvenlik ve şeffaflık maksimum seviyeye ulaşır. Konsensüs algoritmaları, işlemlerin onaylanmasında farklı yaklaşımlar sunmaktadır. Bu çalışmada, enerji verimliliği ve işlem hızı açısından PoS ve PoA gibi alternatif konsensüs yöntemleri dikkate alınmıştır. Bu yapının sunduğu avantajlar, blokzinciri yalnızca finans değil, üretim, lojistik ve kamu hizmetleri gibi farklı alanlara da uygulanabilir hâle getirmiştir.

Blokzincir, sahip olduğu teknik avantajlar sayesinde günümüzde birçok sektörde aktif olarak kullanılmaktadır. Finans ve bankacılık sektöründe para transferlerinin güvenli şekilde yapılması, sağlık sektöründe hasta kayıtlarının mahremiyetle saklanması, gayrimenkul işlemlerinde tapu bilgilerinin izlenebilir ve değiştirilemez hale gelmesi gibi örnekler bunlardan bazılarıdır. Gıda tedarik zincirlerinde ürünlerin çiftlikten sofraya kadar izlenmesi, e-devlet sistemlerinde güvenli oylama yapılması gibi senaryolar da blokzincirin sunduğu avantajlardan faydalanan alanlar arasındadır. Şekil 5'te blokzincir kullanım alanları mevcuttur. Bu teknolojinin sağladığı en büyük katkılardan biri, kayıtların değiştirilemezliği ve güvenilirliğidir; bu sayede paydaşlar arasında güven ortamı sağlanmakta ve işlemlerin doğruluğu üçüncü taraflara ihtiyaç duyulmadan garanti altına alınabilmektedir.



Şekil 5. Blokzincir kullanım alanları

Bu teknoloji aynı zamanda dijital işlemlerin güvenli bir biçimde kayıt altına alınmasını sağlayan bir altyapı sunar. Veriler, “blok” adı verilen yapılarda saklanmakta olup, Şekil 6’da görüldüğü üzere bu bloklar şifrelenerek birbirine bağlanır. Bu yöntemle oluşturulan zincirde herhangi bir değişiklik yapılmak istendiğinde zincirin tamamı etkilenir; bu da sistemin bütünlüğünü korur.



Şekil 6. Temel blokzincir mimarisi

Bu çalışmada, tedarik zinciri süreçlerini optimize etmeyi amaçlayan blokzincir tabanlı bir MaaS mimarisi önerilmektedir. Söz konusu mimari, veri güvenliği, merkeziyetsizlik ve sistem izlenebilirliği gibi temel ilkelere dayalı olarak geliştirilmiştir. Tasarım aşamasında, blokzincirin veri akışını nasıl daha etkin hâle getirdiği ve paydaşlar arası güven ilişkisini nasıl pekiştirdiği üzerinde durulmuştur.

Çalışma için mevcut literatür araştırması yapılmış olup tedarik zinciri yapılarındaki güvenlik açıkları ortaya çıkmıştır (Kamble et al., 2019). Bu doğrultuda, blokzincir teknolojisinin üretim süreçlerine entegrasyonuna yönelik bir MaaS mimarisi tasarlanmış ve bu mimari, örnek bir üretim senaryosu üzerinden değerlendirilmiştir. Yöntemsel yaklaşım, mimari tasarım, sistem katmanlarının belirlenmesi, işlevlerin tanımlanması, senaryolaştırma ve süreçlerin görselleştirilmesi adımlarını kapsamaktadır. Metodoloji aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır.

İlk aşamada, hizmet olarak üretim modelini destekleyecek şekilde bir blokzincir tabanlı mimari kurgulanmıştır. Mimari yapı, Endüstri 4.0'ın gereksinimlerine uygun olarak; merkeziyetsizlik, veri güvenliği, işlem şeffaflığı ve otomasyon ilkeleri temel alınarak geliştirilmiştir.

İkinci aşamada, mimari sisteminin bileşenlerini işlevsel olarak ayırmak üzere Platform, Uygulama, Blokzincir ve Kaynak katmanı olmak üzere dört ana katman altında yapılandırılmıştır.

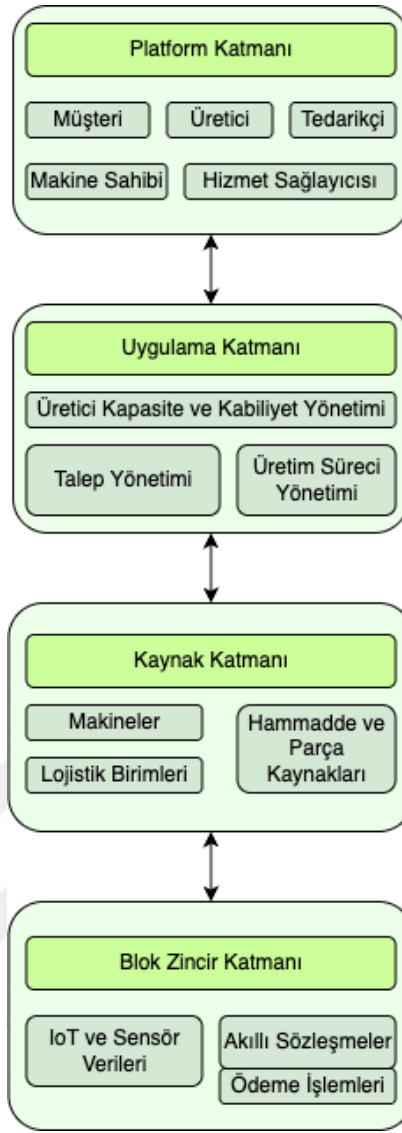
Üçüncü aşamada, her bir katmanın işlevsel görevleri detaylandırılmış ve sistem içindeki veri akışları analiz edilmiştir. Üst ve alt katmanlar arasında bilgi alışverişi, akıllı sözleşme tetikleme, sensör verisi toplama ve işlem doğrulama gibi ilişkiler modellenmiştir.

Dördüncü aşamada, tasarlanan mimarinin uygulanabilirliğini göstermek amacıyla örnek bir üretim senaryosu oluşturulmuştur. Bu senaryoda, müşteri tarafından platform üzerinden buzdolabı üretimi için bir talep oluşturulmuş; sistem bu talebi alt görevlere bölerek uygun üretici ve tedarikçiler sunulmuş, kullanıcı seçimlerinden bir servis oluşturulmuştur. Üretim süreci boyunca IoT sensörleri üzerinden alınan veriler blokzincir ağına kaydedilmiş ve tüm işlem adımları akıllı sözleşmeler aracılığıyla yürütülmüştür.

Son aşamadaysa, geliştirilen akış diyagramı ve uygulama senaryosu, sistematik bir mimari ile desteklenerek süreçlerin bütüncül biçimde sunulması sağlanmıştır. Bu görselleştirme sayesinde, talep oluşturulmasından ürün teslimine kadar olan tüm adımların nasıl işlediği açık bir şekilde ortaya konmuştur.

Blokzincir Tabanlı MaaS Metodoloji Geliştirme

Blokzincir tabanlı mimariyi oluşturmak için temel metodoloji mimarisi oluşturulmuş olup açıklamalarıyla verilmiştir. Şekil 7’de sunulan bu mimari, sunulan mimarinin katmanlı yapısını ortaya koymaktadır. Platform, uygulama, kaynak ve blok zincir olmak üzere dört temel katmandan oluşan yapı; her bir katmanda farklı işlevsel bileşenleri ve paydaş rollerini tanımlamaktadır. Katmanlar arasında yukarıdan aşağıya yönelen bilgi ve işlem akışı, sistemin bütüncül bir yapıda çalışmasını sağlamaktadır.



Şekil 7. Blokzincir tabanlı MaaS metodoloji mimarisi

Platform katmanı

Platform katmanı, tüm ekosistemin kullanıcı ile ilk temasını sağlayan ve sistemin yüzü olarak görev yapan bileşendir. Bu katman, farklı roller üstlenen tüm paydaşların (üretici, tedarikçi, müşteri, lojistik sağlayıcı, kalite kontrol birimi ve denetleyici kurumlar) sistemle dijital olarak etkileşime geçtiği giriş noktasıdır. Dolayısıyla platform katmanı, yalnızca bir kullanıcı arayüzü değil, aynı zamanda güvenlik, erişim yönetimi ve kullanıcı deneyimi açısından kritik bir bileşen olarak değerlendirilir.

Bu yapı, klasik kullanıcı adı-şifre sistemlerine kıyasla çok daha güvenli bir doğrulama mekanizması sunar ve aynı zamanda işlem takibini de şeffaflaştırır. Kimlik doğrulama süreci sırasında kullanıcı oturumları oluşturulur, bu oturumlar akıllı sözleşmelerle etkileşim kuracak olan blokzincir istemcileriyle ilişkilendirilir.

Platform katmanı üzerinde geliştirilen kullanıcı arayüzleri, paydaşların farklı işlevleri yerine getirebileceği modüller şeklinde yapılandırılmıştır. Müşteriler: Üretim talebi oluşturabilir, teklifleri görebilir, teslimat süreçlerini izleyebilir. Üreticiler ve tedarikçiler: Mevcut kapasite ve kaynak bilgilerini güncelleyebilir, gelen taleplere teklif verebilir. Lojistik sağlayıcılar: Ürün sevkiyat sürecini takip edebilir ve teslimat bildirimlerini gerçekleştirebilir. Denetleyici kurumlar: Süreçlere dışarıdan erişim sağlayarak sistem şeffaflığını ve regülasyonlara uyumu kontrol edebilir.

Bu arayüzler, web tabanlı paneller, mobil uygulamalar veya API destekli servisler biçiminde sunulabilir. Arayüzlerde kullanıcıların, geçmiş işlemleri görebilmesi, güncel sözleşme durumlarını takip edebilmesi, yeni işlem başlatabilmesi ve sistem içindeki rolüne uygun görevleri yerine getirebilmesi için çok katmanlı erişim kontrol mekanizmaları uygulanır.

Gelişmiş platform katmanlarında kullanıcı deneyimini artırmak adına gerçek zamanlı bildirim altyapıları, sürükle-bırak tabanlı üretim konfigüratörleri, dinamik grafik raporlama araçları ve doğal dil işleme tabanlı sohbet robotları (chatbot) gibi yardımcı bileşenler de sistem mimarisine entegre edilebilir. Bu tür özellikler, kullanıcıların sisteme olan bağlılığını artırmakta ve platformun kullanım verimliliğini desteklemektedir.

Bu katman, arka planda çalışan blokzincir altyapısı ve akıllı sözleşmeler ile doğrudan iletişim hâlinindedir. Kullanıcılar herhangi bir talep veya işlem gerçekleştirdiğinde, bu istekler platform katmanından uygulama katmanına iletilir; ardından ilgili akıllı sözleşmeler tetiklenerek blokzincir ağı üzerinde işlem kayıtları oluşturulur. Bu işlem zinciri, kullanıcıya minimum müdahale ile maksimum güvenlik ve şeffaflık sağlamak üzere tasarlanmıştır.

Sonuç olarak, platform katmanı; kullanıcı odaklılık, güvenlik, işlevsellik ve sistem entegrasyonunun kesişim noktasında yer almakta, blokzincir tabanlı üretim ekosisteminin sürdürülebilir ve erişilebilir bir biçimde işlemlerini mümkün kılmaktadır.

Uygulama katmanı

Uygulama katmanı, blokzincir tabanlı MaaS mimarisinde sistemin mantıksal beyni olarak konumlanmakta olup, platform katmanında başlatılan kullanıcı işlemlerini arka planda işleyerek iş akışlarını yöneten dijital bir denetim merkezidir. Bu katman, sistemin karar alma mekanizmalarını içerir; üretim taleplerinin işlenmesinden tedarikçilerin listelenmesine, kaynak uygunluklarının değerlendirilmesinden teslimat süreçlerinin takibine kadar tüm operasyonel süreçleri düzenli ve otomatik biçimde yönetir.

Kullanıcıların platform üzerinden sisteme ilettikleri üretim talepleri, uygulama katmanı tarafından analiz edilerek, ihtiyaç duyulan malzeme, parça, üretim süresi ve teknik özellikler

gibi unsurlar sistemde kayıtlı olan üretici ve tedarikçi profilleriyle sunulur. Bu süreçte, kaynakların anlık kullanılabilirliği, kapasite durumu, maliyet etkinliği ve teslimat süresi gibi parametreler dikkate alınarak karar verilir. Her üretim süreci, tanımlı iş akışları doğrultusunda yönlendirilir; talebin alınması, üretici seçilmesi, sözleşme onayı ve üretim başlatma gibi adımların her biri sistem içerisinde yapılandırılmış kurallar çerçevesinde gerçekleşir.

Uygulama katmanı, yalnızca verileri işlemekle kalmaz, aynı zamanda süreçleri otomatikleştiren ve yöneten yapay zekâ benzeri yetenekler de sunar. IoT cihazlarından gelen verileri analiz ederek üretim sürecindeki anomalileri tespit edebilir, örneğin belirli bir üretim hattında yaşanan gecikme, arıza veya kalite düşüşü gibi durumları öngörebilir. Bu doğrultuda, sistem içerisinde otomatik uyarı mekanizmaları devreye girer ve ilgili paydaşlara bildirim gönderilir. Bu yapı, yalnızca sistemin pasif bir kontrol katmanı değil, aktif bir izleme ve karar destek mekanizması olarak da çalışmasını sağlar.

Blokzincir ile doğrudan entegre çalışan uygulama katmanı, belirli koşullar gerçekleştiğinde akıllı sözleşmeleri otomatik olarak tetikler. Bu sözleşmeler; tedarikçilerin seçimi, üretimin başlatılması, ürünün teslim edilmesi, ödemenin gerçekleştirilmesi gibi işlemlerde merkezi müdahale olmaksızın işlem başlatır. Tüm bu işlemler blokzincire kaydedildiğinden dolayı sistemin her adımı izlenebilir, doğrulanabilir ve şeffaf bir şekilde arşivlenmiş olur.

Veri yönetimi açısından uygulama katmanı, sistemde oluşan bilgi yoğunluğunu analiz eder ve blokzincire aktarılabilecek verileri optimize eder. Sadece anlamlı, güvenlik açısından kritik ya da karar süreçlerine etki eden veriler blokzincire yazılır. Bu yaklaşım hem performansı artırır hem de blokzincir yapısının gereksiz büyümesini önler. Böylece sistem, yüksek hacimli verilerin bulunduğu üretim ortamlarında da verimli çalışabilir.

