T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

BLOKZİNCİR TEKNOLOJİSİ İLE TARIM ÜRÜNLERİ İÇİN BİR TOKENİZASYON TASARIMI VE UYGULAMASI: TÜRKİYE ÖRNEĞİ

Demir Murat AKSOY

Enformatik Anabilim Dalı

Enformatik Programı

DANIŞMAN
Prof. Dr. Zümrüt ECEVİT SATI

Temmuz 2025

İSTANBUL

Bu çalışma, 23.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Enformatik Anabilim Dalı, Enformatik Programı'nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Prof. Dr. Zümrüt ECEVİT SATI
(Danışman)

İstanbul Üniversitesi,
Siyasal Bilgiler Fakültesi,
İşletme Bölümü

Prof. Dr. Sevinç GÜLSEÇEN

İstanbul Üniversitesi,
Fen Fakültesi,
Bilgisayar Bilimleri Bölümü

Prof. Dr. Küçük Hüseyin KOÇ

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa,
Orman Fakültesi,
Orman Endüstri Mühendisliği

Prof. Dr. Çiğdem EROL

İstanbul Üniversitesi,
Fen Fakültesi,
Bilgisayar Bilimleri Bölümü

Dr. Öğretim Üyesi Zerrin Ayvaz REİS

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa,
Hasan Ali Yücel Eğitim Fakültesi,
Bilgisayar ve Öğretim Teknolojileri Eğitimi

İntihal Programı Beyanı

20.04.2016 tarihli Resmî Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Doktora teze, İstanbul Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere göre uygun rapor alınmıştır.

Proje Destekleri

Tezden Üretilmiş Yayınların Künye Bilgileri

The Journal of Applied Engineering and Agriculture

(Uygulamalı Mühendislik ve Tarım Dergisi)

July 2025

Tokenization of Real World Assets:
An Agricultural Token System Implementation
Based on Blockchain Architecture

DEMİR MURAT AKSOY[1], Prof. Dr. ZÜMRÜT ECEVİT SATI[2]

1. Enformatik Bölümü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye. Email: demir.aksoy@outlook.com

2. İşletme Bölümü, Siyasal Bilgiler Fakültesi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Turkey. Email: zsati@istanbul.edu.tr

ÖNSÖZ

Bu doktora tezimi hazırladığım süre boyunca bana sonsuz desteklerini esirgemeyen kıymetli tez danışmanım Sn. Prof. Dr. Zümrüt Ecevit Satı, Enformatik Bölüm Başkanım Prof. Dr. Sevinç Gülseçen ve Prof. Dr. Hüseyin Koç hocalarıma çok teşekkür ederim. Kendileri, bilimsel etik ilkeleri ile tüm teknik yönlendirmelerinin yanı sıra toleranslı hoşgörüsüyle, doktora çalışmamın bireysel sahiplik motivasyonunu en başından bugüne korumamı sağlayarak en büyük destekçim olmuşlardır. Kendilerinin danışmanlık yaptığı öğrencilerden biri olmak, bu hayatta taşıyacağım kayda değer gururlardandır. Bu doktora tezimi hazırlarken, kendilerinin benden önce yaptıkları tüm çalışmalarına başvurduğum, tezimin Kaynakça bölümünde kendilerine yer verdiğim kıymetli bilim insanlarına sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Umarım ben de tıpkı onlar gibi, benden sonra bu alanda onların yaptıklarının üzerine koyarak ilerleme kaydedebilir ve sonrakilere yön verip onların yeni çalışmalarına baz sağlayacak bir değer yaratabilirim. Ve ailem… Annem ve babam başta olmak üzere, tüm aileme süreç boyunca bana kendimi ve hayallerimi hatırlatarak cesaretlendirdikleri için çok teşekkür ederim.

Beni yetiştiren çiftçi ailemin köklü kültürü ile bilgisayar mühendisliği alanındaki akademik başarılarımın kesişiminde, özel sektör ve kamu sektöründeki orta ve üst düzey yöneticiliklerimin tecrübesini koymam, tezimin ana fikrinin doğuşuna kaynaklık etti. Bu çalışma ile; kendi kendine anlık dönerek ticari değer yaratan dijital bir değirmenin ve stoğun yaratıcısı olmak, öldüğümde insanlığa özellikle tarım sektörüne dönük finansal teknolojilerde çığır açacak ve asla yıkıcı trendlere yenilmeyecek bir eser bırakmış olma hayalim, en büyük motivasyonumdu.

Özellikle 2021 yılı sonrası, Blokzincir Teknolojisi, Token Ekonomisi, Tokenizasyon, Sektörel Blokzincir uygulamaları, Tarım sektörüne dönük blokzincir uygulamaları konuları üzerine odaklandım ve söz konusu “Blokzincir Teknolojisi ile Tarım Ürünleri için Bir Tokenizasyon Tasarımı ve Uygulaması: Türkiye Örneği” başlıklı doktora tezi ile çalışmalarımı derinleştirdim. En geleneksel sektör olan tarım sektörü ile bilgi teknolojilerinde yıkıcı ve dönüştürücü bir etki ve altyapı sağlayan blokzincir teknolojisini bir araya getiren bu tez çalışmam ile ülkemiz, bölgemiz ve dünya tarım sektörü ve ekonomisine farklı bir bakış açısı ve ivme getirmeyi amaçladım. Tarımsal ürünlerin birebir fiziksel karşılıklarının blokzincir teknolojisi ile dijital izdüşümlerinin oluşturularak ortaya çıkan varlığa-dayalı (asset-backed) tarım emtia tokenlerinin, ülkemiz ve dünyanın herhangi bir bölgesinde yaşayan herhangi bir insanın, herhangi bir zaman diliminde istediği miktarda tarım ürünlerine kolaylıkla yatırım yapabilir duruma gelmesini sağlayacağına inanıyorum.

Tezimin ülkemiz ve dünya tarım sektörü ve ekonomisine çok önemli bir değer katacağının bilinci ve motivasyonu ile projeme kendimi adadığımı ve çalışmalarıma yoğun bir şekilde devam edeceğimi belirterek; tezimi değerli takdirlerinize sunarım.

Saygılarımla,

Temmuz 2025

Demir Murat AKSOY

İÇİNDEKİLER

1. GİRİŞ 12

2. BLOKZİNCİR KAVRAMI VE TEKNOLOJİSİ, GETİRDİĞİ YENİLİKLER VE AVANTAJLARI 16

2.1 BLOKZİNCİR KAVRAMI, TARİHSEL GELİŞİMİ VE GELECEĞİ 16

2.2 BLOKZİNCİR TÜRLERİ 23

2.3 BLOKZİNCİR VE BAĞLI LİSTELER (LINKED LİST) 26

2.4 BLOKZİNCİR VE MERKEZİ VERİTABANI SİSTEMLERİ 26

2.5. BLOKZİNCİR MUTABAKAT (UZLAŞI) PROTOKOLLERİ 29

2.5.1. İş İspatı Mutabakat Algoritması 32

2.5.2. Hisse İspatı Mutabakat Algoritması 34

2.6. BLOKZİNCİR TEKNOLOJİSİNİN AVANTAJLARI 37

2.7. BLOKZİNCİR TEKNOLOJİSİNİN ZORLUKLARI 39

3. SEKTÖREL BAZLI BLOKZİNCİR UYGULAMALARI, GETİRDİĞİ YENİLİKLER VE AVANTAJLARI 44

3.1. FİNANS VE BANKACILIK 44

3.2. KAMU 46

3.3. EĞİTİM 46

3.4. SAĞLIK 48

3.5. GIDA 49

3.6. GAYRİMENKUL 50

3.7. TURİZM 51

3.8. LOJİSTİK 52

3.9. PAZARLAMA 53

3.10. ULUSLARARASI TİCARET 54

3.11. ENERJİ 55

3.12. TARIM 56

3.13. HAVACILIK 57

3.14. İNŞAAT 59

3.15. SAVUNMA SANAYİİ 60

4. TARIM SEKTÖRÜNE YÖNELİK BLOKZİNCİR UYGULAMALARI, GETİRDİĞİ YENİLİKLER VE AVANTAJLARI 62

4.1. TARIMSAL GIDA ÜRÜNLERİNİN TEDARİK ZİNCİRİ YÖNETİMİNDE BLOKZİNCİR TEKNOLOJİSİNİN ETKİSİ 66

4.2. TARIMDA BLOKZİNCİR KULLANIMI 68

4.2.1. Mahsul ve Gıda Üretimi 68
4.2.2. İklim Krizini Yönetme 69
4.2.3. Tarım Finansmanını Yönetmek 70
4.3. AKILLI TARIM 71
5. TOKEN, TOKENLEŞTİRME VE TOKEN EKONOMİSİ KAVRAMLARI 73
5.1. TOKEN 76
5.2. TOKENLERİN SINIFLANDIRILMASI 79
5.3. TOKENLEŞTİRME 82
5.4. TOKEN EKONOMİSİ VE UYGULAMA ALANLARI 83
6. BLOKZİNCİR TEKNOLOJİSİ İLE TARIM ÜRÜNLERİ İÇİN BİR TOKENİZASYON TASARIMI VE UYGULAMASI: TÜRKİYE ÖRNEĞİ VE BULGULAR 86
6.1. TARIM ÜRÜNLERİ İÇİN BİR TOKENİZASYON ÖRNEĞİ SİSTEM ANALİZİ 87
6.1.1. Varlığa Dayalı Tokenler 91
6.1.2. Emtia'ya Dayalı Tokenler Neden Gerekli? 95
6.1.3. Türkiye Tarım Tokenizasyon Örneğinin Avantajları 96
6.2. TARIM ÜRÜNLERİ İÇİN BİR TOKENİZASYON ÖRNEĞİ SİSTEM TASARIMI 102
6.2.1. Sistem mimarisi 103
6.2.2. Paneller 104
6.2.3. Veri Akışı 104
6.2.4. Akıllı Kontrat İşlemleri 104
6.2.5. Sunucu Seçimi 105
6.2.6. Blokzincir Ağ Seçimi 105
6.3. TARIM ÜRÜNLERİ İÇİN BİR TOKENİZASYON ÖRNEĞİ UYGULAMASI – AGROS 108
6.3.1. AGROS Platformu Yapısı ve İşleyişi 108
6.3.2. Yönetici Paneli 109
6.3.3. Değirmen Paneli 114
6.3.4. Pazar Paneli 119
7. SONUÇ VE ÖNERİLER 127
KAYNAKLAR 136
EKLER 155
ÖZGEÇMİŞ 178

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 : Blokzincir Yapısı

Şekil 2.2 : Merkle Tree

Şekil 2.3 : Dünden Bugüne Blokzincir Teknolojisinin Gelişimi

Şekil 2.4 : Blokzincir Türleri

Şekil 2.5 : Blokzincir Yapısı

Şekil 2.6 : Blokzincir Çalışma Süreç Adımları

Şekil 2.7 : Blokzincir Nasıl Çalışır

Şekil 2.8 : Sadeleştirilmiş Blokzincir yapısı

Şekil 4.1 : Blokzincir Teknolojisinin Bazı Sektörlerde Kullanımı

Şekil 4.2 : Geleneksel Tedarik Zinciri Örneği

Şekil 4.3 : Geleneksel Tedarik Zincirinde Blokzincir Teknolojisinin Uygulanması

Şekil 4.4 : Tarım için Blokzincir Teknolojisi: Uygulamalar ve Gerekçe

Şekil 5.1 : MiCA Düzenlemesinin Temel Hedefleri

Şekil 5.2 : Token Türleri

Şekil 5.3 : Blokzincir İşlem Süreci

Şekil 6.1 : Gerçek Dünya Varlıklarının Tokenizasyonu: Blokzincir Mimarisine Dayalı Türkiye Tarım Tokenizasyon Örneği Uygulaması Süreci

Şekil 6.2 : Blokzincir Mimarisine Dayalı Türkiye Tarım Tokenizasyon Örneği Uygulaması Kısıtları ve Zorlukları

Şekil 6.3 : AGROS Üst Düzey Mimari Tasarımı

Şekil 6.4 : AGROS Yönetici Paneli

Şekil 6.5 : AGROS Yönetici Akıllı Kontratı Metodları

Şekil 6.6 : AGROS Yönetici Akıllı Kontratı Kod Örnekleri

Şekil 6.7 : AGROS Yönetici Akıllı Kontratı Örnek İşlem Kayıtları

Şekil 6.8 : AGROS Değirmen Paneli

Şekil 6.9 : AGROS Değirmen Akıllı Kontratı Metodları

Şekil 6.10 : AGROS Değirmen Akıllı Kontratı Kod Örnekleri

Şekil 6.11 : AGROS Değirmen Akıllı Kontratı Örnek İşlem Kayıtları

Şekil 6.12 : AGROS Pazar Paneli

Şekil 6.13 : AGROS Pazar Akıllı Kontratı Metodları

Şekil 6.14 : AGROS Pazar Akıllı Kontratı Kod Örnekleri

Şekil 6.15 : AGROS Pazar Akıllı Kontratı Örnek İşlem Kayıtları

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 : Blokzincir Yapısı

Tablo 2.2 : Mutabakat (Uzlaşı) Algoritmaları

Tablo 2.3 : Mutabakat Algoritmalarının Karşılaştırılması

Tablo 3.1 : Havayolu İşletmelerinde Geleceğe Hitap Eden Startup Projeleri

Tablo 5.1 : Tokenlerin Sınıflandırılması

Tablo 6.1 : Stabil Kripto Paralar ile Emtiaya Dayalı Tokenlerin Karşılaştırması

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Kısaltma	Açıklama
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AGROS	: Agriculture Operating System
ART	: Asset Referenced Token
AT	: Arpa Token
AWS	: Amazon Web Services
BİT	: Bilgi İletişim Teknolojileri
BT	: Buğday Token
BTC	: Bitcoin
CEX	: Centralized Exchange
CFTC	: Commodity Futures Trading Commission
DApps	: Decentralized Applications
DeFi	: Decentralized Finance
DEX	: Decentralized Exchange
DLT	: Distributed Ledger Technology
EMT	: E-Money Token
ERC	: Ethereum Request for Comment
ETC	: Ethereum Classic
ETH	: Ethereum
EVM	: Ethereum Virtual Machine
IBM	: International Business Machine
ID	: Identification
İHA	: İnsansız Hava Aracı
IoT	: Internet of Things
KYC	: Know Your Customer
MiCA	: Markets in Crypto Assets
M.Ö.	: Milattan Önce
MT	: Mısır Token
NFT	: Non-Fungible Token
OCR	: Optical Character Recognition
OS	: Operating System
PDF	: Portable Document Format
RFID	: Radyo Frekansı ID
TRYC	: 1 TL Karşılığı Kripto Varlık Para Birimi
TTP	: Token Transfer Protocol
USD	: United States Dollar
USDT	: 1 USD Karşılığı Tether Kripto Varlık Para Birimi
USDC	: 1 USD Karşılığı Circle'a ait Kripto Varlık Para Birimi
YBM	: Yapı Bilgi Modelleme

ÖZET
DOKTORA TEZİ

BLOKZİNCİR TEKNOLOJİSİ İLE TARIM ÜRÜNLERİ İÇİN BİR TOKENİZASYON TASARIMI VE UYGULAMASI: TÜRKİYE ÖRNEĞİ

Demir Murat AKSOY

İstanbul Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Enformatik Bölümü

Danışman: Prof. Dr. Zümrüt ECEVİT SATI

Blokzincir teknolojisi ile tarım ürünleri için tokenizasyon uygulaması, bilinen kriptoparalar ve NFT'lerden farklı olarak, gerçek dünya varlığına dayalı fiziksel tokenlerden olan emtia tokenleri içinde gerçek dünyada karşılığı olan tarımsal ürünlerin (Buğday, Arpa, Mısır, Fındık vb.) Ethereum blokzincir ağında ERC-20 formatında akıllı kontratlar aracılığı ile tokenleştirilmesi (mint edilmesi), gerektiğinde itfa (burn) edilmesi, tanımlanan kripto varlık cüzdanlarına transfer edilmesi ve bu işlemler ile ilgili kapsamlı blokzincir işlem raporlarının alınması vb. süreçleri yerine getiren bir uygulamadır. Çalışmada, web teknolojileri ve blokzincir ağı içinde tasarlanmış akıllı sözleşmeler ile geliştirilmiş Tarım Ürünleri için Tokenizasyon Uygulaması ile gerçek dünya varlıklarının tokenizasyonu içinde tarımsal ürünlerin blokzincir ağında tokenleştirilerek finansal bir değere dönüştürülmesi aktarılmıştır. Bu sistem ile gerçekleştirilmesi öngörülen temel değer önermeleri başlıca şunlardır: 7/24 açık tarım ürünleri ticaret platformu ve işlem çiftlerinin mümkün kılınması, küresel tarım tokenleri standardının geliştirilmesi, tarımsal emtia tokenleri ile tarım ürünleri yatırım ve ticaretinin demokratikleşmesi, futures işlemlerin yapılabilmesi, son kullanıcıdan yüksek likidite bulma imkânın sağlanması, tarım ürünleri alım-satım anlaşmaları ile yurt içi ve yurt dışı ticaretin kolaylaştırılmasıdır. Tarım Ürünleri için tokenizasyon uygulaması ile üretilen Tarımsal Emtia Tokenleri ile tarım ürünlerine yatırım tabana yayılarak ülkemizde ve dünyanın herhangi bir yerindeki herhangi bir insanın istediği miktarda tarım ürününe 7/24 yatırım yapmasının önü açılmış olmaktadır. Böylelikle tarımsal emtia yatırımcı sayısının artırılıp tabana yayılmasıyla birlikte tarımsal ürün fiyatlarının daha adil, katılımcı ve demokratik oluşumu sağlanmış olmaktadır. Tarım Ürünleri için Tokenizasyon Uygulaması ile ulaşılması planlanan hedeflerden biri de; dünya hububat ticaretinin %90'ından fazlasını oluşturan Buğday, Arpa, Mısır gibi tarımsal ürünleri tokenleştirmenin sonrasında global fındık üretiminin yaklaşık %70'ini oluşturan ülkemize ait en önemli stratejik tarımsal ürünlerden olan fındık ürününü tokenleştirmek ve minimum bir yıllık depolama ömrü olan ayçiçeği tohumu, kuru kayısı, kabuklu antep fıstığı, fasülye, pamuk, mercimek, nohut, zeytin, çeltik, soya fasulyesi, tritikale, çavdar, keten tohumu, yulaf gibi tarımsal ürünleri içerecek şekilde tokenizasyon platformunu genişletmektir.

Temmuz 2025, 178 sayfa.