Uygulama katmanı; üretim süreçlerinin her aşamasını denetleyen, iş akışlarını yöneten, kararları otomatikleştiren ve blokzincir yapısını sistemin geri kalan unsurlarıyla entegre eden merkezi bir beyin gibi işlev görmektedir. MaaS yapısının sürdürülebilirliği, ölçeklenebilirliği ve güvenilirliği açısından bu katmanın işlevselliği belirleyici rol oynamaktadır.

Kaynak katmanı

Kaynak katmanı, blokzincir tabanlı MaaS mimarisinde fiziksel üretim altyapısıyla dijital sistem bileşenleri arasında arayüz oluşturan temel katmandır. Sistem mimarisinin en alt seviyesinde konumlanan bu katman, üretim ortamında yer alan tüm fiziksel kaynakların dijital temsillerini içeren yapıyı ifade eder. Makineler, üretim hatları, robotik hücreler, depolama alanları, enerji altyapısı, ham madde stokları ve insan kaynakları gibi üretim sürecinde rol

oyunayan tüm unsurlar bu katman aracılığıyla dijital platforma entegre edilir. Söz konusu kaynaklar, yalnızca varlık olarak değil, aynı zamanda operasyonel kapasiteleri, anlık durumları ve çalışma verimlilikleri ile birlikte sistemde temsil edilir. Böylelikle uygulama ve blokzincir katmanları, fiziksel gerçekliğe dayalı doğru ve güncel verilerle beslenir.

Bu katman, fiziksel üretim süreçlerinin dijital izlenebilirliğini sağlamak amacıyla çeşitli teknolojilerle donatılmıştır. Özellikle IoT cihazları sayesinde üretim makineleri ve yardımcı sistemler, sürekli olarak veri üretir ve bu veriler sensörler aracılığıyla merkezi sisteme iletilir. Örneğin bir CNC tezgâhının sıcaklık, titreşim, motor yükü veya üretim hızı gibi parametreleri IoT sensörleri tarafından ölçülerek sistemde anlık olarak kaydedilir. Bu bilgiler hem üretim sürecinin optimizasyonu hem de arıza öncesi kestirimci bakım planlaması açısından kritik önem taşır ayrıca, üretim tesislerindeki SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) sistemleri ile makine düzeyinde denetim ve kontrol sağlanırken, kurumsal kaynak planlama (ERP) yazılımları sayesinde üretim planları, sipariş yönetimi, envanter durumu ve insan kaynakları gibi üst düzey bilgiler sistemle bütünleştirilir.

Kaynak katmanının sunduğu en büyük katkılardan biri, fiziksel üretim ortamındaki olayların sistem tarafından gerçek zamanlı biçimde algılanarak karar alma süreçlerine entegre edilmesidir. Örneğin belirli bir üretim hattında arıza meydana geldiğinde ya da makine kapasitesi dolduğunda bu bilgi uygulama katmanına anlık olarak iletilir ve sistem, alternatif kaynaklara yönelerek üretim sürekliliğini sağlar. Böylelikle, üretim süreci dinamik olarak yeniden yapılandırılabilir ve verimlilik artışı sağlanır. Bu özellik, esnek üretim sistemlerinin temel gereksinimlerinden biri olan "duruma göre yeniden konfigürasyon" kabiliyetini destekler.

Kaynak katmanı, yalnızca üretimin veri sağlayıcısı değil, aynı zamanda blokzincir sistemine katkı sunan önemli bir bileşendir. Bu katmanda üretilen ve toplanan tüm veriler, güvenlik ve bütünlük açısından kritik olanlar başta olmak üzere, blokzincir katmanına iletilir ve burada değiştirilemez kayıtlar hâline getirilir. Örneğin bir üretim partisine ait kalite kontrol sonucu, ölçüm verileri veya teslimat tarihi gibi bilgiler blokzincire kaydedildiğinde, sistemde hem şeffaflık sağlanmış olur hem de denetlenebilirlik artırılır. Bu yaklaşım, ürün yaşam döngüsü yönetimi açısından da büyük avantajlar sunar; ürünün ilk talep anından müşteri teslimine kadar geçen tüm aşamalar güvenli ve izlenebilir biçimde arşivlenmiş olur.

Kaynak katmanı; üretim süreçlerinin dijital dünyayla bütünleşmesini sağlayan, veri akışını başlatan ve sistemin tüm karar mekanizmalarını sahadaki gerçekliklerle besleyen stratejik bir bileşen olarak çalışmaktadır. Blokzincir destekli MaaS mimarisinde bu katman, yalnızca sistemin temeli değil aynı zamanda tüm katmanların işlevselliğini besleyen veri omurgası konumundadır.

Bu dört katmanlı mimari yapı, blokzincir tabanlı MaaS sisteminin bütünsel ve uyumlu bir şekilde çalışmasını sağlayacak şekilde kurgulanmıştır. Platform katmanı, tüm paydaşların sisteme eriştiği ve dijital etkileşimlerin başlatıldığı ilk temas noktası olarak görev yapar. Bu katman üzerinden gelen kullanıcı talepleri, uygulama katmanı tarafından işlenir, anlamlandırılır ve sistemin iş mantığına göre yönlendirilir. Uygulama katmanı, kullanıcı taleplerini analiz ederek gerekli üretim süreçlerini tanımlar, kaynaklara uygun görevleri belirler ve blokzincir katmanında çalışan akıllı sözleşmeleri tetikleyerek işlemlerin otomatik olarak yürütülmesini sağlar. Blokzincir katmanı, tüm bu işlemleri güvenli, şeffaf ve değiştirilemez şekilde kaydederken, aynı zamanda taraflar arası güven gereksinimini ortadan kaldırarak sistemin bütünlüğünü korur. Bu süreçte sistemin beslendiği en önemli bileşen ise kaynak katmanıdır; çünkü bu katmanda yer alan fiziksel üretim altyapısı, sensörler ve makineler aracılığıyla elde edilen veriler, sistemin geri kalan katmanlarına gerçek zamanlı bilgi akışı sağlar. Böylece, kullanıcı taleplerinden üretim sürecine, denetimden teslimata kadar tüm aşamalar, katmanlar arası entegrasyonla yönetilmekte ve blokzincir teknolojisinin sunduğu güvenlik ve izlenebilirlik özellikleriyle desteklenmektedir.

Blokzincir katmanı

Blokzincir Katmanı, sistemin dijital güvenlik omurgasını oluşturan ve tüm işlemlerin şeffaf, değiştirilemez ve merkeziyetsiz biçimde kaydedilmesini sağlayan temel bileşendir. Bu katman, dağıtık defter teknolojisi esasına dayanarak, sistemde gerçekleşen her işlemin tarafsız ve denetlenebilir biçimde kayıt altına alınmasını mümkün kılar. Üretim siparişlerinin alınması, tedarik zinciri boyunca parça hareketlerinin izlenmesi, teslimatların onaylanması, ödemelerin gerçekleştirilmesi gibi işlemlerin her biri bu katman tarafından zaman damgalı ve hash algoritmaları ile güvence altına alınmış bloklar şeklinde blokzincire eklenir.

Sistemde oluşan her blok, kendisinden önce gelen blokla kriptografik bir bağlantı kurarak zincirin bir halkasını oluşturur. Bu yapının temelinde yer alan hash işlevleri, herhangi bir bloktaki verinin en ufak bir şekilde değiştirilmesi hâlinde zincirin tamamının geçersizleşmesine neden olur. Bu durum, sistemin değiştirilemezliğini sağlayarak, blokzincir üzerindeki tüm kayıtların manipülasyona karşı dirençli olmasını garanti eder. Bloklar yalnızca veri saklama birimleri değil, aynı zamanda güvenlik zincirinin yapı taşlarıdır. Her yeni işlem, tüm ağ katılımcıları tarafından belirli bir konsensüs algoritması aracılığıyla doğrulanmadan blokzincire eklenemez. Bu doğrulama süreci, yalnızca işlemlerin geçerliliğini onaylamakla kalmaz, aynı zamanda sistemin merkeziyetsiz doğasını da güçlendirir.

Bu tez çalışmasında önerilen mimaride, enerji tüketimi, işlem hızı ve ağ güvenliği göz önüne alınarak PoS ve PoA gibi alternatif konsensüs mekanizmaları teorik olarak

değerlendirilmiştir. Bu algoritmalar sayesinde sistem, yüksek işlem güvenliği sağlarken aynı zamanda ölçeklenebilirliği ve işlem verimliliğini de koruyabilmektedir. Blok zincirin konsensüs tabanlı bu yapısı, taraflar arasında karşılıklı güvene gerek kalmaksızın iş birliğini mümkün kılar. Böylece sistem içerisindeki üretici, tedarikçi, müşteri ve diğer paydaşlar, merkezi bir denetleyici olmadan güvenli ve doğrulanabilir işlemler gerçekleştirebilir.

Bu katmanda çalışan akıllı sözleşmeler, tanımlı koşullar gerçekleştiğinde otomatik olarak çalışan dijital protokollerdir. Örneğin, bir üretim talebinin kabul edilmesiyle birlikte tedarikçiye otomatik bildirim gönderilmesi, ürün teslimatı tamamlandığında ödeme işleminin otomatik başlatılması veya üretim sürecinde oluşan bir hatanın sistem tarafından tespit edilerek ilgili taraflara bildirilmesi gibi işlemler, akıllı sözleşmeler tarafından yönetilir. İnsan müdahalesi gerektirmeksizin çalışan bu sözleşmeler, sistemin otomasyon düzeyini artırırken aynı zamanda taraflar arasında güvene dayalı olmayan bir etkileşim ortamı sağlar. Tüm akıllı sözleşmeler, sistem içinde gerçekleşen işlemlerin koşullarını kod düzeyinde tanımlar ve blok zincire kaydederek işlemlerin izlenebilirliğini sağlar.

Blokszincir Katmanı'nın en önemli katkılarından biri de sistemin denetlenebilirliğini artırmasıdır. Her işlem, sistemin tüm katılımcıları tarafından doğrulanabilir biçimde kayıt altına alındığı için hem iç denetim süreçleri hem de dış denetim mekanizmaları için saydam bir veri altyapısı oluşturulmuş olur. Bu durum, özellikle çok taraflı üretim süreçlerinin ve tedarik zinciri yönetiminin karmaşıklığını azaltırken, işlem geçmişine dair güvenilir bir kayıt sistemi oluşturulmasını sağlar. Tüm bu özellikleriyle blok zincir katmanı, önerilen MaaS mimarisinin hem teknik hem de organizasyonel güvenliğini teminat altına alarak sistemin bütünlüğünü ve sürdürülebilirliğini sağlar.

Kullanılan Geliştirme Araçları ve Test Ortamı

Bu tez çalışmasında, başlangıçta kullanım kolaylığı ve test süreçlerinin görüntülenebilirliği amacıyla Ethereum tabanlı platformlar tercih edilmiştir ancak günün sonunda kurumsal özel blokszincir uygulamaları için uygun olan izinli hyperledger fabric ile akıllı sözleşmelerin geliştirilmesi ve test edilmesinde çeşitli yazılım araçlarının kullanılması önerilmiştir.

Remix IDE

Başlangıçta akıllı sözleşmelerle ilgili ilk denemelerin gerçekleştirimi, derlenmesi ve test edilmesi süreçlerinde tarayıcı tabanlı bir geliştirme ortamı olan Remix IDE kullanılmıştır. Remix IDE, Ethereum ağı üzerinde çalışan akıllı sözleşmelerin geliştirilmesi için özel olarak tasarlanmış, kullanıcı dostu arayüze sahip bir IDE'dir. Geliştiriciye hem çevrimiçi hem de

çevrimdışı kullanım imkânı sunan bu platform, Solidity programlama dili için tam destek sağlamakta ve çeşitli eklentilerle birlikte modüler bir yapı sunmaktadır.

Sözleşmelerin yazımında Solidity 0.8.x sürümü tercih edilmiştir. Remix IDE'nin Solidity Compiler sekmesi aracılığıyla sözleşmeler derlenmiştir. Derlenen sözleşmelerin işlevsel doğruluğunu test etmek için Remix'in External Http Provider seçeneği üzerinden bir sanal test ortamı oluşturulmuştur. Bu ortam, Ethereum ağı üzerinde çalışan işlemlerin simülasyonunu sağlar ve geliştiriciye çeşitli hesaplar, önceden tanımlanmış ETH bakiyeleri ve gaz değerleri üzerinden işlemleri test etme imkânı sunar. Her bir sözleşme fonksiyonu, bu test ağında tek tek çalıştırılmıştır.

Sonuç olarak Remix IDE, bu çalışma kapsamında geliştirilen akıllı sözleşmelerin hem geliştirme hem de test aşamalarında etkin bir biçimde kullanılmış; kavramsal düzeyde geliştirilen mimarinin işlevsel bileşenlerinin blok zincir ortamında nasıl davranacağı test senaryoları aracılığıyla simüle edilmiştir.

Ganache

Akıllı sözleşme geliştirme sürecinde, işlemlerin güvenli ve hızlı biçimde test edilmesi amacıyla Ganache adlı özel bir test ağı ortamı kullanılmıştır. Ganache, Truffle Suite tarafından geliştirilen ve yerel bir Ethereum blok zinciri simülasyonu sunan açık kaynaklı bir araçtır. Bu test ağı, geliştiricilere anında blok üretimi, işlem doğrulama ve sözleşme konuşlandırma gibi işlemleri çevrimdışı olarak gerçekleştirme imkânı tanımaktadır. Gerçek Ethereum ağına kıyasla daha hızlı ve maliyetsiz bir test ortamı sunduğu için, sözleşmelerin davranışlarını detaylı biçimde analiz etmek ve olası hataları erken aşamada tespit etmek açısından oldukça verimli bir araçtır.