Anahtar kelimeler: Blokzincir, Blokzincir Teknolojisi, Token, Tokenizasyon, Tarım, Tarım Sektörü, Tarım Ürünleri, Tarım Sektöründe Tokenizasyon, Tarım Sektöründe Blokzincir

SUMMARY
Ph.D. THESIS

A TOKENIZATION DESIGN AND IMPLEMENTATION FOR AGRICULTURAL PRODUCTS WITH BLOCKCHAIN TECHNOLOGY: THE CASE OF TÜRKİYE

Demir Murat AKSOY

Istanbul University
Institute of Sciences
Department of Informatics

Supervisor: Prof. Dr. Zümrüt ECEVİT SATI

The tokenization application for agricultural products with blockchain technology, unlike known cryptocurrencies and NFTs, is an application that tokenizes (mints) agricultural products (wheat, barley, corn, hazelnuts, etc.) in the real world via smart contracts in the ERC-20 format on the Ethereum blockchain network, redeems them (burns) when necessary, transfers them to defined crypto asset wallets and generates comprehensive blockchain transaction reports related to these transactions. In this study, the Tokenization Application for Agricultural Products, developed with web technologies and smart contracts designed within the blockchain network, is presented. Within the scope of the tokenization of real-world assets, the conversion of agricultural products into financial value by tokenizing them on the blockchain network is explained. The main value propositions envisioned to be realized with this system are: enabling a 24/7 agricultural products trading platform and transaction pairs, developing a global agricultural token standard, democratizing agricultural commodity investment and trade with agricultural commodity tokens, enabling futures transactions, providing the opportunity to obtain high liquidity from end users and facilitating domestic and international trade through agricultural product purchase and sale agreements. With the Agricultural Commodity Tokens generated through the tokenization application for agricultural products, investment in agricultural products is broadened, paving the way for anyone in our country or anywhere in the world to invest in any amount of agricultural products 24/7. Thus, by increasing and expanding the number of agricultural commodity investors, a more equitable, participatory and democratic formation of agricultural product prices is ensured. One of the objectives planned to be achieved with the Tokenization Application for Agricultural Products is; After tokenizing agricultural products such as wheat, barley and corn, which constitute more than 90% of the world's grain trade, the aim is to tokenize hazelnuts, which are one of the most important strategic agricultural products of our country, which constitutes approximately 70% of global hazelnut production and to expand the tokenization platform to include agricultural products with a minimum storage life of one year, such as sunflower seeds, dried apricots, pistachios in shell, beans, cotton, lentils, chickpeas, olives, rice, soybeans, triticale, rye, flaxseed and oats.

July 2025, 178 pages.

Keywords: Blockchain, Blockchain Technology, Token, Tokenization, Agriculture, Agriculture Sector, Agricultural Products, Tokenization in the Agriculture Sector, Blockchain in the Agriculture Sector

1. GİRİŞ

Bilgi, 21.yüzyılda kurumlar, firmalar ve devletler için en büyük güçtür. Bilgiye giden dönüşümde ise veriler hammadde olarak toplanmakta, sınıflandırılmakta ve işlenip enformasyona ve bilgeliğe dönüşerek anlam kazanmaktadır. Bilgi Piramidi (DIKW - Data Information Knowledge Wisdom) Hiyerarşisi, "veri", "bilgi", "kazanılmış bilgi" ve "bilgelik" kelimelerinin birleşiminden oluşur ve verinin bilgeliğe dönüşüm yolculuğunu açıklamaktadır (Zeleny, 1987). Anlamsız verileri anlamlı hale getirmek için kullanılan hiyerarşik bir yöntemdir. Günümüzde her konuda her alanda inanılmaz yoğunlukta veri üretilmekte ve bu verinin kolay, hızlı ve anlam çıkarılabilir bilgi ve bilgelikler üretecek şekilde depolanması, analiz edilmesi ve yönetilmesi gerekmektedir (Ackoff ve Lucky, 1989). Bu doğrultuda, merkezi veritabanı yönetim yaklaşımları ve sistemleri ortaya çıkmıştır ve farklılaşan ihtiyaçlar ile her geçen gün daha da gelişmektedir. Yeni veritabanı yönetim yaklaşımlarının ve sistemlerinin gelişmesinde, güvenlik, performans ve denetim gibi kavramlar ön plana çıkmıştır (Önder, 2005).

Geleneksel merkezi veritabanı yönetim sistemlerinin artıları ve eksileri birçok çalışma ile ortaya konulmuştur. Özellikle veri güvenliği ve verinin korunması öncelikli konu haline gelmiştir. Veritabanı yönetim sistemlerine karşı siber saldırı yöntemleri her geçen gün artmakta ve kötü niyetli saldırganların yöntemleri değişmekte ve gelişmektedir (Vural ve Sağıroğlu, 2010). Yönetim bilişim sistemlerinde merkezi bir role sahip veritabanı yönetim sistemlerinin yanı sıra, Bitcoin'in 2008'de ortaya çıkmasıyla blokzincir veri yönetim altyapısı ve teknolojileri de önem kazanmıştır (Nakamoto, 2008). Blokzincir; merkezi bir otorite veya bir aracı mekanizma olmaksızın, işlemlerin güvenli ve şeffaf bir şekilde gerçekleştirilebildiği ve bu işlemlerden oluşan verilerin değiştirilmesinin ve silinmesinin neredeyse mümkün olmadığı merkeziyetsiz dağıtık bir veri saklama yöntemidir (Yıldız, 2021). Dağıtık veri yönetim mimarisi ile birlikte değiştirilemez, tutarlı ve kendi kendine güvenliğini, bütünlüğünü sağlayan otonom sistem mutabakat kuralları ile başta finans ve bankacılık olmak üzere birçok alanda blokzincir veri yönetim altyapısı ve teknolojileri kullanılmaya başlamıştır (Yıldız, 2021). Son yıllarda ciddi oranda üzerinde uygulama geliştirilmiş ve yüksek kullanıcı sayılarına ulaşarak yaygınlaşmış olan Blokzincir altyapılarının, diğer merkezi veritabanı yönetim sistemlerine göre getirdiği yenilikler, avantajları ve aynı zamanda zaafiyet noktaları konusunda araştırmalar devam etmektedir (Kakavand ve diğ., 2017).

Blokzincir teknolojisi ilk olarak; Satoshi Nakamoto, 2008 yılında "Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System" isimli makalesiyle ortaya atılmış, klasik veritabanı teknolojilerinin merkeziyetçiliğine, müdahale edilebilirliğine ve değiştirilebilirliğine karşı çözüm olarak sunulmuştur. 2009 yılında ise Bitcoin blokzincir ağı başlatılarak ilk blok olan Genesis Block (Blok 0) oluşturulmuştur veya Bitcoin madenciğinde kullanılan terimi ile kazılmıştır. İlk Bitcoin transferi de yine 2009 yılında Nakamoto tarafından Hal Finney'e gönderilmiştir. 2013 yılında, Vitalik Buterin, Ethereum blokzincir ağının teknik detaylarını içeren whitepaper'ı yayımlamıştır. 2015 yılında ise Ethereum ağı resmen başlamıştır. Bitcoin'in piyasa değeri 2013 yılında 1 milyar doları aşmıştır. Günümüzde ise 2017 yılında EOS tarafından yerel kripto para birimi olarak desteklenen yeni bir blokzincir protokolünün tanımlanmasının akabinde, 2018 yılından bugüne kadar; blokzincir uygulamaları finans, bankacılık, sigorta, tekstil, gayrimenkul ve inşaat, sağlık, eğitim, lojistik ve taşımacılık, enerji, turizm ve konaklama, tarım, gıda, endüstriyel üretim, vb. başta olmak üzere birçok sektörde işletime alınmıştır (Casino ve diğ., 2019).

"Blokzincir Teknolojisi ile Tarım Ürünleri için Bir Tokenizasyon Örneği Tasarımı ve Uygulaması: Türkiye Örneği" başlıklı tez çalışmasının amacı, Türkiye'deki tarım sektörüne yönelik, tarım kökenli emtianın (örneğin buğday) blokzincir teknolojisi ile tokenleştirilerek dijital varlıklara dönüştürülmesini sağlamaktır. Bu bağlamda, blokzincir mimarisi ve akıllı kontratlar kullanılarak, tarım ürünleri temelli emtia tokenlerinin finansal piyasalarda kullanılabilirliğini artıran bir sistem tasarlanmıştır. Bu yeni finansal varlık sınıfı, tarım ürünlerinin değerini dijital ortamda güvenli ve şeffaf bir şekilde temsil etmeyi amaçlayarak hem yerel hem de küresel piyasalarda yeni fırsatlar yaratmayı hedeflemektedir. Bu sistemin tarım ekonomisini dönüştürme potansiyeli, riskleri azaltma ve likiditeyi artırma gibi faydalarla sektöre önemli katkılar sağlaması beklenmektedir. Tezin temel hedefleri aşağıda listelenmektedir:

- Buğdaydan başlayarak, tarım kökenli emtiaya dayalı emtia tokenler ile blokzincir mimarisi içinde akıllı kontratlar kullanılarak yeni bir finansal varlık sınıfı oluşturmak,
- Blokzincir tabanlı yeni bir tarımsal global pazar oluşturmak ve blokzincir teknolojisinin sağladığı şeffaf ve merkeziyetsiz değer transferi imkanını tarım endüstrisine uyarlamak,
- Üretilen tarımsal emtia tokenleri ile tarım ürünlerine yatırım tabana yayılarak ülkemizde ve dünyanın herhangi bir yerindeki herhangi bir insanın istediği miktarda tarım ürünlerine 7/24 yatırım yapmasının önünü açmak,
- Tarımsal emtia yatırımcı sayısının artırılıp tabana yayılmasıyla birlikte tarımsal ürün fiyatlarının daha adil, katılımcı ve demokratik oluşumunu sağlamak,
- Tarım ürünlerinin dijitalleşmesi yoluyla tarım sektöründe şeffaflık ve güven

oluşturmak; bu sayede üreticiler ile yatırımcılar arasında güven ilişkisini güçlendirmek,

- Akıllı kontratlar ve tokenizasyon aracılığıyla tarım sektöründeki tedarik zincirinin izlenebilirliğini artırmaya ve ürünlerin üretiminden nihai tüketime kadar olan süreçlerin her aşamasının kaydedilmesini sağlamaya destek olmak,
- Tarım ürünlerine dayalı tokenlerin ticaretini kolaylaştırarak, tarım ürünleri ile ilgili finansal araçların çeşitlendirilmesini sağlamak ve böylece sektörde daha fazla finansal inovasyonun önünü açmak,
- Çiftçilere yönelik finansal erişim imkânlarını artırmak ve blokzincir teknolojisi ile küçük ve orta ölçekli tarım işletmelerinin finansal piyasaya entegrasyonunu sağlamak,
- Blokzincir tabanlı bir platform üzerinden uluslararası tarım ticaretini kolaylaştırmak ve böylece tarım sektörünün küresel ölçekte daha etkin ve hızlı bir şekilde işlem görmesini sağlamak.