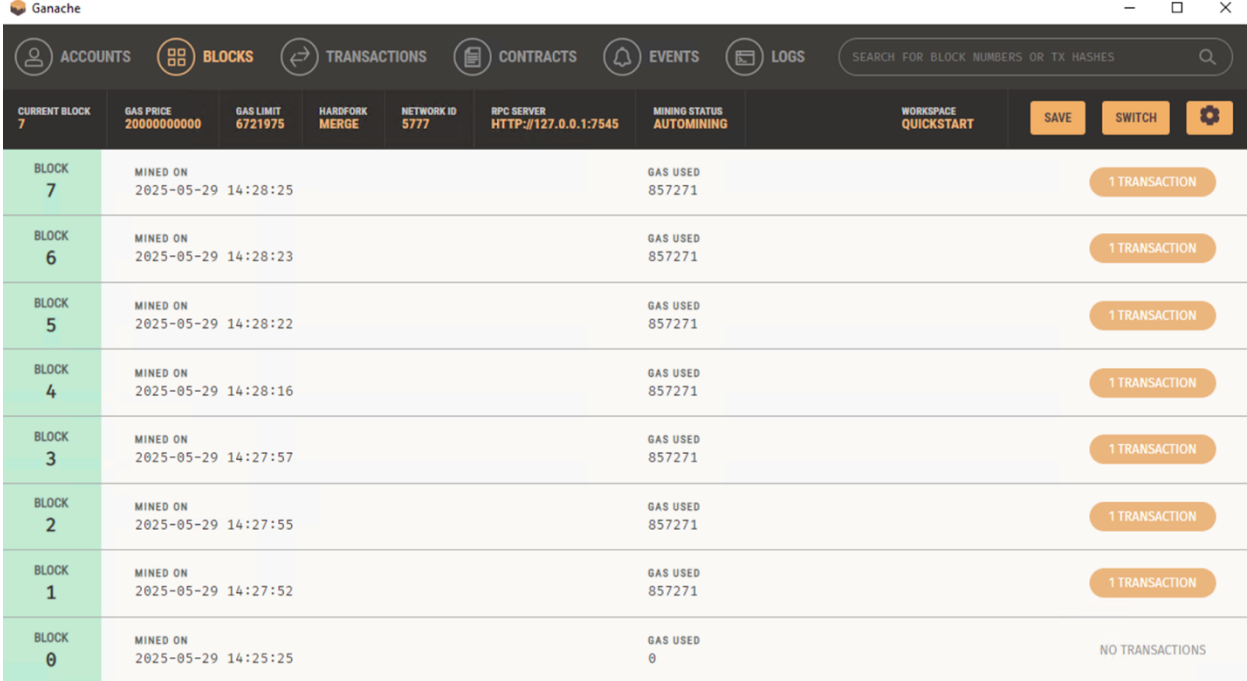
Ganache kullanılarak oluşturulan yerel ağda, varsayılan olarak on adet önceden yapılandırılmış test hesabı ve her biri için belirli miktarda test Ether tanımlanmıştır. Bu hesaplar, sözleşme fonksiyonlarının farklı roller üzerinden test edilmesini ve sistemdeki kullanıcı türlerinin (örneğin müşteri, üretici, tedarikçi) temsili olarak davranışlarının modellenmesini mümkün kılmıştır ayrıca test işlemlerinde her bir fonksiyon çağrısına karşılık gelen gaz (gas) tüketimi de gözlemlenmiş ve sistemin işlem verimliliği analiz edilmiştir.

Ganache'ın sunduğu blok geçmişi (block history) ve olay günlükleri (event logs) özellikleri sayesinde, her bir işlemin blok zinciri üzerindeki etkileri ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Özellikle, fonksiyon çağrıları sonucunda sözleşme durum değişkenlerinin nasıl güncellendiği, hangi koşullarda tetiklendiği ve hangi hesaplar tarafından etkileşimde bulunduğu ayrıştırılmıştır. Akıllı sözleşmenin doğru şekilde çalışıp çalışmadığı, beklenen

çıktıyı verip vermediği bu veriler üzerinden kontrol edilmiştir. Bu süreç hem iş mantığının doğrulanmasını sağlamış hem de sistemin davranışını görselleştirerek ilerleyen aşamalarda gerçekleştirilecek mimari değerlendirmeye veri tabanı oluşturmuştur.

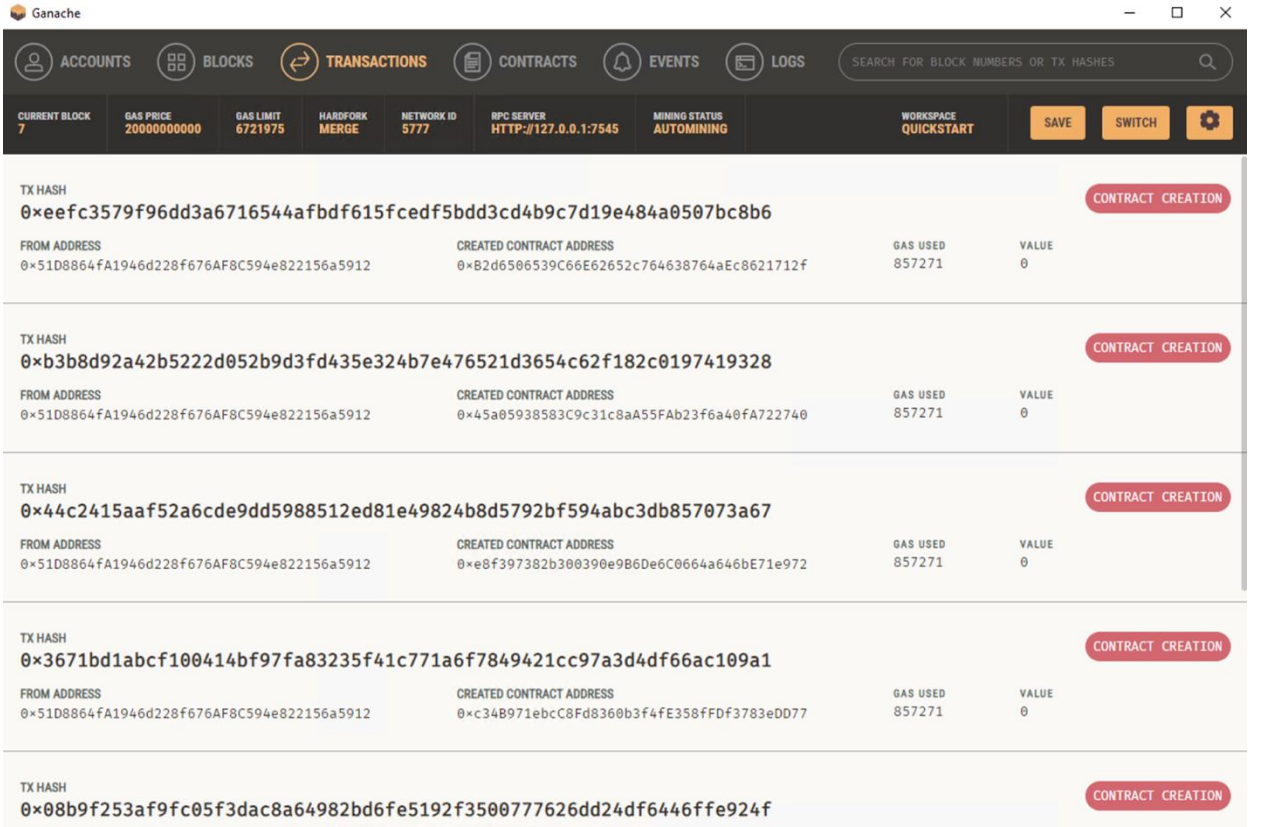
Sonuç olarak, Ganache ortamı sayesinde geliştirilmiş olan akıllı sözleşmeler, gerçek Ethereum ağında karşılaşılabilecek işlem gecikmeleri, yüksek gaz ücretleri ve hata geri dönüşlerinin dışında, kontrollü bir ortamda test edilerek doğrulanmıştır. Bu sayede sistemin temel işlevselliği başarıyla simüle edilmiş ve sonraki entegrasyon süreçleri için sağlam bir teknik temel oluşturulmuştur.

Aşağıda şekil 8 ve şekil 9 da bu platformdan görseller mevcuttur. Bu görseller de oluşan bloklar, hash kodları, tüketilen “gas” miktarları ve log kayıtları görüntülenmektedir.



CURRENT BLOCK	GAS PRICE	GAS LIMIT	HARDFORK	NETWORK ID	RPC SERVER	MINING STATUS	WORKSPACE	SAVE	SWITCH	SETTINGS
7	2000000000	6721975	MERGE	5777	HTTP://127.0.0.1:7545	AUTOMINING	QUICKSTART			
BLOCK 7	MINED ON 2025-05-29 14:28:25					GAS USED 857271				1 TRANSACTION
BLOCK 6	MINED ON 2025-05-29 14:28:23					GAS USED 857271				1 TRANSACTION
BLOCK 5	MINED ON 2025-05-29 14:28:22					GAS USED 857271				1 TRANSACTION
BLOCK 4	MINED ON 2025-05-29 14:28:16					GAS USED 857271				1 TRANSACTION
BLOCK 3	MINED ON 2025-05-29 14:27:57					GAS USED 857271				1 TRANSACTION
BLOCK 2	MINED ON 2025-05-29 14:27:55					GAS USED 857271				1 TRANSACTION
BLOCK 1	MINED ON 2025-05-29 14:27:52					GAS USED 857271				1 TRANSACTION
BLOCK 0	MINED ON 2025-05-29 14:25:25					GAS USED 0				NO TRANSACTIONS

Şekil 8. Ganache programı ile akıllı sözleşme kod bloklarını görüntüleme



Şekil 9. Ganache programı ile akıllı sözleşme kod blokları hash kodlarını görüntüleme

Solidity

Bu çalışmada, test aşamalarında geliştirilen akıllı sözleşmeler, Ethereum ağı üzerinde çalışmak üzere özel olarak tasarlanmış bir programlama dili olan Solidity kullanılarak kodlanmıştır. Solidity; tip güvenliği sağlayan, nesne yönelimli yapıya sahip, statik tür tanımlamalı ve JavaScript benzeri söz dizimine sahip bir üst düzey programlama dilidir. EVM üzerinde çalışacak sözleşmeleri tanımlamak ve yönetmek amacıyla geliştirilmiş olan bu dil, geliştiricilere koşullu ifadeler, döngüler, olaylar (events), fonksiyonlar ve kullanıcı tanımlı veri yapıları gibi modern yazılım bileşenlerini blok zincir ortamında kullanma imkânı sunar.

Solidity ile oluşturulan sözleşmeler, iş kurallarının dijital biçimde tanımlanmasını ve belirli koşullar sağlandığında bu kuralların otomatik biçimde yürütülmesini sağlar. Bu sözleşmeler aracılığıyla; kullanıcı doğrulama, sipariş oluşturma, kaynak eşleştirme, ödeme işlemleri ve üretim süreci kayıtları gibi temel işlevler blok zincir üzerinde güvenli ve değiştirilemez biçimde gerçekleştirilmiştir. Programlama sürecinde dikkat edilen en önemli unsurlar arasında, veri tutarlılığı, fonksiyon erişim kontrolü, işlem maliyetlerini azaltmak için gaz optimizasyonu ve sözleşme içi hata yönetimi yer almıştır.

Sözleşme geliştirme süreci yalnızca kodlamayla sınırlı kalmamış; sözleşmelerin derlenmesi, test edilmesi ve dağıtımı Remix IDE ve Ganache gibi araçlarla entegre biçimde yürütülmüştür. Remix IDE üzerinde kodlama ve derleme aşamaları gerçekleştirilirken,

Ganache ile oluşturulan yerel Ethereum test ağı üzerinde senaryolara dayalı testler uygulanmıştır. Her bir sözleşme fonksiyonu, farklı kullanıcı rolleri tanımlanarak test edilmiş; fonksiyonların hangi koşullarda tetiklendiği, hangi olayları yaydığı ve sistemde hangi veri değişimlerine yol açtığı detaylı biçimde gözlemlenmiştir.

Sözleşmelerin davranışları hem başarılı işlemler hem de sınır durumlar (örneğin hatalı veri girişi, yetkisiz erişim girişimleri) için test edilerek kapsamlı bir doğrulama süreci izlenmiştir. Bu süreç, sözleşmelerin yalnızca teorik olarak değil, pratikte de sistem mimarisiyle uyumlu ve güvenli biçimde çalıştığını kanıtlamak amacıyla yürütülmüştür. Solidity ile geliştirilen bu akıllı sözleşmeler, blok zincir tabanlı MaaS platformunun çekirdek işlevlerini yöneten dijital protokoller olarak sistemin bütünlüğünü sağlamada kritik rol üstlenmiştir.

Hyperledger Fabric

Bu çalışmada önerilen blokzincir tabanlı MaaS mimarisi için, izinli ağ yapısına sahip olması, kurumsal düzeyde özelleştirilebilir bileşenler sunması ve veri gizliliğine olanak tanınması nedeniyle Hyperledger Fabric altyapısı tercih edilmiştir. Geliştirilen sistem modelinde, farklı üreticilerin, tedarikçilerin ve müşterilerin güvenli bir şekilde etkileşimde bulunabilmesi amaçlandığından, izinli bir blokzincir platformu kullanılması zorunlu hale gelmiştir. Hyperledger Fabric, bu gereksinimleri karşılayabilecek şekilde, kimlik temelli erişim kontrolü, çoklu kanal yönetimi ve özelleştirilebilir konsensüs mekanizmaları sunar (Y. Liu et al., 2025)

Ethereum gibi halka açık platformlar, daha çok şeffaflık ve topluluk temelli uygulamalara yönelik olarak geliştirilmiş olup, kripto para mantığına dayalı çalışma prensibi, üretim sistemleri gibi kurumsal yapılarda veri gizliliği ve performans açısından sınırlılıklar oluşturabilmektedir. Oysa Fabric, modüler mimarisi sayesinde her bileşenin (konsensüs algoritması, üyelik yönetimi, akıllı sözleşme mantığı vb.) özelleştirilebildiği bir yapı sunar. Bu yapı içerisinde Solidity yerine Go veya JavaScript gibi geleneksel programlama dilleri kullanılarak chaincode adı verilen akıllı sözleşmeler geliştirilmektedir. Böylece platform, sadece blokzincir altyapısı değil; aynı zamanda sistem mimarisi açısından da iş kurallarının hassasiyetle uygulanabileceği bir altyapı sağlar (Thakkar et al., 2018).

Hyperledger Fabric'in önerilen sistem içinde kullanılabilirliği; çoklu kanal yapısı sayesinde her üretici-tedarikçi grubu arasında izole veri paylaşımı yapılabilmesine ve özel veri koleksiyonu yoluyla sadece yetkilendirilmiş tarafların ilgili işlemleri görebilmesine olanak tanımaktadır. Bu, özellikle endüstriyel üretim senaryolarında hassas verilerin kontrolünü ve ticari gizliliğin korunmasını mümkün kılmaktadır. Fabric'in "execute-order-validate" işlem modeli, önce işlemlerin çalıştırılıp ardından konsensüse dahil edilmesini sağlaması,

Ethereum'un klasik "order-execute" modeline göre daha yüksek işlem hacmi(throughput) ve düşük gecikme süresi sunar (Zheng et al., 2017a) .

Bu tezde kullanılan test ortamı, doğrudan Fabric üzerinde gerçekleştirilmemiş olsa da model önerisi Hyperledger Fabric'e dayandırılmış, sistem bileşenleri bu mimariye uygun olarak yapılandırılmıştır. Geliştirilen sistemin sonraki aşamalarda Fabric altyapısıyla entegre edilmesi planlanmakta ve bu entegrasyonun uygulanabilirliği, senaryo bazlı sistem tasarımıyla ortaya konulmaktadır.

Simülasyon ortamı ve test süreci

Geliştirilen blok zincir tabanlı mimarinin işleyişini değerlendirmek amacıyla, Remix IDE ile yerel blok zincir ağı arasında bağlantı kurulmuş ve akıllı sözleşmeler üzerinde işlevsellik testleri gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte Remix IDE'nin "Custom – External HTTP Provider" bağlantı seçeneği kullanılarak, Ganache ile oluşturulan yerel Ethereum ağına bağlanılmıştır. Ganache, test Ether'leri, zaman damgalı blok üretimi, özel hesaplar ve işlem kayıtları gibi blok zincir bileşenlerini içeren yapılandırılabilir bir simülasyon ortamı sunmaktadır.

Sözleşmeler, Remix IDE üzerinde derlendikten sonra Ganache ağına dağıtılmış; belirlenen senaryolar doğrultusunda çeşitli kullanıcı rolleriyle etkileşim sağlanmıştır. Özellikle sipariş oluşturma, üretici ve tedarikçi eşleştirme, teslimat onayı ve ödeme onayı gibi süreçlerde, her bir akıllı sözleşme fonksiyonunun ne şekilde çalıştığı detaylı biçimde gözlemlenmiştir. Ganache arayüzü üzerinden her işlem sonrasında oluşan bloklar, transaction hash'leri, olay (event) log'ları ve durum değişiklikleri analiz edilmiştir.

Bu yapı sayesinde sözleşme mantığı, işlem sıralamaları, veri bütünlüğü ve olay tetikleyicilerinin davranışı senaryo temelli olarak test edilmiş; blok zincir tabanlı mimarinin bütünsel işleyişi doğrulanmıştır. Yapılan testler, önerilen sistemin hem iş kurallarına uygun hem de teknik olarak sağlam bir şekilde çalıştığını ortaya koymuş; ileri düzey uygulamalara geçiş için güvenli bir temel oluşturmuştur.

Bu çalışmada önerilen blokzincir tabanlı mimarinin işlevselliğini değerlendirebilmek amacıyla bir test ortamı oluşturulmuş ve sistemin işleyişi çeşitli senaryolar doğrultusunda simüle edilmiştir. Test süreci, öncelikle Ethereum altyapısına dayalı geliştirme araçları kullanılarak gerçekleştirilmiş, ardından önerilen mimariyle uyumlu alternatif bir yapı olarak Hyperledger Fabric mimarisi ele alınmıştır.

Ethereum tabanlı geliştirme ve test ortamı

İlk aşamada, akıllı sözleşmelerin geliştirilmesi için Ethereum uyumlu Solidity programlama dili ve Remix IDE kullanılmıştır. Remix IDE, kullanıcı dostu arayüzü sayesinde sözleşmelerin yazılması, derlenmesi ve test edilmesi için uygun bir geliştirme ortamı sunmaktadır. Geliştirilen akıllı sözleşmeler, Custom-External HTTP Provider seçeneği aracılığıyla Ganache ile entegre edilen yerel Ethereum ağına dağıtılmıştır.

Ganache, özel blokzincir ağı üzerinde çalışan, test Ether'leri, hesaplar, zaman damgalı bloklar ve işlem kayıtlarını içeren yapılandırılabilir bir simülasyon ortamı sağlar. Bu sayede, Ethereum ana ağına bağlanmadan, geliştirilen akıllı sözleşmelerin güvenli bir şekilde test edilmesi mümkün olmuştur. Gerçekleştirilen senaryolar kapsamında, sipariş oluşturma, üretici ve tedarikçi eşleştirme, teslimat onayı, ödeme onayı gibi adımlar her bir kullanıcı rolü üzerinden etkileşimli olarak gerçekleştirilmiştir.

Her işlem sonrası Ganache arayüzü üzerinden blok oluşumu, transaction hash değerleri, log olayları ve veri güncellemeleri detaylı biçimde analiz edilmiştir. Böylece sözleşmelerin fonksiyonel doğruluğu, tetikleme mekanizmaları ve işlem sıraları senaryo bazlı olarak test edilmiş ve sistemin önerilen iş kurallarına uygun şekilde çalıştığı doğrulanmıştır.

Kullanılması önerilen yapı: Hyperledger Fabric test ortamı

Bu çalışmada önerilen mimarinin esasen kurumsal, çok paydaşlı ve izne dayalı sistemler için daha uygun olan Hyperledger Fabric altyapısı üzerine inşa edilmesi hedeflenmiştir. Bu bağlamda, Hyperledger Fabric'in test sürecine entegrasyonu, uygulama ölçeklendirmesi ve güvenlik politikalarının ileri düzeyde tanımlanması açısından kritik öneme sahiptir (Melo et al., 2025).

Hyperledger Fabric, açık kaynak kodlu ve modüler yapısıyla dikkat çeken, izinli bir blokzincir platformudur. Bu yapı, farklı kuruluşlara ait düğümlerin ağda eş zamanlı olarak yer almasına, kimlik bazlı doğrulama mekanizmaları MSP kullanmasına ve işlem politikalarının rol bazlı tanımlanmasına olanak tanır. Bu özellikler, üretim sektöründe sıklıkla karşılaşılan veri gizliliği, erişim kontrolü ve süreç denetimi gibi gereksinimlere yanıt vermektedir.

Fabric tabanlı bir test ortamı oluşturulurken genellikle Docker konteynerleri ile sanallaştırılmış bir ağ kurulumu yapılır. Bu ağ bileşenleri şunları içerir: Orderer node (sıralama hizmeti), Peer node'lar (veri kaydı ve işlem yürütme), CA (kimlik ve sertifika yönetimi), CLI konteyneri (komut satırı işlemleri).

Test ortamının yapılandırılmasında tanımlayıcı dosyalar hazırlanarak, cryptogen ve configtxgen araçları ile ağın kuruluş adımları tamamlanır. Ardından ağ başlatılır ve örnek bir

akıllı sözleşme Go, JavaScript veya Java programlama dillerinden biri ile yazılarak peer lifecycle komutlarıyla ağı yüklenir.

Test senaryoları kapsamında, akıllı sözleşme ile ürün talebi oluşturma, iş emri başlatma, teslimat ve onay süreçlerini kaydetme gibi işlemler, komutlar üzerinden test edilerek simüle edilebilir. Bu süreçte, endorsement policy gibi politikalar sayesinde, belirli rollerin belirli işlemleri gerçekleştirme yetkileri net biçimde sınırlandırılır.

Bu test ortamı, önerilen sistemin gerçek bir üretim ortamına uygulanabilirliğini değerlendirmek açısından ileri düzey bir temel oluşturur. Özellikle işlemlerin zaman damgası ile kaydedilmesi, katılımcı kimliklerinin doğrulanması ve iş süreçlerinin izlenebilirliği, Hyperledger Fabric'in sunduğu özelliklerle daha güvenli ve denetlenebilir hale gelmektedir.

Genel değerlendirme

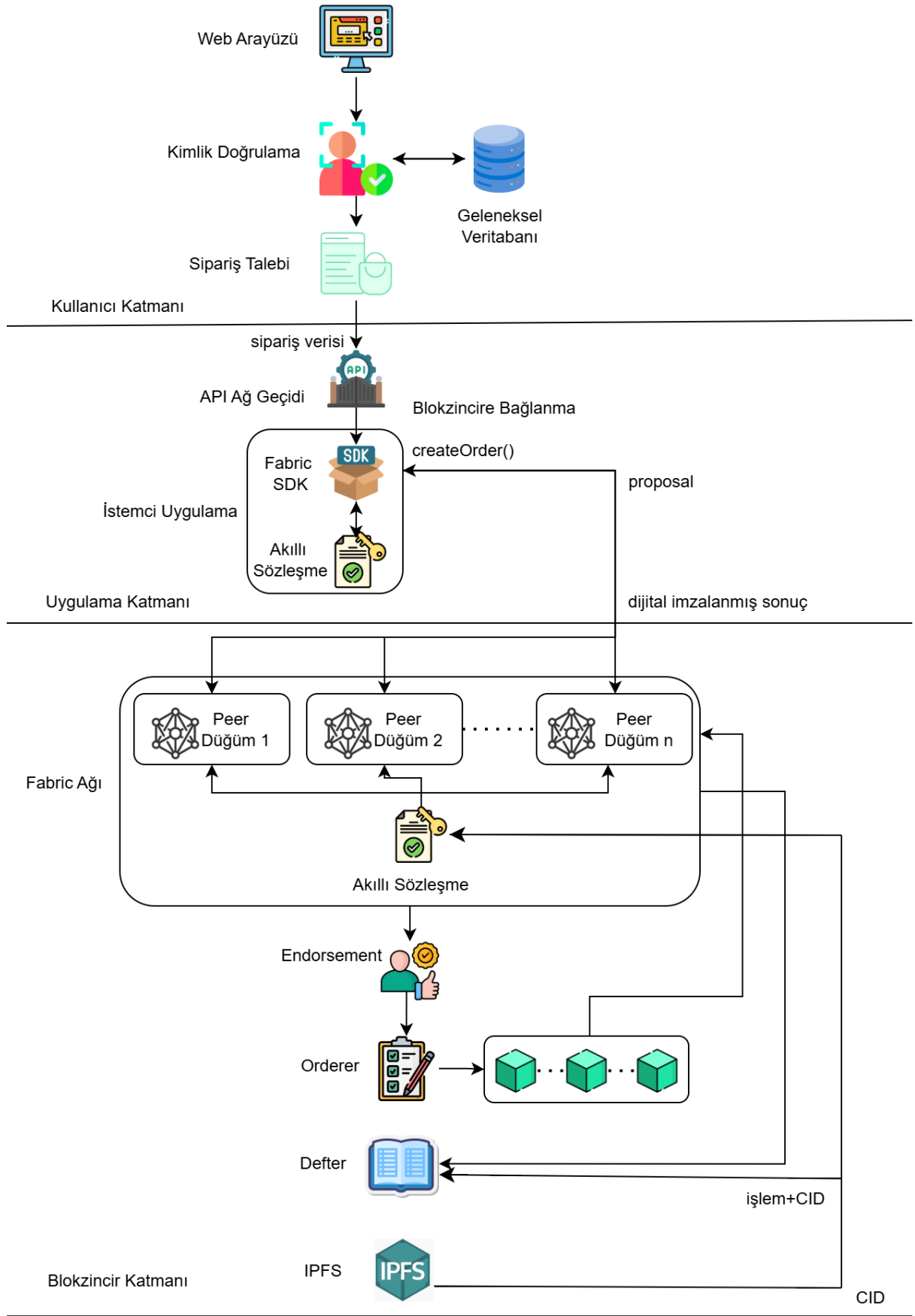
Ethereum tabanlı test süreci, sistem mantığının doğrulanması ve temel uygulama davranışlarının gözlemlenmesi açısından başarılı olmuştur ancak, önerilen sistemin sürdürülebilirliği, çok aktörlü üretim senaryolarındaki karmaşık iş ilişkileri, veri gizliliği ve erişim kontrolü gereksinimleri dikkate alındığında, Hyperledger Fabric mimarisinin daha uygun bir çözüm sunduğu değerlendirilmiştir. Bu nedenle, geliştirilen test ortamı Ethereum üzerinde yapılandırılmış olmakla birlikte, sistemin kurumsal ölçekte uygulanması açısından Hyperledger Fabric mimarisi kullanılması önerilmektedir.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, çalışmada önerilen blok zincir tabanlı üretim sistemi mimarisinin, tanımlanan kurgu ve senaryo doğrultusunda yapılan teknik testler sonucunda elde edilen bulgular kapsamlı bir biçimde sunulmaktadır. Geliştirilen modelin işlevselliği, sistem bileşenlerinin bütünlüğü, akıllı sözleşmelerin mantıksal doğruluğu, verilerin güvenli ve izlenebilir biçimde işlenebilirliği gibi temel unsurlar, uygulamalı olarak test edilmiştir. Yapılan testler, yalnızca sistemin teknik olarak çalışabilirliğini değil; aynı zamanda blok zincir mimarisinin üretim ekosistemleri için sağlayabileceği potansiyel katkıların analitik açıdan değerlendirilmesini de amaçlamaktadır. Bu kapsamda testler; veri bütünlüğü, işlem şeffaflığı, süreçlerin otomatik yönetimi ve insan müdahalesini azaltma kapasitesi gibi çeşitli boyutlarda ele alınmış ve sistemin hangi yönlerinin güçlü olduğu, hangi yönlerinin ise geliştirmeye açık kaldığı saptanmıştır.

Blokszincir Tabanlı MaaS Mimarisi

Şekil 11'de, blokszincir tabanlı MaaS mimarisi kapsamında Hyperledger Fabric ağı üzerinde bir sipariş sürecinin uçtan uca işleyişi şematik olarak sunulmaktadır. Kullanıcı arayüzü üzerinden başlatılan sipariş talebi, kimlik doğrulama ve veri tabanı kontrolünün ardından API ağ geçidi aracılığıyla blokszincir ağına iletilmektedir. Uygulama katmanında yer alan Fabric SDK, akıllı sözleşmeyi tetikleyerek ilgili işlemi Fabric ağına gönderir. Peer düğümleri tarafından onaylanan işlem, sıralayıcı aracılığıyla bloklara eklenir ve deftere kaydedilir. Bu yapı, sürecin hem şeffaf hem de değiştirilemez biçimde yürütülmesini sağlar.



Şekil 10. Blokzincir Tabanlı MaaS Mimarisi

Kullanıcı katmanı

Bu katman, sistemle etkileşime giren son kullanıcıyı temsil eder. Web arayüzü üzerinden sipariş talebi yapılır.

Web Arayüzü: Kullanıcı, kullanıcı adı-şifre ile web uygulamasına erişir. Üretim siparişi talebi, tedarikçi ve üretici kapasite ve kabiliyet bilgilerinin sisteme girişi bu arayüz üzerinden yapılır.

Kimlik Doğrulama: Kullanıcı, sisteme giriş yapar. Bu süreç sistemin geleneksel veritabanının kullanıcı yönetimi tarafından yönetilir. Blokzincir üzerinde işlem yapılacağı zaman, bu kullanıcıya ait dijital kimlik (önceden Fabric CA tarafından verilmiş sertifika) kullanılarak işlem imzalanır ve MSP tarafından doğrulanır. İstemci uygulama, kullanıcının kimliğiyle imzalanmış işlemi Fabric ağına gönderir. Kimlik doğrulaması başarılı olan kullanıcı, sipariş talebi formuna yönlendirilir.