Tez kapsamında, blokzincir teknolojisinin akıllı kontratlar aracılığıyla gerçek dünya sorunlarına yönelik sunduğu pragmatik çözümler, tarım kökenli emtianın tokenizasyonu ve bu tokenlerin finansal sistemdeki rolü üzerinden bir uygulama örneğiyle detaylı bir şekilde incelenmiştir. Web teknolojileri ve blokzincir ağı içinde tasarlanmış akıllı kontratlar ile geliştirilmiş Türkiye Tarım Token Sistemi uygulaması ile gerçek dünya varlıklarının tokenizasyonu içinde tarımsal ürünlerin blokzincir ağında tokenleştirilerek finansal bir değere dönüştürülmesi süreci ele alınmıştır.

Blokzincir yapısı ve ağı içinde dijital bir sözleşme olan akıllı kontrat, blokzincir ağında bir işlem bloğu biçiminde eklenen veya kurulan yazılım parçalarıdır (Karafiloski ve Mishay, 2017). Bu blokzincir tabanlı dijital sözleşmeler, kendi geleneksel muadil sözleşmeleri gibi sözleşme politikalarını belirleyen aynı detayları içermektedir ve belli şartlar yerine geldiğinde otomatik olarak, aracılara veya merkezi bir otoriteye ihtiyaç duymadan çalışmakta ve blokzincir ağında bloklarda ilgili işlem kayıtlarını oluşturmaktadır (Karafiloski ve Mishay, 2017). Geleneksel sözleşmeler yerine akıllı kontrat sözleşmeleri, müzakere ve manuel çaba gerektirmeden belli şartlar yerine geldiğinde çalışan, ilgili formalite ve maliyetleri neredeyse sıfırlayan ve bu şekilde ilgili işlemin doğrulamasını dijital olarak yapıp, blokzincir ağının şeffaf ve değiştirilemez yapısı ile ilgili işlemi blokzincir ağına kaydeden ve birçok alanda uygulama alanı bulabilen bir yapı sunmaktadır (Christidis ve Devetsikiotis, 2016).

Tarım Ürünleri için Tokenizasyon Örneği; kriptoparalar ve NFT'lerden (non-fungible tokenlerden) farklı olarak, varlığa dayalı fiziksel tokenlerden olan emtia tokenleri gerçek dünyada karşılığı olan tarımsal ürünleri (Buğday, Arpa, Mısır, Fındık vb.) Ethereum blokzincir ağında ERC-20 formatında akıllı kontratlar aracılığı ile tokenleştirilmesi (mint edilmesi), gerektiğinde itfa (burn) edilmesi, tanımlanan kripto varlık cüzdanlarına transfer edilmesi ve bu işlemler ile ilgili kapsamlı blokzincir işlem raporlarının alınması vb. süreçleri yerine getiren bir uygulamadır. Tarım Ürünleri için Tokenizasyon Örneği'nin kavramsal tasarımına baz teşkil eden özellikleri ise hisse ispatı algoritması kullanılması ve AGROS - Agriculture Operating System üzerinde kurulan uygulamanın temelde üç panelden oluşmasıdır: 1. Yönetim Paneli 2. Değirmen Paneli 3. Pazar Paneli. Söz konusu panellerin kavramsal tasarımına uygun olarak sistemin işeyişinde; web tabanlı ve akıllı kontratlar, kripto cüzdanları ile sisteme giriş, çoklu imza (multisignature) yapısı ile onaylanan süreçler bulunmaktadır.

Tez çalışması kapsamında geliştirilen Tarım Ürünleri için Tokenizasyon Uygulaması'nın temel avantajları olarak; merkezi olmayan dağıtık mimari yapısı, güvenlik, düşük manipülasyon riski, doğruluk, değişmezlik, şeffaflık, anonimlik, düşük maliyet ve hız sayılabilir. Bunlara karşıt olarak da hukuki düzenlemeler ve regülasyonların eksikliği, maliyet ve enerji tüketimi durumu, gizlilik ve güvenlik riskleri, performans ile ölçeklendirebilirlik konusu ise dezavantajları olarak sayılabilir. Bu sistem ile gerçekleştirilmesi öngörülen temel değer önermeleri şu noktalarda toplanabilir: 7/24 açık ticaret platformu ve işlem çiftlerinin mümkün kılınması, küresel tarım tokenleri standardının geliştirilmesi, emtia tokenleri ile ticaretin demokratikleşmesi, emtia tokenleri ile futures işlem yapılabilmesi, son kullanıcıdan yüksek likidite bulma imkânının sağlanması, tarım ürünleri yatırımının demokratikleşmesi, tarım ürünleri alım-satım anlaşmaları ile yurt içi ve yurt dışı ticaretin kolaylaştırılmasıdır. Tarım Ürünleri için Tokenizasyon Örneği ile üretilen Tarımsal Emtia Tokenleri ile tarım ürünlerine yatırım tabana yayılarak ülkemizde ve dünyanın herhangi bir yerindeki herhangi bir insanın istediği miktarda tarım ürününe 7/24 yatırım yapmasına olanak sağlanmış olunmaktadır. Tarım Token Sistemi ile ulaşılması hedeflenen amaçlardan biri, öncelikle dünya hububat ticaretinin %90'ından fazlasını oluşturan buğday, arpa ve mısır gibi tarımsal ürünlerini kapsayan bir tokenizasyon platformu oluşturmaktır, sonrasında ise global fındık üretiminin yaklaşık %70'ini gerçekleştiren ülkemizin en stratejik tarımsal ürünlerinden biri olan fındığı da kapsayacak şekilde tokenizasyon platformunu genişletmektir. Ayrıca, bir yıllık depolama ömrüne sahip ayçiçeği tohumu, kuru kayısı, kabuklu antep fıstığı, fasulye, pamuk, mercimek, nohut, zeytin, çeltik, soya fasulyesi, tritikale, çavdar, keten tohumu ve yulaf vb. tarımsal ürünlerin de sisteme entegre edilmesi planlanmaktadır.

2. BLOKZİNCİR KAVRAMI VE TEKNOLOJİSİ, GETİRDİĞİ YENİLİKLER VE AVANTAJLARI

2.1 BLOKZİNCİR KAVRAMI, TARİHSEL GELİŞİMİ VE GELECEĞİ

Blokzincir teknolojisi, ilk olarak 2008 yılında Satoshi Nakamoto tarafından yayımlanan "Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System" başlıklı makalede tanımlanmış ve Bitcoin'in temel altyapısı olarak sunulmuştur (Nakamoto, 2009). Bu erken dönem tanımı, blokzincir teknolojisinin merkeziyetsiz, güvenli ve şeffaf bir dijital para transferi sistemi olarak işlev göreceğini vurgulamıştır. Zamanla, blokzincir, dijital para birimlerinin ötesine geçerek, finansal hizmetler, tedarik zinciri yönetimi ve veri güvenliği gibi pek çok farklı alanda da kullanılmaya başlanmıştır. 2013 yılında Vitalik Buterin, Ethereum blokzincir ağı ile blokzincir teknolojisini daha da geliştirerek, akıllı kontratlar ve merkeziyetsiz uygulamaların kullanımını mümkün kılacak bir platform yaratmıştır (Buterin, 2013). Bu dönemde blokzincir, yalnızca finansal işlemler için değil, aynı zamanda daha geniş bir veri yönetim altyapısı olarak da tanımlanmıştır (Narayanan ve diğ., 2016). Günümüzde, blokzincir teknolojisi, her sektördeki veri güvenliği, şeffaflık ve izlenebilirlik ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılan evrimleşmiş bir sistem haline gelmiştir. Bu teknolojinin kullanım alanları, sağlık, eğitim ve tarım gibi daha önce blokzincir ile ilişkilendirilmemiş sektörlere kadar genişlemiştir, böylece teknolojinin işlevselliği ve etkisi sürekli olarak artmaktadır (Tapscott ve Tapscott, 2016). Blokzincir teknolojisi, merkezi bir otorite veya bir aracı mekanizma olmaksızın işlemlerin güvenli ve şeffaf bir şekilde gerçekleştirilebildiği ve bu işlemlerden oluşan verilerin değiştirilmesinin ve silinmesinin neredeyse mümkün olmadığı merkeziyetsiz bir veri saklama yöntemidir (Gerdan, 2019).