Sipariş Talebi: Doğrulanmış kullanıcı, sistem üzerinden üretimle ilgili sipariş bilgilerini girer. Sipariş verileri: ürün tipi, miktar, teslim tarihi, vb. özel gereksinimlerden oluşabilir.

Geleneksel Veritabanı: Kullanıcı bilgileri, oturum kayıtları ve siparişe ilişkin detaylar geleneksel bir veritabanında tutulur. Bu veriler sistem içinde analiz edilebilir ve işlem mantığı açısından anlamlandırılabilir. Yalnızca gerekli olan özet veriler (IPFS CID, sipariş özeti) blokzincire gönderilir. Böylece sistem hem esnek kalır hem de blockchain şişmesi önlenir.

Uygulama katmanı

Bu katman, kullanıcı isteklerini işler, akıllı sözleşmeyi çağırır ve blockchain ile etkileşimi yönetir.

API Ağ Geçidi: Kullanıcıdan gelen sipariş verilerini alır. Blockchain'e bağlantı sağlamak için uygun veri formatına dönüştürür.

Fabric SDK: Hyperledger Fabric ağı ile uygulama arasında köprü görevi görür. SDK, ilgili chaincode fonksiyonunu çağırır (örneğin: createOrder()).Fonksiyon çağırıldığında SDK, bu çağrıyı peer düğümlerine bir işlem teklifi (proposal) olarak gönderir.

Akıllı Sözleşme (Chaincode): Siparişe ilişkin kurallar burada tanımlıdır.

Blokszincir katmanı

Bu katman, DLT'nin aktif olduğu, verilerin zincire işlendiğı çekirdek sistemdir.

Peer Düğümler: Fabric ağı içindeki dağıtık düğümlerdir (kullanıcı, üretici, tedarikçi vs.). Her peer, akıllı sözleşmeyi çalıştırarak işlemi simüle eder. Peer'ler, sonucu dijital olarak imzalar ve SDK'ya gönderir.

Akıllı Sözleşme (Chaincode): Peer'lerin içinde çalışır. CreateOrder() fonksiyonu gibi akıllı sözleşme fonksiyonları peer bazlı onaylama (endorsement) işlemleri için çalıştırılır. Her peer bağımsız olarak çalışır ve işlem sonucunu imzalar.

Onaylama (Endorsement): Peer node'lar bu sonucu imzalar. Eğer ağıın “onay politikası” sağlanıyorsa işlem geçerli kabul edilir.

Sıralayıcı (Orderer): Peer'lerden gelen onaylanmış işlemleri alır. Bloklara sıralı şekilde yerleştirir. Blokları tüm peer düğümlerine dağıtarak zincirin tutarlılığını sağlar.

Defter (Ledger): Her peer, kendi yerel defterine yeni bloğu yazar. Bu defter; dünya durumu (state database) ve işlem geçmişini içerir. Siparişin kabul edildiğı, işlendiğı ve on-chain kayıt altına alındığı yer burasıdır.

IPFS: Büyük dosyalar (CAD verileri, üretim sertifikaları vb.) gibi veriler burada tutulur. Bu veri içeriğı için benzersiz kimlik CID (içerik tanımlayıcı-content identifier) üretilir. Blokszincirde bu CID ve diğere verilerin hash değereeri saklanır, içerik burada durur.

Çalışmanın kapsamı gereğı, uygulama akıllı sözleşmeler düzeyinde gerçekleştirilmiş olup, testler blok zincir altyapısının temel ilkeleri çerçevesinde yürütölmüştür. Dolayısıyla, sistemin kavramsal düzeydeki çalışabilirliğinin yanı sıra, blok zincir teknolojisinin çok paydaşlı, dinamik ve veri yoğun üretim sistemlerinde nasıl bir değere önerisi sunabileceğine dair de çıkarımlar yapılmıştır. Bulgular, elde edilen teknik ve teorik veriler doğrultusunda dört temel başlık altında sunulmaktadır: sistem işleyişine ilişkin bulgular, güvenlik ve şeffaflık düzeyine yönelik bulgular, süreç otomasyonu ve iş yükü azaltma etkileri, örnek işlem çıktılarının analizi. Her bir başlık altında, geliştirilen sistemin belirli bir yönü detaylı biçimde değerelendirilmiş ve hem kavramsal hem teknik düzeyde analiz edilmiştir.

Sistem İşleyişine İlişkin Bulgular

Senaryo testleri kapsamında gerçekleştirilen kurgu temelli analizler, önerilen blok zincir tabanlı üretim sistemi mimarisinin temel işleyiş mekanizmasının senaryo doğrultusunda tutarlı ve mantıksal olarak geçerli şekilde çalıştığını göstermektedir. Kurulan test senaryosunda, ilk aşamada sistemde bir müşteri tarafından üretim ihtiyacına ilişkin bir talep oluşturulduğı

varsayılmıştır. Bu talep; ürün grubu, üretim adedi, teslim süresi gibi kritik parametreleri içeren yapılandırılmış bir veri kümesi şeklinde modellenmiş ve sistemin akıllı sözleşmeleri aracılığıyla blok zincir ağına iletildiği kabul edilmiştir. Talebin sisteme girişinin ardından, blok zincir mekanizmasının devreye girerek bu talebi zaman damgalı ve değiştirilemez biçimde kaydettiği; böylece veri bütünlüğü ve işlemin doğrulanabilirliğinin sağlandığı varsayılmıştır. İşlemin, ağdaki tüm katılımcılar tarafından doğrulanarak bir blok içerisine eklendiği ve zincirin bir parçası hâline geldiği kabul edilmiştir.

Senaryonun ikinci aşamasında, sistemde daha önceden tanımlanmış olan tedarikçilere ait bilgiler (örneğin; tedarikçinin uzmanlaştığı üretim alanları, üretim kapasitesi, makine müsaitlik durumu, kalite sertifikaları ve geçmiş performans verileri) erişime açık haldededir. Kullanıcı bu bilgileri sistem arayüzü üzerinden inceleyerek kendi üretim gereksinimlerine en uygun kaynakları seçmiş; kullanıcı odaklı karar verme süreci benimsenmiştir. Kullanıcının yaptığı seçim doğrultusunda, sistemde üretim sürecine ilişkin bir servis bileşimi oluşturulmuş ve bu yapı blok zincir ağına kaydedilmiştir. Her bir servis sağlayıcının sistemdeki rolü, zincir üzerinde tanımlı akıllı sözleşmeler aracılığıyla izlenebilir ve doğrulanabilir şekilde belirlenmiştir.

Sürecin tamamı boyunca, sistemin genel işleyişinde herhangi bir mantık hatası, tutarsızlık veya senaryo ile çelişen bir durumla karşılaşmadığı gözlemlenmiştir. Özellikle farklı türde talepler, değişken sayıda tedarikçi profili ve çeşitli senaryo varyasyonları ile yapılan kurgusal analizlerde sistemin esnekliği değerlendirilmiş; sözleşmelerin farklı giriş verilerine karşılık uygun tepkiler verdiği ve işlem akışının kesintisiz sürdüğü teorik olarak değerlendirilmiştir. Üretim talebinin zincire yazılmasından itibaren uygun tedarikçinin atanmasına kadar olan tüm aşamaların senaryo doğrultusunda kararlı biçimde işlediği görülmüş; bu da mimarinin mantıksal düzeyde tutarlı çalıştığını ve gelecekte gerçekleştirilecek uygulamalara temel oluşturabilecek bir yapı sunduğunu göstermektedir. Bu bulgular, blok zincir temelli çözümlerin üretim sektörü gibi karmaşık ve çok paydaşlı sistemlerde süreç standardizasyonu ve karar verme mekanizmalarının otomasyonu açısından önemli bir potansiyele sahip olduğunu desteklemektedir.

Güvenlik ve Şeffaflık Bulguları

Blok zincir teknolojisinin sunduğu temel güvenlik prensipleri olan veri bütünlüğü, değiştirilemezlik ve şeffaflık, bu çalışma kapsamında geliştirilen kavramsal sistem mimarisi üzerinden senaryo temelli olarak değerlendirilmiştir. Kurgulanan teorik test senaryolarında, her işlemin blok zincir ağına eklendiği kabulü ile birlikte zaman damgalı ve geri alınamaz kayıtların oluştuğu varsayılmış; bu sayede işlemler arasında doğrusal ve izlenebilir bir yapının oluştuğu

öngörölmüştür. Her işlem kaydının önceki bloklarla kriptografik olarak bütünleştigi ve zincirin bir parçası hâline geldiği kabul edilmiştir. Bu yapı, işlemlerin daha sonra değiştirilmesini veya silinmesini teknik olarak engelleyerek veri güvenliği açısından güçlü bir yapı sunduğu biçiminde teorik olarak değerlendirilmiştir. Senaryo çerçevesinde, sistemde gerçekleşen tüm işlemlerin kayıt geçmişinin bozulmadan korunabildiği ve veri bütünlüğünün blok zincirin temel yapısı sayesinde sağlanabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Sistemin sunduğu şeffaflık ilkesi de senaryo bazlı değerlendirmelerde dikkate alınmıştır. Örneğin, üretim talebinin oluşturulması ya da kullanıcı tarafından bir tedarikçinin seçilmesi gibi adımların her birinin blok numarası, zaman bilgisi ve işlem sırasıyla birlikte zincire eklendiği varsayılmıştır. Bu durum, söz konusu işlemlerin dış denetim ve analiz açısından izlenebilir hâle gelmesini mümkün kılmaktadır. Bu kurgu, sistemin yalnızca kapalı devre bir işlem mimarisi olmadığını; aynı zamanda süreçlerin denetlenebilirliği, analiz edilebilirliği ve geriye dönük incelenebilirliği gibi işlevleri de yerine getirebilecek potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle çok aktörlü üretim ortamlarında, şeffaf veri işleme yapısının süreç güvenilirliğini artırdığı ve taraflar arasında sorumlulukların daha açık şekilde belirlenmesini sağladığı değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak geliştirilen kavramsal sistem mimarisi, blok zincirin sunduğu güvenlik ve şeffaflık ilkeleri ile teorik düzeyde uyumlu olacak biçimde yapılandırılmıştır. Akıllı sözleşme mantığına dayalı olarak oluşturulan bu senaryolar, önerilen mimarinin veri güvenliği, değiştirilemezlik ve izlenebilirlik gibi temel blok zincir özelliklerini destekleyebilecek nitelikte olduğunu göstermektedir. Bu değerlendirmeler, sistemin ilerleyen süreçlerde gerçekleştirilecek gerçek uygulamalara temel teşkil edecek biçimde kavramsal düzeyde işlevsel olduğunu ortaya koymaktadır.

Otomasyon ve Verimlilik Bulguları

Bu çalışma kapsamında geliştirilen blok zincir tabanlı mimari, kullanıcı yönlendirmeli servis oluşturma modeliyle teorik olarak kurgulanmış ve akıllı sözleşmelerin sunduğu otomasyon kapasitesi, senaryo temelli yaklaşımla değerlendirilmiştir. Sistem tasarımında, kullanıcıların üretim ihtiyaçlarına yönelik taleplerini oluşturduktan sonra, blok zincir ağına kayıtlı servis sağlayıcılar (örneğin tedarikçiler, üretim atölyeleri, montaj tesisleri vb.) arasından tercihlerini kendilerinin yapacağı bir yapı öngörölmüştür. Kullanıcı bu seçimleri arayüz üzerinden gerçekleştirdikten sonra, seçilen kaynaklara ilişkin servis zinciri, akıllı sözleşmeler tarafından otomatik olarak oluşturulmakta ve işlemler tanımlı kurallar çerçevesinde zincire kaydedilmektedir. Böylece süreç, hem kullanıcıya karar alma özgürlüğü tanımakta hem de blok zincir altyapısı sayesinde işlem güvenliğini ve izlenebilirliğini korumaktadır.

Senaryo kapsamında, kullanıcı tarafından yapılan seçimlerin ardından sistemin müdahale olmaksızın işleyebilecek bir mantıkla yapılandırıldığı varsayılmıştır. Örneğin, kullanıcının belirli bir tedarikçiyi seçmesiyle birlikte, üretim sürecine ilişkin servis bileşenleri otomatik olarak tanımlanmakta ve işlem sırası belirli koşullar altında yürütülmektedir. Bu yapı sayesinde, geleneksel sistemlerde karşılaşılan onay gecikmeleri, manuel veri aktarımları ve iletişim kaynaklı hatalar teorik olarak ortadan kalkmakta; sürecin hem hız hem de doğruluk açısından optimize edilebileceği değerlendirilmiştir.

Sistemin belirli kurallara dayalı biçimde işlem yürütmesi, karar alma sürecinin algoritmik olarak öngörülebilirliğini artırmakta ve kullanıcı seçimlerini esas almasına rağmen belirli kontrollerin sistem düzeyinde sürdürülebilir olmasına olanak tanımaktadır. Örneğin, kullanıcı tarafından seçilen bir servis sağlayıcının kapasite bilgisi, kalite sertifikası ya da uygunluk koşulları, arka planda tanımlı kurallar ile kontrol edilmekte; uygunluk sağlandığında işlem blok zincir ağına işlenmektedir. Bu durum, hem kullanıcı tercihinine bağlı esnekliği hem de sistemin denetlenebilir yapısını aynı anda sağlayan bir mimari ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, önerilen kavramsal yapı; kullanıcıların üretim sürecindeki aktörleri kendi belirlediği, buna karşın akıllı sözleşmelerin bu kararları blok zincire bağlı otomasyon mekanizmaları ile yürüttüğü bir denge modeli sunmaktadır. Bu yaklaşım, yalnızca işlem süresini ve verimliliği artırmakla kalmayıp; aynı zamanda özelleştirilebilirlik, şeffaflık ve karar tutarlılığı açısından da üretim sistemlerinde dijital dönüşüm potansiyelini güçlendiren bir yapı ortaya koymaktadır.

Örnek İşlem Çıktılarının Analizi

Senaryo kapsamında kavramsal düzeyde tasarlanan akıllı sözleşmeler, üretim sürecinin temel adımlarını yönetmek üzere yapılandırılmış ve bu adımlara karşılık gelen işlemlerin, blok zincir mimarisine uygun olarak zaman damgalı, sıralı ve doğrulanabilir biçimde kaydedileceği varsayılmıştır. Her işlem; blok numarası, işlem türü, taraf bilgileri, gerçekleşme zamanı ve işlem durumu gibi parametrelerle sistem içerisinde tanımlanmış ve bu yapı, blok zincirin değiştirilemezlik ve şeffaflık gibi temel özelliklerini teorik düzeyde gözlemlenebilir kılacak şekilde kurgulanmıştır. Geliştirilen senaryoya göre sırasıyla; kullanıcının sistem üzerinden üretim talebini oluşturması, tedarikçilerin sisteme kayıt olması, kullanıcı tarafından tedarikçilerin manuel olarak seçilmesi ve seçime dayalı servis zincirinin oluşması adımları tanımlanmıştır.

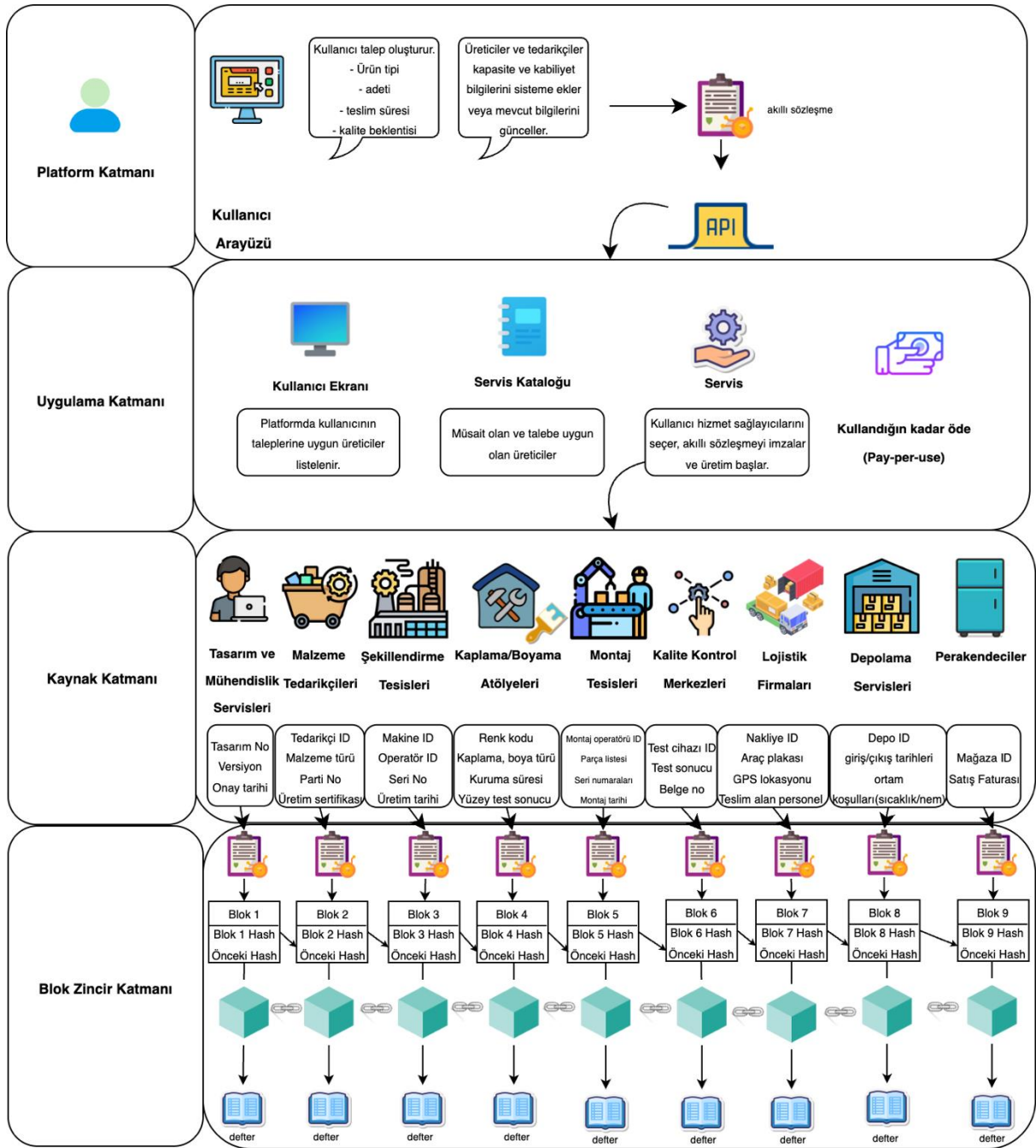
Bu süreçte gerçekleşen işlemlerin her birinin, farklı bloklara zaman sıralı biçimde kaydedildiği varsayılmıştır. Örneğin, üretim talebinin oluşturulması işleminin 1023 numaralı

blokta, kullanıcı tarafından seçilen tedarikçiyle oluşturulan siparişin ise 1024 numaralı blokta yer aldığı varsayımsal bir kurgu ile modellenmiştir. Bu yapı, sistemdeki işlem adımları arasında nedensel bütünlük (causal consistency) sağladığını ve mantıksal sürekliliğin korunabileceğini göstermektedir. İşlem verilerinin senaryo çerçevesinde sıralı ve bütünlük olarak bloklara yazıldığı varsayımı, sistemin yalnızca çalışabilirliğini değil; aynı zamanda blok zincir ile uyumlu, denetlenebilir ve izlenebilir bir yapıda faaliyet gösterebileceğini teorik olarak ortaya koymaktadır.

Her işlemde yer alacağı kabul edilen zaman damgaları, işlemler arasındaki sürelerin ölçülmesini ve süreç akışının analiz edilmesini olanaklı hâle getirecek biçimde tanımlanmıştır. Bununla birlikte işlem taraflarının açık adreslerle temsil edileceği öngörülmüş; böylece işlemlerin kim tarafından başlatıldığı doğrulanabilir bir yapı kazanmıştır. Bu kurgu, hem sistem içi denetim hem de dış paydaşlar nezdinde hesap verebilirlik açısından değerli bir yapı sunmaktadır.

Buzdolabı Üretimi için Blokzincir Tabanlı MaaS Örneği

Çok paydaşlı ve çok aşamalı üretim süreçlerinde, blokzincir tabanlı MaaS mimarileri şeffaflık, izlenebilirlik ve otomasyon açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Bu kapsamda geliştirilen model, üretim talebinden perakende teslimata kadar tüm süreci dijital olarak yönetilen bir hizmet olarak üretim yapısıyla tanımlamaktadır. Şekil 10'da, buzdolabı üretimine yönelik önerilen blokzincir tabanlı MaaS mimarisi, dört katman üzerinden kurgulanarak her katmanda yer alan işlevsel bileşenler ayrıntılı biçimde görselleştirilmiştir. Kullanıcı arayüzü üzerinden başlatılan üretim talebi, platformun hizmet sağlayıcılarla akıllı sözleşmeler aracılığıyla eşleşmesini sağlamakta; kaynak katmanında üretim faaliyetleri yürütülmekte ve tüm işlemler blokzincir üzerinde kayıt altına alınarak şeffaflık ve güvenlik sağlanmaktadır.



Şekil 11. Buzdolabı üretimi için blokzincir tabanlı MaaS örneği

Kullanıcı Arayüzü: Kullanıcılar sistemde üretim talebi oluşturur. Üreticiler ve tedarikçiler, sistem üzerinde kapasitelerini ve yetkinliklerini güncelleyebilir veya yeni bilgi girişi yapabilir. Yapılan işlemler, doğrulamalar ve anlaşmalar akıllı sözleşmeler aracılığıyla otomatikleştirilir.

Kullanıcı Ekranı: Kullanıcının oluşturduğu taleplere göre sistemde uygun üreticiler ve servis sağlayıcılar listelenir.

Servis Kataloğu: Sistemde yer alan tüm hizmet sağlayıcıların özellikleri gösterilir. Müsait olan üreticiler ve servis sağlayıcılar listelenir.

Servis: Kullanıcı, kendi ihtiyacına uygun hizmet sağlayıcıyı seçer. Akıllı sözleşme otomatik olarak oluşturulur, dijital olarak imzalanır ve üretim süreci başlar.

Kullandığın Kadar Öde (Pay-per-use): Tüm süreç, kullandıkça ödeme modeli ile işlemektedir. Bu sayede sistem, esnek ve ölçülebilir hale gelir.

Tasarım ve Mühendislik Servisleri: Ürün tasarımı, mühendislik onayları vb. işlemler bu aşamada gerçekleştirilir.

Malzeme Tedarikçileri: Üretimde kullanılacak ham madde ve komponent tedarik sürecini yönetir.

Şekillendirme Tesisleri: Parçaların şekillendirildiği üretim istasyonlarıdır.

Kaplama/Boyama Atölyeleri: Fiziksel ürün yüzey işlemlerinin yapıldığı aşamadır.

Montaj Tesisleri: Ürün bileşenlerinin birleştirildiği noktadır.

Kalite Kontrol Merkezleri: Ürünlerin kalite kontrol testlerinin yapıldığı bölümdür.

Lojistik Firmaları: Ürünlerin taşınmasından sorumlu aktörlerdir.

Depolama Servisleri: Ürünlerin geçici ya da uzun süreli depolandığı merkezlerdir.

Bloklar: Her işlem bir “blok” olarak zincire eklenir.

Dağıtık Defter (Ledger): Zincirdeki her blok, tüm sistem katılımcıları arasında dağıtılarak senkronize tutulur. Bu sayede şeffaflık ve güvenlik sağlanır.

Akıllı Sözleşmeler: Üretim sürecindeki her adım için ayrı akıllı sözleşmeler oluşturulur.

Tartışma

Blokszincir teknolojisi, ilk olarak Bitcoin gibi kripto para birimlerinin temelini oluşturmak amacıyla geliştirilmiştir. Zamanla, merkeziyetsizlik, şeffaflık, izlenebilirlik ve veri bütünlüğü gibi özellikleri sayesinde yalnızca finansal işlemlerle sınırlı kalmamış; sağlık, tedarik zinciri, eğitim ve üretim gibi farklı sektörlerde de yaygın olarak uygulanabilir hâle gelmiştir (Gamage et al., 2020). Krichen et al. (2022), blokszincirin artık yalnızca finans değil, IoT, kamu hizmetleri ve savunma gibi alanlarda da kritik roller üstlendiğini vurgulamaktadır. Bu gelişmeler, teknolojinin kavramsal temellerinin zaman içinde evrim geçirdiğini ve farklı sektörlerde güvenilir çözümler sunabildiğini göstermektedir.

Blokszincir teknolojisinin üretim süreçlerine entegrasyonu, şeffaflık, izlenebilirlik, siber güvenlik, otomasyon ve veri paylaşımı gibi çok boyutlu alanlarda dikkate değer katkılar

sunmaktadır. (Agrawal et al. (2021), tekstil ve hazır giyim sektöründe, tedarik zinciri boyunca ürünlerin güvenli takibini sağlamak amacıyla blokzincir tabanlı bir sistemin geliştirilerek sahteciliğin önlenmesinin sağlanabileceğini belirtmiştir. Aynı şekilde Pranto et al. (2021), tarım üretiminde Nİ cihazlarından elde edilen verilerin blokzincire kaydedilmesiyle hem süreçlerin otomatikleştirilmesini hem de paydaşlar arası güvenin artırılmasını sağlamıştır.

Son yıllarda yapılan çalışmalar ise bu katkıların çok daha kapsamlı üretim sistemlerine uyarlanabileceğini göstermektedir. Rane et al. (2022), otomotiv endüstrisinde parça takibi ve kalite kontrolü için Ethereum tabanlı bir sistem önererek hem ürün güvenliği hem de müşteri memnuniyeti açısından önemli çıktılara ulaşmıştır. Tsolakakis et al. (2021), gıda üretiminde blokzincir teknolojisinin kullanımıyla menşe sertifikasyonu ve kalite kontrol süreçlerini şeffaf hâle getirerek güvenin artırılabilmesini vurgulamıştır.

Zhao et al. (2021), üretim verilerinin yapay zekâ ile blokzincir destekli analizinin, karar alma süreçlerinde doğruluğu artırarak yöneticilere stratejik avantaj sunduğunu belirtmiştir. Mourtzis (2023) ise, Endüstri 5.0 bağlamında blokzincir ile metaverse entegrasyonunu inceleyerek, üretim süreçlerinin kişiselleştirilmiş ve merkeziyetsiz sistemlerle nasıl yeniden yapılandırılabilmesini ortaya koymuştur.

Liu et al. (2024) tarafından geliştirilen çalışma, blokzincir destekli izlenebilirlik çerçevesi ile üretici KOBİ'ler arasında güvenli veri paylaşımı ve iş birliğinin sağlanmasını amaçlamıştır. Aynı yıl Li et al. (2023), üretim esnasında oluşan makine verilerinin değiştirilemez bir şekilde blokzincir üzerinde kayıt altına alınarak hem bakım süreçlerinin hem de kalite analizlerinin dijitalleştirilmesini mümkün kıldıklarını belirtmişlerdir. Bununla birlikte Güler et al. (2022), blokzincirin üretim hatlarındaki kalite verilerini merkeziyetsiz bir ağda paylaşarak çoklu paydaşlı yapılarda eş zamanlı doğrulama sağladığını ifade etmiştir.

Bu çalışmaların ortak noktası, üretim sistemlerinde blokzincirin güvenlik, şeffaflık ve otomasyon gibi kritik bileşenleri destekleyen altyapılar oluşturduğunu ve üretimden teslimata kadar geçen sürecin her aşamasında izlenebilirliği artırdığını göstermesidir. Çoğu araştırma belirli sektörlerle veya süreç adımlarına odaklanmakta, entegre ve bütüncül bir üretim hizmet altyapısı sunmamaktadır. Bu noktada, önerilen blokzincir tabanlı MaaS mimarisi, üretim, sipariş, tedarikçi doğrulama ve kalite kontrol gibi alt süreçleri bir arada ele alarak bu literatür boşluğunu doldurmayı amaçlamıştır.

Blokzincir teknolojisi, Endüstri 4.0 ile birlikte dijital üretim sistemleriyle entegre edildiğinde yalnızca veri kaydı değil, aynı zamanda süreç denetimi ve güvenlik sağlayan çok katmanlı bir altyapı sunmaktadır. Zhang et al. (2023), sağlık sistemlerinde olduğu gibi üretim alanında da veri bütünlüğü ve güvenliğini sağlayan merkeziyetsiz yapıların önemini

vurgulamıştır. Shahbazi & Byun (2021), blokzinciri makine öğrenimi ile entegre ettikleri sistemde kalite kontrol ve veri güvenliğini birlikte ele almıştır. Santhi & Muthuswamy (2022), izlenebilirlik ve otomatik mutabakat gibi işlevlerde Hyperledger Fabric gibi izinli ağların etkinliğini ortaya koymuştur. Khanfar et al. (2021) ise blokzincirin üretimde yalnızca teknik değil, aynı zamanda sosyal ve çevresel sürdürülebilirlik açısından da önemli katkılar sağladığını belirtmiştir.