Blokzincir teknolojisi, farklı alanlar veya kesimler için farklı kavramlar ifade eden bir terimdir (Arslaner, 2022):

- Yazılım geliştiriciler için merkezi olmayan bir ağda verileri güvenli ve şeffaf bir şekilde depolamaya yarayan veri saklama yöntemi ve şifreleme tekniğidir.
- Diğer teknoloji uzmanları için yeni nesil Web3 diye adlandırılan internet altyapısının arkasındaki itici teknolojidir.
- Finans uzmanları için dijital veya kripto para birimlerinin altında yatan teknik ve teknolojidir.
- Girişimci ve yıkıcı düşünceler üreten beyinler için ise toplumsal yapıyı ekonomik ve sosyal açıdan merkezi otoriteye ihtiyaç kalmayacak şekilde kökten şekillendirmek ve yeniden inşa etmek için kullanılabilecek çok önemli bir araçtır.

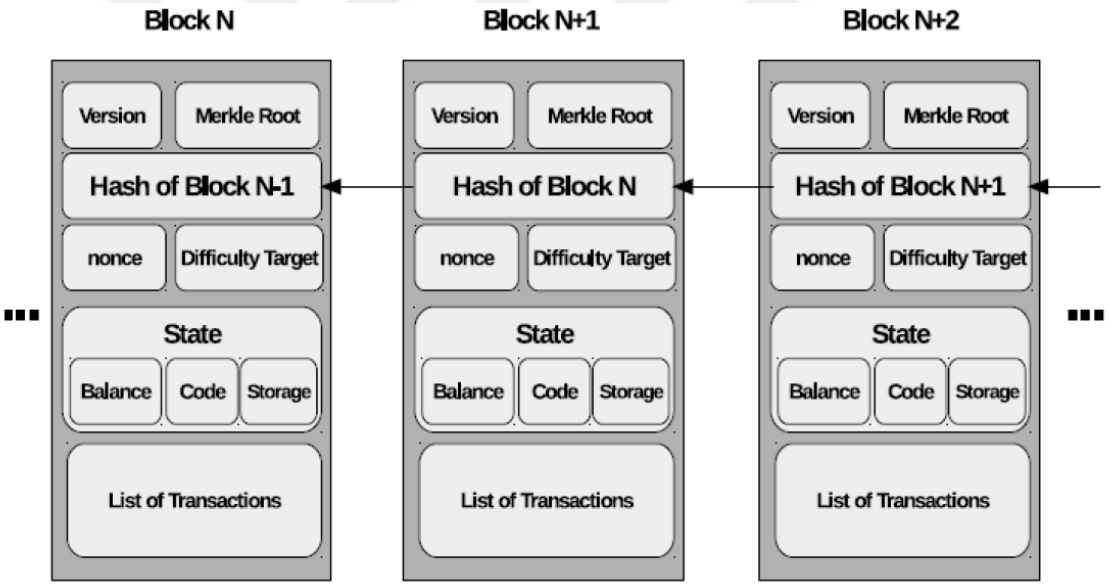
Dünya Ekonomik Forumu'nun 2019 yılında yayınladığı "Tedarik Zincirilerinde Kapsayıcı Blokchain Kullanımı" raporunda ise Blokzincir teknolojisi ile ilgili aşağıdaki ana noktalar ve kavramlar vurgulanmıştır (World Economic Forum, 2019):

- Blokzincir, toplu işlemleri içeren kriptografik olarak bağlantılı blokların oluşturduğu bir zincir yapısıdır.
- Her bir işlem, gerçekleştikten çok kısa bir süre sonra blok içine eklenerek blok belli bir boyuta ulaştıktan sonra nihai haline getirilir.
- Bloklar arasındaki zincir sırası ve bağı bir takım matematiksel algoritmalar ile sağlanmıştır.
- Blokzincir ağı, ağ düğümleri olarak adlandırılan blokzincir ağına katılan kullanıcı bilgisayarlarından oluşur.
- Blokzincir ağı, ağ düğümleri tarafından, bir ağ yönetim protokolü ile çoklu katılım ile yani merkezi olmayan bir yapı ile yönetilir ve ağda gerçekleşen her bir işlem bloklara eklenmeden önce ağ düğümleri tarafından doğrulanır ve onaylanır.
- Her ağ düğümü, Blokzincirde o zamana kadar doğrulanmış, onaylanmış ve kaydedilmiş tüm işlemleri yani işlemlerden oluşan blokları tam, doğru ve eksiksiz bir şekilde veri kaydını tutar.
- Tek bir blokzincir ağ düğümü bir işlemi veya bloğu değiştiremez veya silemez.
- Ağ düğümleri, blokzincir yönetim protokolü fikir birliği mekanizması vasıtasıyla bloklara dahil edilecek işlemler üzerinde toplu olarak anlaşır ve sonrasında işlemler bloklara mutabakla eklenmiş olur.

Blokzincir tanımını tekrar yapmak gerekirse; bir takım kriptografik algoritmalarla şifrelenmiş işlemleri ve verileri içeren blokların birbirlerine zincirlenerek meydana getirdikleri blokların merkezi olmayan, dağıtık yani merkezi bir veritabanı yapısında değilde blokzincir ağındaki kullanıcıların bilgisayarlarında çoklu kopyalı bir şekilde tutulan ve güncellenen bir veri kayıt sistemi olduğunu söyleyebiliriz. Blokzincir teknolojisinin, altyapısının bir merkeze bağlı olmadan yani merkeziyetsiz işlem yapması demek işlemi talep eden kullanıcılar ile işlemi sunan kullanıcılar arasında üçüncü bir aracının, otoritenin olmaması anlamına gelmektedir.

Blokzincir yapısı itibariyle dağıtık bir veri kayıt sistemidir, yani blokzincir ağında bulunan bütün kullanıcılarda veya düğümlerde aynı işlem kayıt geçmişine sahip bloklar tutulmaktadır; İşlemlerden bloklar oluşur, bloklardan blokzincir oluşur ve blokzincir ise ağı oluşturan bütün düğümlerde dağıtık bir şekilde tutulur ve işlemler yapıldıkça güncellenerek yani blokzincir büyüyerek devam eder (Bashir, 2017). Blokzincir teknolojisinin diğer bir özelliği ise klasik veritabanı sistemlerinde veri ekleme, güncelleme ve silme işlemleri yapılabilirken, blokzincir'deki bloklara kullanıcılar tarafından doğrulanarak kaydedilen işlem veya veri silinemez ve güncellenemez. Bashir'e (2017) göre, blokzincirde doğrulanan işlemlerin ve verilerin değiştirilemez ve silinemez olması, blokzincir teknolojisine olan güvenin önemli gerekçelerinden birini oluşturmaktadır.

Bir blokzincir yapısı basitçe Şekil 2.1'deki gibi gösterilebilir:

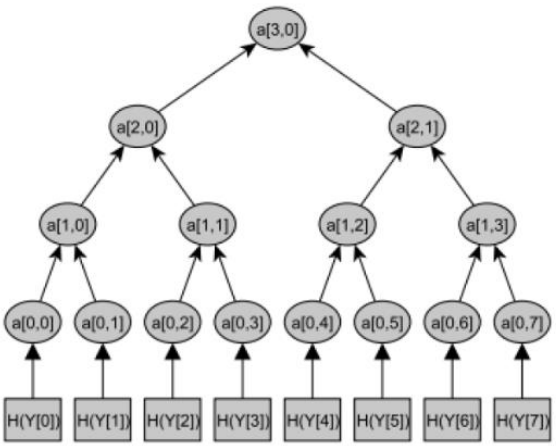


Şekil 2.1: Blokzincir Yapısı (Dorri ve diğ., 2017)

Blokzincirde bulunan blokların yapısını oluşturan ve yukarıdaki şekilde belirtilen bazı temel kavramların açıklamaları aşağıdaki Tablo 2.1'de belirtilmektedir:

Tablo 2.1: Blokzincir Yapısı (Dorri ve diğ., 2017)

	Blok yapısı temel kavramlar	
1	index	Blokzincir'deki bloğa ait sıra numarasını gösterir. Örneğin ilk bloğun index bilgisi 0'dır
2	hash	Blokta bulunan verilerin hash fonksiyonuna girdikten sonra çıkan sonucu gösterir.
3	previousHash	Bloğun kendinden önceki bloğa ait hash değerin gösterir.
4	timesamp	Bloğun oluşturulduğu zamanı gösterir, bir nevi bloğun zaman damgasıdır.
5	nonce	Blok yaratma, yani madencilik işlemlerinde kullanılan 32 veya 64 bitlik sayılardır.
6	numTx	Bloğun içindeki toplam işlem sayısını gösterir.
7	transactions	Blokta yer alan tüm işlemlerin bulunduğu işlemler dizisidir.
8	Merkle Tree	Blokta yer alan işlemlerin hash değerleri Merkle tree'nin en alt seviye (child) yapraklarını oluşturmaktadır. Yapraklar 2'li gruplar halinde hash fonksiyonuna sokularak bir üst seviye (parent) yaprak değeri oluşturulur. Bu işlem Merkle tree'nin en üst seviye kök düğüm değeri oluşana kadar devam eder.