Güvenlik, blokzincir teknolojisinin öne çıkan katkılarından biridir. Zhang et al. (2023), blokzincir ağının altı farklı güvenlik katmanını analiz ederek; özellikle endüstriyel Nİ, üretim ve sağlık gibi hassas veri üreten alanlarda, sistemsel bütünlüğün korunmasında blokzincirin benzersiz avantajlar sunduğunu göstermektedir. Merkezi kontrol noktalarının kaldırılması ve kriptografi destekli konsensüs mekanizmalarının kullanımıyla güvenliğin güçlendiği vurgulanmıştır. Habib et al. (2022), blokzincirin bulut altyapılarıyla entegrasyonunu incelemiş, bu birleşimin özellikle elektronik sağlık kayıtları gibi kritik bilgilerde şeffaflık ve hesap verebilirlik sağladığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, veri senkronizasyonu, işlem hacmi ve işlem doğrulama süresi gibi bazı mimari sınırlamaların ortaya çıkabileceği belirtilmiştir. Bu bağlamda, önerdiğimiz özel blokzincir tabanlı MaaS sistem mimarisi, yetkilendirme mekanizmaları ve optimize veri paylaşımı sayesinde bu zorlukları minimize etmeyi hedeflemektedir.

MaaS yapıları, üretimin hizmetleşmesi sürecinde genellikle dijitalleşme, zamanlama, envanter kontrolü ve müşteri memnuniyeti gibi operasyonel faktörlere odaklanmaktadır (Chahyono, 2025; Quiroz, 2025). Wang et al. (2021), üretim hizmetlerinin tıpkı bulut bilişimdeki kaynaklar gibi servisleştirilmesini sağlayan bir bulut üretim altyapısı önererek dinamik iş gücü dağılımını ele almıştır. Shi et al. (2025), stratejik aktörler arası dengeyi oyun teorisi ile analiz etse de güvenilir teknolojik altyapılara yer vermemiştir. Benzer şekilde, Martins et al. (2025), insan-makine etkileşimi üzerine yoğunlaşmış; ancak veri güvenliği ve merkeziyetsiz yönetim açısından çalışma eksik kalmıştır. Bu çalışmalarda, dağıtık güvenlik, veri bütünlüğü, taraflar arası doğrulama ve sistemsel güvence gibi kritik yapısal ihtiyaçlar göz ardı edilmiştir. Bu durum, güvenli, şeffaf ve otomasyonla desteklenen bir MaaS altyapısına duyulan ihtiyacı açıkça ortaya koymaktadır.

Tüm bu literatür incelendiğinde, blokzincir teknolojisinin üretim alanında izlenebilirlik, şeffaflık ve güvenlik gibi alanlarda önemli katkılar sunduğu görülmektedir. Mevcut çalışmaların büyük çoğunluğu, bu teknolojiyi yalnızca veri kaydı, doğrulama veya belge paylaşımı gibi rollerle sınırlandırmakta, onu sistematik karar verme süreçlerinin aktif bir bileşeni olarak değerlendirmemektedir. Özellikle gerçek zamanlı kapasite yönetimi, dinamik

tedarikçi doğrulama, sipariş yönlendirme ve akıllı sözleşmelerle üretim planlama gibi alanlarda blokzincirin potansiyelinin yeterince kullanılmadığı dikkat çekmektedir.

Literatürde, blokzincir teknolojisinin planlama ya da çizelgeleme gibi üretim fonksiyonlarında kullanımına ilişkin örnekler bulunsa da bu uygulamaların büyük çoğunluğu blokzinciri yalnızca veri bütünlüğünü sağlamak, belge akışını güvence altına almak veya kaynak takibini şeffaflaştırmak için destekleyici bir katman olarak sınırlandırmıştır. Bu yaklaşımlar, blokzincirin potansiyelini tam anlamıyla ortaya koymak yerine onu pasif bir doğrulama mekanizması olarak konumlandırmakta, sistemik ve operasyonel karar alma süreçlerinin merkezine yerleştirmemektedir. Özellikle izinli blokzincir ağlarından biri olan Hyperledger Fabric, teknik mimarisi itibarıyla yüksek seviyede veri güvenliği, rol bazlı erişim kontrolü ve kimlik yönetimi imkânı sunmasına rağmen; bu altyapının da çoğu uygulamada yalnızca veri saklama ve erişim denetimi gibi sınırlı rollerle değerlendirildiği gözlemlenmektedir. Dolayısıyla, blokzincirin üretim sistemlerindeki işlevi, mevcut literatürde hâlâ sınırlı ve çoğunlukla tamamlayıcı niteliktedir.

Bu noktada, tez kapsamında geliştirilen blokzincir tabanlı MaaS mimarisi, yukarıda belirtilen sınırlılıkları aşmayı hedefleyen, bütüncül ve yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Önerilen sistem, blokzinciri yalnızca kayıt altına alma aracı olarak değil, aynı zamanda veriye dayalı gerçek zamanlı karar alma süreçlerinin temel yapı taşı olarak kullanmaktadır. Özellikle üretim uygunluklarının akıllı sözleşmelerle otomatik olarak doğrulanması ve siparişlerin en uygun üreticiye yönlendirilmesi gibi işlevler, sistemin operasyonel kararlarını tamamen blokzincir destekli olarak almasını sağlamaktadır. Bu yapı sayesinde üretim planlama ve kaynak tahsisi gibi yüksek karar gerektiren süreçler, merkezi olmayan ama güvenli bir yapı üzerinden gerçekleştirilmekte ve manuel müdahaleye olan ihtiyaç en aza indirilmektedir.

Tez kapsamında geliştirilen bu yapı, literatürde genellikle parça parça ele alınan güvenlik, şeffaflık, doğrulama, sürdürülebilirlik ve otomasyon gibi bileşenleri tek bir mimari bütünlük içinde birleştirmektedir. Güvenli bir üretim hizmet altyapısı kurularak blokzincir teknolojisinin sunduğu kriptografik güvenlik, sistem düzeyinde entegre edilmiştir. Tedarikçilerin başvuruları sistemde önceden tanımlanmış kriterlere göre otomatik olarak değerlendirilmekte, üretim uygunlukları ise akıllı sözleşmeler aracılığıyla kontrol edilmektedir. Tüm işlemler zaman damgalı ve değiştirilemez şekilde blokzincir üzerinde kayıt altına alınarak operasyonel ve yapısal güvenlik sağlanmaktadır. Aynı zamanda, insan hatasını minimize eden otomatikleştirilmiş karar mekanizmaları sayesinde süreç verimliliği önemli ölçüde artırılmakta ve denetlenebilirlik kolaylaşmaktadır. Sistemin sunduğu otomatikleştirilmiş karar alma mekanizmaları, üretim sürecinde hızlı tepki verilmesini sağlarken, blokzincir destekli denetim

yetenekleri sayesinde tüm faaliyetlerin geriye dönük olarak izlenebilmesi ve doğrulanabilmesi mümkün hâle gelmektedir.

Sonuç olarak bu tez çalışması, blokzincirin üretim sistemlerine süreçsel entegrasyonunu sağlayan, karar destek mekanizmalarını otomatikleştiren, bütüncül bir üretim yönetişimi ortaya koyan, gerçek zamanlı planlama altyapısını sunan yeni bir model önermektedir. Böylece, hem akademik literatürde hem de uygulamalı alanda eksikliği hissedilen entegre, güvenli ve sürdürülebilir bir MaaS altyapısı somut bir biçimde ortaya koymakta ve gelecekteki araştırmalara yön verebilecek bir örnek sunmaktadır.



SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen blokzincir tabanlı MaaS mimarisi, üretim ve tedarik zinciri süreçlerinin dijital dönüşümünde karşılaşılan güven, izlenebilirlik ve otomasyon gibi temel sorunlara çözüm sunabilecek kavramsal bir altyapı ortaya koymuştur. Gerçekleştirilen modelleme çalışması, kullanıcı taleplerinin dinamik olarak servis yapılarına dönüştürülmesini, akıllı sözleşmeler aracılığıyla otomatik işlem yürütülmesini ve sistem genelinde tüm faaliyetlerin blokzincir üzerinde şeffaf biçimde izlenmesini mümkün kılmıştır. Özellikle pay-per-use yaklaşımının uygulanabilirliği, üretim kaynaklarının esnek yönetimi ve çok paydaşlı yapıların güvenli biçimde senkronize edilmesi açısından modelin güçlü yönleri vurgulanmıştır. Sistemin gerçek dünya koşullarında ölçeklenebilirliği, kullanıcı dostu arayüzlerle desteklenmesi ve farklı sektörlerde test edilmesi gelecekteki çalışmalar açısından kritik öneme sahiptir. Bu doğrultuda, ilerleyen çalışmalarda önerilen mimarinin farklı sektörel bağlamlarda ve üretim ölçeklerinde uygulanarak performans, uyarlanabilirlik ve kullanıcı etkileşimi açısından değerlendirilmesi; ayrıca IoT cihazlarından gelen verilerin blokzincir ağına entegrasyonu için gelişmiş veri toplama ve senkronizasyon mekanizmalarının tasarlanması önerilmektedir. Buna ek olarak, sistemin sürdürülebilir kurumsal uygulamalara entegrasyonu için mevzuat uyumluluğu, veri gizliliği ve standartlaştırma konularında kapsamlı analizlerin yapılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Agbo, C. C., Mahmoud, Q. H., & Eklund, J. M. (2019). Blockchain Technology in Healthcare: A Systematic Review. *Healthcare* 2019, Vol. 7, Page 56, 7(2), 56. <https://doi.org/10.3390/HEALTHCARE7020056>
- Agbo, C. C., Mahmoud, Q. H., & Eklund, J. M. (2021). Blockchain technology in healthcare: A systematic review. *Healthcare*, 9(1), 78. <https://doi.org/10.3390/healthcare9010078>
- Agrawal, R., Kumar, V., & Ranjan, P. (2021). Blockchain-based traceability and counterfeit prevention in the textile and apparel supply chain. *International Journal of Information Management Data Insights*, 1(2), 100024. <https://doi.org/10.1016/j.jjime.2021.100024>
- Andoni, M., Robu, V., Flynn, D., Abram, S., Geach, D., Jenkins, D., & Peacock, A. (2021). Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 100, 143–174. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.014>
- Androulaki, E., Barger, A., Bortnikov, V., Cachin, C., Christidis, K., De Caro, A., Enyeart, D., Ferris, C., Laventman, G., Manevich, J., & others. (2018). Hyperledger Fabric: A distributed operating system for permissioned blockchains. *Proceedings of the Thirteenth EuroSys Conference*, 1–15. <https://doi.org/10.1145/3190508.3190538>
- Atzei, N., Bartoletti, M., & Cimoli, T. (2017). A survey of attacks on Ethereum smart contracts (SoK). *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 10204 LNCS, 164–186. https://doi.org/10.1007/978-3-662-54455-6_8/FIGURES/1
- Cachin, C. (2016) *Architecture of the Hyperledger Blockchain Fabric*. *Workshop on Distributed Cryptocurrencies and Consensus Ledgers*, 310, 4. - *References - Scientific Research Publishing*. (n.d.). Retrieved June 30, 2025, from <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2723156>
- Casino, F., Dasaklis, T. K., & Patsakis, C. (2019). A systematic literature review of blockchain-based applications: Current status, classification and open issues. *Telecommunications Systems*, 71(1), 1–27. <https://doi.org/10.1007/s11235-018-0481-5>
- Chahyono, H. D. (2025). Smart manufacturing-as-a-service: Scheduling optimization in industrial cloud. *Journal of Cloud Manufacturing*, 7(1), 12–22.
- Christidis, K., & Devetsikiotis, M. (2016). Blockchains and Smart Contracts for the Internet of Things. *IEEE Access*, 4, 2292–2303. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2566339>
- Chukwu, E., & Garg, L. (2020). Blockchain in healthcare: A new model for health information exchanges. *Health Information Science and Systems*, 8, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s13755-020-00105-6>
- D, J. (n.d.). *Johnston, D., Yilmaz, S. O., Kandah, J., Bentenitis, N., Hashemi, F., Gross, R. et al. (2014). The General Theory of Decentralized Applications, Dapps*. *GitHub*, June 9. - *References - Scientific Research Publishing*. Retrieved June 30, 2025, from <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3044033>
- Dinh, T. T. A., Liu, R., Zhang, M., Chen, G., & Ooi, B. C. (2020). Untangling blockchain: A data processing view of blockchain systems. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 34(3), 1098–1115. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2020.2966401>

- Dorri, A., Kanhere, S. S., & Jurdak, R. (2017). Towards an optimized blockchain for IoT. *Proceedings - 2017 IEEE/ACM 2nd International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation, IoTDI 2017 (Part of CPS Week)*, 6, 173–178. <https://doi.org/10.1145/3054977.3055003>
- Fernandez-Carames, T. M., & Fraga-Lamas, P. (2024). A Review on the Use of Blockchain for the Internet of Things. *IEEE Access*, 6, 32979–33001. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2842685>.
- Francisco, K., & Swanson, D. (2021). The supply chain has no clothes: Technology adoption of blockchain for supply chain transparency. *Logistics*, 5(1), 3. <https://doi.org/10.3390/logistics5010003>
- Galvez, J. F., Mejuto, J. C., & Simal-Gandara, J. (2021). Future challenges on the use of blockchain for food traceability analysis. *Trends in Analytical Chemistry*, 131, 116003. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.116003>
- Gamage, A., Samaranayake, P., & Ghosh, S. (2020). Blockchain technology in supply chain operations: Applications, challenges and research opportunities. *Logistics*, 4(3), 21. <https://doi.org/10.3390/logistics4030021>
- Güler, M., Yılmaz, K., & Toprak, S. (2022). Blockchain-based decentralized quality control in industrial production lines. *Computers & Industrial Engineering*, 167, 108011. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108011>
- Guo, Z., Li, H., & Xie, W. (2022). Blockchain-enabled decentralized manufacturing: A smart contract-based framework for supply chain collaboration. *Computers & Industrial Engineering*, 170, 108303. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108303>
- Habib, S. M., Fatima, T., & Abbas, H. (2022). Integration of blockchain with cloud computing: Opportunities and challenges for secure data sharing. *Journal of Cloud Computing*, 11, 45. <https://doi.org/10.1186/s13677-022-00310-1>
- He, X., Chen, D., Zhang, N., Dai, H.-N., & Yu, K. (2022). Integration of blockchain and edge computing in Internet of Things: A survey. *ArXiv Preprint ArXiv:2205.13160*.
- Herlianti, R., Lukito, T., Mayanti, M., & Kusumah, L. H. (2025). Implementation of predictive maintenance in various industry: A Review. *TEKNOSAINS: Jurnal Sains, Teknologi Dan Informatika*.
- Hewa, T., Ylianttila, M., & Liyanage, M. (2021). Survey on blockchain-based smart contracts: Applications, challenges, and future trends. *Journal of Network and Computer Applications*, 177, 102994. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102994>
- Hossain, M. I., Steigner, T., Hussain, M. I., & Akther, A. (2024). Enhancing data integrity and traceability in industry cyber-physical systems (ICPS) through blockchain technology: A comprehensive approach. *ArXiv Preprint ArXiv:2405.04837*.
- Kamath, R. (2018). Food Traceability on Blockchain: Walmart's Pork and Mango Pilots with IBM. *The Journal of The British Blockchain Association*, 1(1), 1–12. [https://doi.org/10.31585/JBBA-1-1-\(10\)2018](https://doi.org/10.31585/JBBA-1-1-(10)2018)
- Kamble, S., Gunasekaran, A., & Arha, H. (2019). Understanding the Blockchain technology adoption in supply chains-Indian context. *International Journal of Production Research*, 57(7), 2009–2033. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1518610>
- Khanfar, K., Shaikh, A. A., & Mahmood, M. (2021). Blockchain adoption in sustainable manufacturing: A framework for environmental and social performance. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123456. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123456>

- Kouhizadeh, M., Saberi, S., & Sarkis, J. (2021). Blockchain technology and the sustainable supply chain: Theoretically exploring adoption barriers. *International Journal of Production Economics*, 231, 107831. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107831>
- Krichen, M., Nasr, I. B., & Farhat, H. (2022). Blockchain technology applications outside the financial sector: A systematic review. *Technological Forecasting and Social Change*, 174, 121206. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121206>
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23. <https://doi.org/10.1016/J.MFGLET.2014.12.001>
- Li, X., Feng, Y., & Zhao, M. (2023). Blockchain for predictive maintenance: Immutable machine data logging and AI-based failure detection. *Journal of Manufacturing Systems*, 69, 450–462. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.03.007>
- Liu, F., Tang, G., Li, Y., Cai, Z., Zhang, X., & Zhou, T. (2019). A Survey on Edge Computing Systems and Tools. *Proceedings of the IEEE*. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2019.2920341>
- Liu, J., Jiang, P., & Zhang, J. (2024). A blockchain-enabled and event-driven tracking framework for SMEs to improve cooperation transparency in manufacturing supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 191, 110150. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.110150>
- Liu, Y., Feng, Y., & Sakurai, K. (2025). Hyperledger Fabric-Based Multi-Channel Structure for Data Exchange in Internet of Vehicles. *Electronics* 2025, Vol. 14, Page 572, 14(3), 572. <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS14030572>
- Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 6, 1–10. <https://doi.org/10.1016/J.JII.2017.04.005>
- Lu, Y., & Xu, X. (2019). Cloud-based manufacturing equipment and big data analytics to enable on-demand manufacturing services. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 57, 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.10.002>
- Lu, Y., Xu, X., & Wang, L. (2020). Smart manufacturing process and system automation – A critical review of the standards and envisioned scenarios. *Journal of Manufacturing Systems*, 56, 312–325. <https://doi.org/10.1016/J.JMSY.2020.06.010>
- Martins, J., Oliveira, A., & Pereira, R. (2025). Human-machine interaction in MaaS platforms: A user-centric perspective. *International Journal of Human-Computer Studies*, 175, 103079.
- McGibney, A., Ranathunga, T., & Pospisil, R. (2024). *SmartQC: An Extensible DLT-Based Framework for Trusted Data Workflows in Smart Manufacturing*. <https://arxiv.org/pdf/2402.17868>
- Melo, C., Gonçalves, G., Silva, F. A., & Soares, A. (2025). Performance Modeling and Evaluation of Hyperledger Fabric: An Analysis Based on Transaction Flow and Endorsement Policies. *Proceedings - IEEE Symposium on Computers and Communications*. <https://doi.org/10.1109/ISCC61673.2024.10733701>
- Mettler, M. (2016). Blockchain technology in healthcare: The revolution starts here. *2016 IEEE 18th International Conference on E-Health Networking, Applications and Services, Healthcom 2016*. <https://doi.org/10.1109/HEALTHCOM.2016.7749510>

- Mourtzis, D. (2023). The Metaverse in Industry 5.0: A human-centric approach towards personalized value creation. *Encyclopedia*, 3(3), 1105–1120. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia3030080>
- Nguyen, G. T., Hoang, D. T., Nguyen, D. N., Niyato, D., Wang, P., & Dutkiewicz, E. (2021). Permissioned blockchain architectures and their applications. *IEEE Access*, 9, 124107–124132. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3109204>
- Ølnes, S., Ubacht, J., & Janssen, M. (2017). Blockchain in government: Benefits and implications of distributed ledger technology for information sharing. *Government Information Quarterly*, 34(3), 355–364. <https://doi.org/10.1016/J.GIQ.2017.09.007>
- Perera, C., Thilakarathne, N. N., & Jayarathna, R. (2022). Smart contract-based approach for Industry 4.0 applications. *Journal of Industrial Information Integration*, 26, 100260. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100260>
- Piao, X., Ding, H., & Song, H. (2023). Performance Analysis of Endorsement in Hyperledger Fabric Concerning Endorsement Policies. *Electronics* 2023, Vol. 12, Page 4322, 12(20), 4322. <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS12204322>
- Pournader, M., Shi, Y., Seuring, S., & Koh, S. C. L. (2021). Blockchain applications in supply chains, transport and logistics: A systematic review of the literature. *International Journal of Production Research*, 59(7), 2063–2081. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1803426>
- Pranto, T. S., Rahman, M. M., & Hasan, M. M. (2021). IoT and blockchain integration in smart agriculture: Enhancing traceability and automation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 189, 106421. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106421>
- Queiroz, M. M., Telles, R., & Bonilla, S. H. (2020). Blockchain and supply chain management integration: a systematic review of the literature. In *Supply Chain Management* (Vol. 25, Issue 2, pp. 241–254). Emerald Group Holdings Ltd. <https://doi.org/10.1108/SCM-03-2018-0143>
- Queiroz, M. M., Telles, R., & Bonilla, S. H. (2021). Blockchain adoption in supply chain management: Empirical evidence from emerging economies. *International Journal of Operations & Production Management*, 41(1), 3–22. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-03-2020-0174>
- Quiroz, J. (2025). Inventory forecasting and digital integration in MaaS ecosystems. *Manufacturing Systems Review*, 9(1), 35–49.
- Ramirez Lopez, L. J., Cárdenas Babativa, J. M., & Rojas Reales, W. M. (2022). Blockchain apply to the supply chain of essential medicines for the treatment of Covid-19 in Colombia. *Informatics in Medicine Unlocked*, 33, 101100. <https://doi.org/10.1016/J.IMU.2022.101100>
- Rane, S. B., Thakker, A. A., & Thakkar, J. (2022). Blockchain-enabled quality control in automotive manufacturing: A case study using Ethereum. *Procedia Computer Science*, 200, 885–893. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.209>
- Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., & Shen, L. (2019). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. *International Journal of Production Research*, 57(7), 2117–2135. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1533261>
- Salah, K., Rehman, M. H. U., Nizamuddin, N., & Al-Fuqaha, A. (2021). Blockchain for AI: Review and open research challenges. *IEEE Access*, 9, 26045–26076. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3057025>

- Santhi, B., & Muthuswamy, S. (2022). Blockchain-based supply chain management for traceability and multi-party validation in manufacturing ecosystems. *Journal of Industrial Information Integration*, 28, 100321. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100321>
- Schär, F. (2020, April). *Decentralized Finance: On Blockchain- and Smart Contract-based Financial Markets*. https://www.researchgate.net/publication/340061422_Decentralized_Finance_On_Blockchain-_and_Smart_Contract-based_Financial_Markets
- Shahbazi, Z., & Byun, Y. C. (2021). Integration of blockchain and machine learning for smart quality management in manufacturing. *Sensors*, 21(10), 3548. <https://doi.org/10.3390/s21103548>
- Shi, Y., Lu, J., & Wang, X. (2025). Game-theoretical modelling of stakeholder dynamics in MaaS ecosystems. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 166, 102946.
- Szabo, N. (n.d.). *Formalizing and Securing Relationships on Public Networks*.
- Szabo, N. (1997). Formalizing and Securing Relationships on Public Networks. *First Monday*, 2(9). <https://doi.org/10.5210/FM.V2I9.548>
- Tariq, B., & Khan, J. (2024). IoT-Based Predictive Maintenance in Industrial Environments. *International Journal of Advanced Engineering Technologies and Innovations*, 10(2).
- Thakkar, P., Nathan, S., & Viswanathan, B. (2018). Performance Benchmarking and Optimizing Hyperledger Fabric Blockchain Platform. *Proceedings - 26th IEEE International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems, MASCOTS 2018*, 264–276. <https://doi.org/10.1109/MASCOTS.2018.00034>
- Tönnissen, S., & Teuteberg, F. (2020). Analysing the impact of blockchain-technology for operations and supply chain management: An explanatory model drawn from multiple case studies. *International Journal of Information Management*, 52, 101953. <https://doi.org/10.1016/J.IJINFOMGT.2019.05.009>
- Treiblmaier, H., & Beck, R. (2020). *Business transformation through blockchain: Volume I*. Springer.
- Tsolakis, N., Niedenzu, D., & Lai, K. H. (2021). Blockchain in agrifood supply chains: Enhancing transparency and trust. *Supply Chain Management: An International Journal*, 26(2), 215–230. <https://doi.org/10.1108/SCM-09-2020-0426>
- Vitalik Buterin. (2014). *Ethereum Whitepaper*. <https://ethereum.org/en/whitepaper/>
- Wang, B., Wang, P., & Tu, Y. (2021). Customer satisfaction service match and service quality-based blockchain cloud manufacturing. *International Journal of Production Economics*, 240, 108220. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2021.108220>
- Wang, C., & Chu, X. (2021). Performance Characterization and Bottleneck Analysis of Hyperledger Fabric. *Proceedings - International Conference on Distributed Computing Systems*, 2020-November, 1281–1286. <https://doi.org/10.1109/ICDCS47774.2020.00165>
- Wang, S., Zhang, Y., Zhang, Y., & Yang, J. (2021). Blockchain-enabled smart contracts: Architecture, applications, and future trends. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 51(1), 248–258. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2019.2895123>
- Wood, G. (2014). *ETHEREUM: A SECURE DECENTRALISED GENERALISED TRANSACTION LEDGER*.

- Xiao, Y., Zhang, N., Lou, W., & Hou, Y. T. (2020). A Survey of Distributed Consensus Protocols for Blockchain Networks. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 22(2), 1432–1465. <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.2969706>
- Xu, Xiwei., Weber, Ingo., & Staples, Mark. (2019). *Architecture for blockchain applications*.
- Yu, T., Zhu, C., Chang, Q., & Wang, J. (2019). Imperfect corrective maintenance scheduling for energy efficient manufacturing systems through online task allocation method. *Journal of Manufacturing Systems*, 53, 282–290. <https://doi.org/10.1016/J.JMSY.2019.11.002>
- Zhang, P., Schmidt, D. C., White, J., & Lenz, G. (2020). Blockchain technology use cases in healthcare. In *Advances in Computers* (Vol. 117, pp. 1–41). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.adcom.2019.11.006>
- Zhang, P., White, J., Schmidt, D. C., Lenz, G., & Rosenbloom, S. T. (2018). FHIRChain: Applying Blockchain to Securely and Scalably Share Clinical Data. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 16, 267–278. <https://doi.org/10.1016/J.CSBJ.2018.07.004>
- Zhang, X., Chen, Y., & Liu, H. (2023). Security architecture of blockchain systems: Multi-layer analysis and industrial implications. *IEEE Access*, 11, 5564–5576. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3242213>
- Zhang, Y., Ren, S., Liu, Y., & Si, S. (2020). A big data analytics architecture for cleaner manufacturing and maintenance processes of complex products. *Journal of Cleaner Production*, 265, 121383. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121383>
- Zhang, Y., White, J., Schmidt, D. C., & Lenz, G. (2021). Blockchain technology in smart cities: Applications, challenges, and future directions. *Sustainable Cities and Society*, 63, 102364. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102364>
- Zhao, Y., Liu, D., & Wang, J. (2021). Blockchain-powered AI decision-making for smart factories. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 32(6), 1278–1294. <https://doi.org/10.1108/JMTM-05-2020-0182>
- Zheng, Z., Xie, S., Dai, H., Chen, X., & Wang, H. (2017a). An Overview of Blockchain Technology: Architecture, Consensus, and Future Trends. *Proceedings - 2017 IEEE 6th International Congress on Big Data, BigData Congress 2017*, 557–564. <https://doi.org/10.1109/BIGDATAACONGRESS.2017.85>
- Zheng, Z., Xie, S., Dai, H., Chen, X., & Wang, H. (2017b). An Overview of Blockchain Technology: Architecture, Consensus, and Future Trends. *Proceedings - 2017 IEEE 6th International Congress on Big Data, BigData Congress 2017*, 557–564. <https://doi.org/10.1109/BIGDATAACONGRESS.2017.85>
- Zheng, Z., Xie, S., Dai, H.-N., Chen, X., & Wang, H. (2020a). An overview of blockchain technology: Architecture, consensus, and future trends. *2020 IEEE International Congress on Big Data (BigDataCongress)*, 557–564. <https://doi.org/10.1109/BigDataCongress50356.2020.00086>
- Zheng, Z., Xie, S., Dai, H.-N., Chen, X., & Wang, H. (2020b). An overview of blockchain technology: Architecture, consensus, and future trends. *2020 IEEE International Congress on Big Data (BigDataCongress)*, 557–564. <https://doi.org/10.1109/BigDataCongress50356.2020.00086>
- Zheng, Z., Xie, S., Dai, H.-N., Chen, X., & Wang, H. (2020c). An overview of blockchain technology: Architecture, consensus, and future trends. *2020 IEEE International Congress on Big Data (BigDataCongress)*, 557–564. <https://doi.org/10.1109/BigDataCongress50356.2020.00086>



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Sümeyya Şuheda CEYLAN
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı (2022)
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	Orta
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	