Şekil 2.2: Merkle Tree (Becker, 2008)

Blokzincir, birtakım kriptografi algoritmaları ile şifrelenmiş işlemlerin bloklar halinde daha doğrusu blok ismi verilen gruplar halinde kaydedildiği ve tüm katılımcıların doğruladığı ve paylaştığı bir dijital defterdir (Li ve diğ., 2020). Bu dijital defter, blokzincir ağı içerisindeki katılımcılar veya kullanıcılar tarafından gerçekleştirilen tüm işlemlerin kayıt altında tutulduğu bir veritabanına benzetilebilir ve veritabanının kopyası ise işlemleri doğrulayıcı olan katılımcıların veya kullanıcıların bilgisayarlarında yani dağıtık olarak blokzincir ağındaki kullanıcılarda bulunmaktadır. Her blok, blokzincir ağı katılımcıları tarafından doğrulama ve bir fikir birliği kararından geçtikten sonra, bir önceki bloğa, bir önceki bloğun kriptografik hash değeri ile bağlanır (Monrat ve diğ., 2019). Kriptografik hash değeri ise blok içindeki işlem kayıtlarının hash algoritması ile şifrelenmesi sonucu oluştuğundan, böylelikle blokzincire yeni bloklar eklendikçe eski blokların değiştirilmesi daha zor hale gelir, bu durum blokzincirin içindeki işlemlerin ve verilerin kötü niyetli bir şekilde değiştirilme riskine karşı direnç oluşturur (Li ve diğ., 2020). Blokzincir teknolojisinin sunduğu en hayati değer, daha doğrusu blokzincir kavramının arkasındaki en önemli itici güç, işlemler için merkezi bir otoriteye, banka veya aracı kurumlar gibi üçüncü taraflara ihtiyacı ortadan kaldırmasıdır (Seirawan, 2019). Tüm blokzincir ağ katılımcıları istedikleri zaman ağa erişerek işlem yapabilirler ve doğrulayabilirler. Böylelikle tüm sistem katılımcıları birbirlerini adeta kontrol ederek ve doğrulayarak bu sayede verinin manipülasyonu kolaylıkla engellenebilir ve blokzincirin tutarlılığı korunabilir. Blokzincir katılımcılarının kendileri blokzincir sisteminin çalışmasını garanti ederler.

Blokzincir teknolojisinin bilimsel anlamda ortaya çıkışı, 1980'lerde dijital imzalar, Merkle ağaçları ve kriptografi üzerine yapılan çalışmalarla başlamış, 2009 Ocak ayında Bitcoin blokzincir ağının ilk Genesis bloğunun oluşturulmasıyla zirveye ulaşmıştır (Nakamoto, 2008; Antonopoulos, 2017). Bu süreç, merkezi otoritelerin dayattığı kısıtlamalar ve sistemsel hantallıklara karşı bir başkaldırı ve meydan okuma olarak şekillenmiş; ardından yeni özelliklerle güçlendirilmiş farklı blokzincir ağlarının gelişimine olanak sağlamıştır (Tapscott ve Tapscott, 2016; Yermack, 2017). Merkezi otoriteler, küresel şirketler ve finans kuruluşları, kişisel veriler üzerinden merkezi dayatmalar uygulayabilmekte; müşterilerden aldıkları yüksek komisyonlarla merkezi sistemlerini daha da büyütmektedir (Iansiti ve Lakhani, 2017; Chen ve Bellavitis, 2020). Buna karşılık, alternatif bir düzen ortaya çıkmıştır: merkezi olmayan ve aracısız, kendi kendine otonom çalışabilen demokratik bir yapı olan blokzincir teknolojisi (Swan, 2015; Mougayar, 2016). Bu yapı, blokzincir ağındaki katılımcılar tarafından kolektif olarak yönetilmekte ve sürekli gelişmektedir. Ayrıca bu ağlarda yapılan işlemlerin verileri, bloklar halinde zincirlenerek saklanmakta; bu saklama işlemi, merkezi veri tabanları yerine tüm ağ katılımcılarına dağıtılarak gerçekleştirilmektedir (Narayanan ve diğ., 2016; Zheng ve diğ., 2017).

Bu yeni yapının özü ise matematik, daha özelde ise kriptografi bilimidir. Blokzincir teknolojisinin temelini oluşturan bu bilim dalı, dijital ortamda veri bütünlüğü, kimlik doğrulama ve gizlilik sağlamak için kullanılır (Narayanan ve diğ., 2016; Menezes ve diğ., 1996). Kriptografinin sunduğu bu güvenlik olanakları sayesinde, ilgili taraflar arasında veri alışverişi güvenli bir şekilde yapılabilirken; yetkisiz, ilgisiz ya da kötü niyetli tarafların veriye ulaşması engellenmektedir (Zheng ve diğ., 2017; Li ve diğ., 2020). Blokzincirin çalışma prensipleri; dijital imzalar, hash fonksiyonları ve kamu-özel anahtar şifreleme sistemleri gibi kriptografik yapı taşlarına dayanmaktadır (Becker, 2008; Antonopoulos, 2017). Kriptografinin gücüne ve bireysel mahremiyetin korunmasına inanan bazı savunucular, 1990'lı yıllarda kamuoyuna çeşitli bildiriler yayımlayarak "Şifrepunk Hareketi"ni (Cypherpunks) başlatmıştır (Back, 1997; Güven ve Şahinöz, 2018). Bu hareket, bireylerin dijital ortamda devletler ve büyük kurumlar tarafından izlenmeye karşı korunması gerektiğini savunarak, mahremiyetin bir hak olduğu ilkesinden yola çıkmıştır (Antonopoulos, 2017; Tapscott ve Tapscott, 2016).

Blokzincir teknolojisinin temelindeki ana kavramlar, somut olarak 1980'lerin sonunda ve 1990'ların başında ortaya çıkmıştır. Usta ve Doğantekin'in (2017) yazdığı "Blokzincir 101" isimli çalışmada vurgulanan aşağıdaki noktalar önemlidir (Usta ve Doğantekin, 2017):

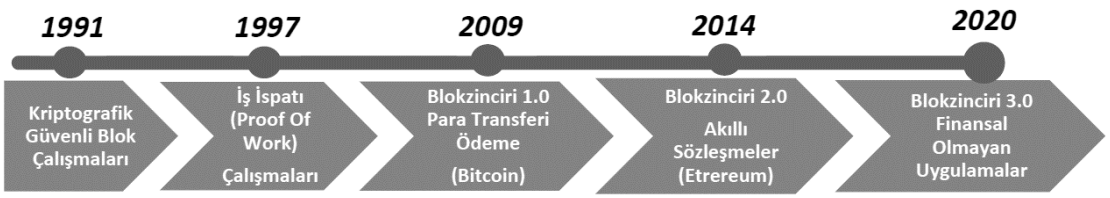
- Blokzincir teknolojisinin temelinde "Kriptoloji bilimi" yatmaktadır.
- Yüzlerce yıldır üretilen ve ortaya çıkan veriler, kayıt altına alınırken beliren kritik gereksinimlerden bir tanesi, veriyi istenmeyen kişilerden gizlemek ve korumak olmuştur.
- "Kriptoloji" kelimesi eski bir Yunanca sözcük olan "kryptos" kelimesinden türetilmiştir. Kryptos "gizlilik" anlamına gelirken, kriptoloji ise "gizlilik bilimi" anlamına gelmektedir.
- Kriptoloji'nin bir alt dalı olan "Kriptografi" kelimesi ise yine eski bir Yunanca kelime olan ve "yazı" anlamına gelen "graphien" sözcüğü kullanılarak türetilmiştir.
- Kriptografi(cryptography) kelimesi, verilerin(yazıların) belli kurallar dahilinde şifrelenmesi anlamına gelmektedir.
- Kriptografi, bir veriyi bir kurallar seti kullanılarak ilgisi olamayan kişiler tarafından anlaşılamayan başka bir veriye dönüştürmektedir.
- Bu ortaya çıkan yeni veri ise sadece şifreleme yapılırken kullanılan kuralları bilenler tarafından orijinal haline geri dönüştürülebilir, diğer kişiler için ise bir anlam ifade etmez.

Şifrepunk hareketi'nin (Cypherpunks) kurucularından olan bilgisayar bilimci "David Chaum"un ortaya koyduğu, "dijital imza (digital signature - electronic signature)" uygulaması ve ödeme

sistemleri teknolojik yapıları ile ilgili öncü çalışmaları blokzincir teknolojisinin temellerini oluşturmuştur (Chaum, 1983-1985). Haber ve Stornetta (1991) tarafından ortaya koyulan “How to Time-Stamp a Digital Document” adlı makale ile güvenli bir şekilde taraflar arası şifreli olarak veri blokları iletimi yapılmıştır. Güven ve Şahinöz (2018) tarafından ortaya konulan çalışmada, blokzincir teknolojisinin ortaya çıkmasına kadarki süreç madde madde ele alınmıştır:

- Hascah sistemi: “Adam Back”, Bitcoin blokzincir ağ mimarisinde kullanılan iş ispatı mutabakat algoritmasına benzer "Hashcash" sistemini geliştirmiştir (Back, 1997),
- Bit Gold sistemi: Şifrepunk hareketinin öncülerinden olan “Nick Szabo” tarafından ortaya konulan ve Bitcoin blokzincir ağının da habercisi, öncüsü olarak kabul edilen "Bit Gold" isimli kripto para çalışması,
- Bmoney sistemi: “Wei Dai” tarafından geliştirilen “Bmoney” adlı kripto para sistemi (Dai, 1998),
- Hal Finney çalışması: Bitcoin blokzincir mimarisinin temelinde yer alan iş ispatı sistemini kullanan ve ilerleten “Hal Finney”, çalışmasını 2005 yılında geliştirmiştir.

1990'lı yıllardan 2008 yılında dünya finans devi Lehman Brothers’ın iflasından sadece iki ay sonra ortaya çıkan kimliği hâlâ gizliliğini koruyan Satoshi Nakamoto takma adlı kişi veya bir grup tarafından yayınlanan “Bitcoin: Eşten Eşe Elektronik Nakit Ödeme Sistemi (Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System)” başlıklı çalışmanın özünde verdiği temel mesaj: “Ey insanlar! Birbirinizi tanıyın veya tanımayın, artık merkezi yapılara ihtiyaç duymadan güvenli bir veri kayıt sistemi kurmak mümkün. Bu sistem, matematik ve teknolojinin imkanlarını kullandığı için manipüle edilemez ve bozulamaz.” (Usta ve Doğantekin, 2017). Temelde; veri, veritabanı, iletişim ağları ve kriptografi gibi kavramlar üzerine oturan blokzincir teknolojisinin merkeziyetsiz ama güvenli bir veri kayıt sistemi sağlayan bir iletişim ağı sunduğu çok net ortadadır. Nakamoto takma adlı kişinin 2008 Ekim ayında şifrepunk e-posta gruplarına ilettiği dokuz sayfalık bu teknik çalışmada, merkezi otoriteye ve sistemlere dayalı mevcut finansal sistemlerin zayıflıklarından bahsedilmiş, temeli kriptografiye dayalı dijital para yaratma, basma, iletme ve bu işlemleri onaylama için merkezi bir otoriteye ihtiyaç olmadığı ve merkezsiz bir ağ tarafından tüm bu işlemlerin yapılabildiği ve taraflar arasındaki işlemlerin ağ kullanıcıları tarafından uzlaşı ile doğrulanabildiği ve onaylanabildiği ortaya konulmuştur (Nakamoto, 2008).



Şekil 2.3: Dünden Bugüne Blokzincir Teknolojisinin Gelişimi (Demirkan, 2021)

Bitcoin blokzincir ağının finans sektöründe sorunsuz çalıştığı, bireyler arasında gerçekleşen para transferlerinde doğrulanabilir mutabakat mekanizmalarını eksiksiz ve hatasız sağladığı ve ağın veri tutarlılığı ile bütünlüğünün dağıtık mutabakat algoritmalarıyla garanti altına alındığı anlaşılınca, blokzincir teknolojisinin yalnızca bir dijital para altyapısı olmanın ötesinde, çok daha geniş bir potansiyele sahip olduğu fark edilmiştir (Nakamoto, 2008; Narayanan ve diğ., 2016; Antonopoulos, 2017). Bu farkındalık, blokzincir teknolojisinin ikinci büyük evresi olarak kabul edilen Ethereum'un doğuşuna zemin hazırlamıştır. 2013 yılında Vitalik Buterin, blokzincir ağlarının yalnızca para transferleriyle sınırlı kalmaması gerektiğini savunarak, ağ üzerinde koşul bazlı çalışan "akıllı sözleşmeler"in nasıl tasarlanıp işletileceğini anlatan "A Next Generation Smart Contract and Decentralized Application Platform" başlıklı teknik dokümanını yayımlamıştır (Tapscott ve Tapscott, 2016; Swan, 2015). Bu vizyon, 2014 yılında "Ethereum" adını alan yeni bir blokzincir ağının geliştirilmesiyle somutlaşmıştır (Mougayar, 2016). Ethereum ile birlikte blokzincir yalnızca finansal işlemleri değil; aynı zamanda sağlık, tedarik zinciri, gayrimenkul, enerji gibi birçok sektörü dönüştürecek merkeziyetsiz uygulamaların temel altyapısı haline gelmiştir (Swan, 2015; Tapscott ve Tapscott, 2016). Blokzincirin getirdiği bu devrimsel yenilik, merkezi otoritelerin denetiminde olan birey ve toplumları, matematiksel kriptografi temelli, kendi kendini yöneten, merkezi olmayan ve demokratik yapılarla güçlendirmiştir (Antonopoulos, 2017; Güven ve Şahinöz, 2018). Bu sayede, bireyler yalnızca finansal sistemlere değil, aynı zamanda toplumsal organizasyonlara da aracıya gerek duymadan katılım sağlayabilir hale gelmiştir (Tapscott ve Tapscott, 2016; Mougayar, 2016).

2.2 BLOKZİNCİR TÜRLERİ

Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) tarafından 2019 yılında yayınlanan çalışmasına göre; farklı özelliklere sahip farklı blokzincir türleri tanımlanmıştır (Organization for Economic Cooperation and Development (OECD, 2019). En temelde blokzincir türleri Açık ve Özel Blokzincir olmak üzere ikiye ayrılmaktadır:

2.2.1. Açık Blokzincir

Açık Blokzincir, merkeziyetsiz yapısı sayesinde, tüm katılımcıların işlem ve veri akışını gözlemleyebildiği şeffaf bir dijital defter sunmaktadır (Narayanan ve diğ., 2016). Bu teknoloji, izinli ve izinsiz olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır; her iki kategoride de verilerin doğrulanması ve işlenmesi farklı yetkilendirme mekanizmalarıyla gerçekleşir (Yli-Huumo ve diğ., 2016). İzne tabi olmayan açık blokzincir sistemlerinde, kullanıcılar sadece verileri izlemekle kalmayıp, aynı zamanda yeni işlemler ekleyebilir ve blok doğrulama süreçlerine katılabilir; Bitcoin ve Ethereum gibi ağlar bu yapının en başarılı örneklerindendir (Narayanan ve diğ., 2016; Buterin, 2013). Buna karşın, izne tabi olan açık blokzincirlerde, tüm kullanıcılar verileri serbestçe gözlemleyebilse de yeni işlem ekleme ve doğrulama işlemleri yalnızca yetkili birimler tarafından gerçekleştirilir; bu model, özellikle kamu sektöründe uygulanan sistemlerde tercih edilmektedir (Swan, 2015). Böylece, blokzincir teknolojisinde veri ekleme ve doğrulama süreçleri, belirli izin ve yetkilendirme mekanizmalarına dayanarak sistem güvenliğini ve işleyiş verimliliğini artırmaktadır (Swan, 2015).

2.2.2. Gizli-Özel Blokzincir

Halka kapalı blokzincir sistemleri, yalnızca belirli kurum veya organizasyonlar tarafından erişilebilen ve özel amaçlarla geliştirilen kapalı platformlar olarak tanımlanır (Narayanan ve diğ., 2016). Bu tür sistemlerde, veri okuma, işlem yazma ve doğrulama gibi temel işlevlerin gerçekleştirilmesi için önceden belirlenmiş özel yetkilendirme mekanizmaları gerekmektedir (Wust ve Gervais, 2018). Bu blokzincir teknolojileri, erişim izinlerine göre izne tabi olmayan ve izne tabi olan olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır (Wust ve Gervais, 2018). İzne tabi olmayan gizli blokzincirler – aynı zamanda konsorsiyum blokzincirleri olarak da adlandırılır – bankacılık ve lojistik gibi sektörlerde tercih edilmekte olup, kurum içindeki belirli birimlere açık olarak, tüm kullanıcıların eşit şekilde veri okuma, işlem yazma ve doğrulama işlemlerine katılımını sağlamaktadır (Androulaki ve diğ., 2016). Buna karşın, izne tabi olan gizli blokzincirler, halka kapalı olup, yalnızca yetkilendirilmiş birim veya ağ yöneticilerinin veri ekleme, okuma ve doğrulama işlemlerini gerçekleştirmesine izin veren daha sıkı kontrol mekanizmalarına sahiptir (Zheng ve diğ., 2017).

Açık ve gizli blokzincir türlerine ilaveten, bu iki temel modelin özelliklerini kısmen barındıran ara tipler de gelişmiştir (Usta ve Doğantekin, 2017). Aşağıda, bu ara tiplerden hibrit ve konsorsiyum blokzincir modelleri akademik kaynaklarla desteklenerek açıklanmaktadır:

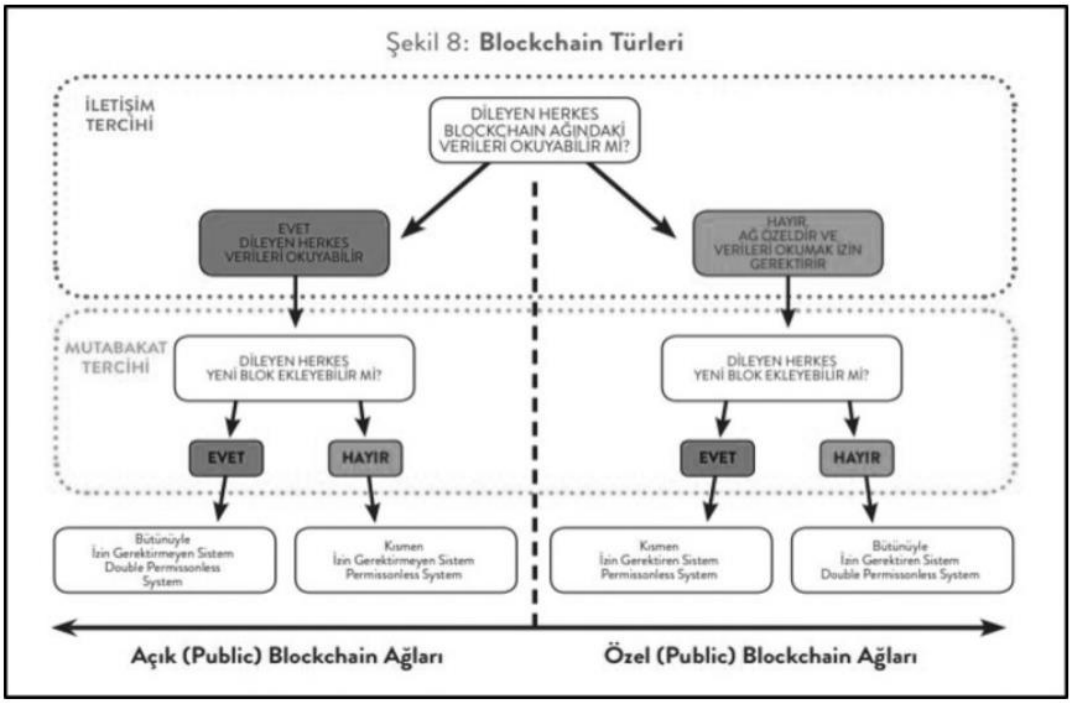
i) Hibrit Blokzincir:

Hibrit blokzincir, hem açık blokzincirlerin sağladığı herkese açık erişim özelliklerini hem de özel blokzincirlerin belirli veri ve işlemleri kurum içi tutma yetkinliğini bir araya getirir (Usta ve Doğantekin, 2017). Bu yapı, herkese açık bir alan ile yalnızca yetkilendirilmiş kullanıcıların erişebildiği kısıtlı bir alanı birlikte kullanarak, hangi verilerin gizli kalacağını veya halka açık olacağını belirleme imkânı sunar (Swan, 2015; Narayanan ve diğ., 2016). Böylece, şeffaflık ile gizlilik arasındaki dengeyi sağlamak mümkün hale gelir.

ii) Konsorsiyum Blokzincir:

Konsorsiyum blokzincir, aynı zamanda federe blokzincir olarak da anılır ve hem açık hem de özel blokzincirlerin bazı özelliklerine ihtiyaç duyulan durumlara yanıt verir (Usta ve Doğantekin, 2017). Bu model, hibrit blokzincire benzer şekilde kısmi şeffaflık sunmakla birlikte, birden fazla organizasyonun ortak yönetimi altında çalışır; bu da merkeziyetsiz bir yapıyı koruyarak, blokzincir ağının işleyişinde kolektif kontrolü mümkün kılar (Zheng ve diğ., 2017). Konsorsiyum blokzincir, özellikle finans, lojistik ve benzeri sektörlerde, ortak denetim ve karar mekanizmalarına ihtiyaç duyulan uygulamalarda tercih edilmektedir (Catalini ve Gans, 2016).

Diğer taraftan, blokzincir türlerini aşağıdaki gibi temelde açık veya gizli olmasının yanında blok ekleyebilme durumuna göre sınıflandıran çalışmalar mevcuttur (Usta, 2021):



Şekil 2.4: Blokzincir Türleri (Usta, 2021)

2.3 BLOKZİNCİR VE BAĞLI LİSTELER (LINKED LİST)

Bilgisayar bilimlerinde, blokzincir ve bağlı listeler kavramları ile veri yapılarına dair çalışmalar, bu iki yapının temel prensipleri arasında dikkat çekici benzerlikler olduğunu göstermektedir. Bağlı listeler, her bir düğümde saklanmak istenen verinin yanı sıra, sonraki düğümün adres bilgisinin yer alması prensibine dayanır; böylece, düğümler birbirlerine sıralı şekilde bağlıdır (Cormen ve diğ., 2009). Benzer şekilde, blokzincir mimarisi de her bir blokta, kendisinden önce gelen bloğun kriptografik hash değerini saklayarak, blokların birbirine zincir şeklinde bağlanmasını sağlar (Lazarovich, 2015; Narayanan ve diğ., 2016). Blokzincirde yer alan 'previousHash' değeri sayesinde, zincirin başlangıcı olan, genesis blok denen ilk bloğa kadar geriye dönük izlenebilirlik sağlanır; genesis blok ise kendisinden önce gelen bir hash değerine sahip değildir (Lazarovich, 2015; Narayanan ve diğ., 2016). Bu durum, bağlı listelerde ilk düğümün zincirin başlangıcını temsil etmesiyle paralellik gösterir (Cormen ve diğ., 2009).

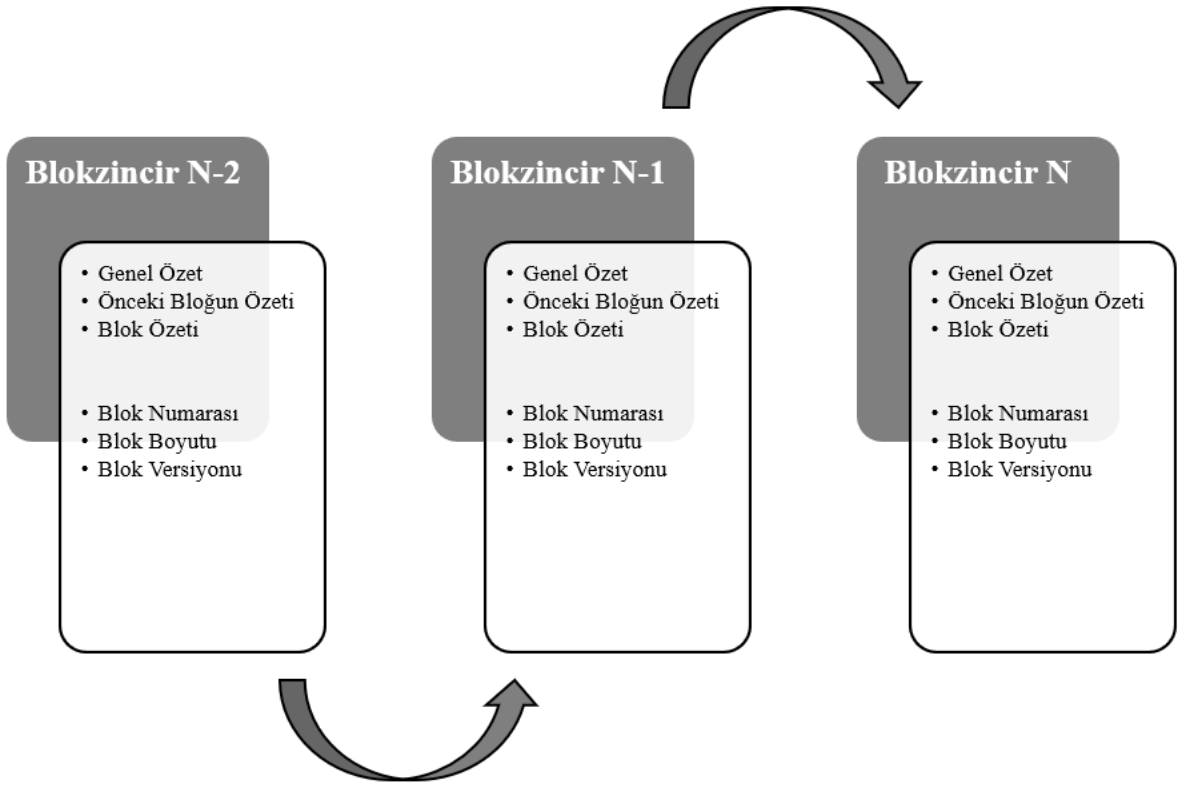
Öte yandan, bağlı listeler verileri lineer ve şifrelenmemiş biçimde saklarken, blokzincir teknolojisinde işlemler ve veriler, Merkle Tree adı verilen ve kriptografik hash algoritmaları kullanılarak oluşturulan ağaç yapıları içerisinde organize edilir (Menezes ve diğ. 1996; Narayanan ve diğ., 2016). Bu yapı, veri bütünlüğünün sağlanmasında ve büyük veri setlerinin verimli şekilde doğrulanmasında önemli avantajlar sunar. Dahası, blokzincir ağlarında işlemler, bloklara yazılmadan önce ağ katılımcıları tarafından gerçekleştirilen doğrulama mekanizmaları ve konsensüs süreçleri ile onaylanırken, geleneksel bağlı listelerde bu tür bir doğrulama veya mutabakat mekanizması bulunmamaktadır (Narayanan ve diğ., 2016; Swan, 2015). Bu özellikler, blokzincir teknolojisinin güvenlik, şeffaflık ve veri bütünlüğü açısından geleneksel bağlı listelerden ayrışmasını sağlayarak, dağıtık sistemler içinde kritik bir rol oynamasına olanak tanımaktadır.

2.4 BLOKZİNCİR VE MERKEZİ VERİTABANI SİSTEMLERİ

Bilgisayar bilimlerinde, blokzincir sistemleri ile geleneksel merkezi veritabanı sistemleri belirli yapısal benzerlikler taşısa da, temel işleyiş prensipleri ve amaçları bakımından önemli farklara sahiptir. Geleneksel veritabanı sistemleri, merkezi bir sunucuda çalışan ve tam yetkili bir yönetici (admin) tarafından kontrol edilen yapılardır. Bu sistemlerde veri ekleme, silme, güncelleme gibi tüm işlemler tek bir otorite tarafından gerçekleştirilir ve sistemin bütünlüğü, bu otoritenin güvenliğine bağlıdır (Elmasri ve Navathe, 2021). Olası donanım veya yazılım arızalarına karşı, düzenli veri yedeklemesi ve yedek sistemlerin önceden planlanması kritik öneme sahiptir. Buna karşın, blokzincir teknolojisi dağıtık ve merkeziyetsiz bir yapıya sahiptir. Veritabanının birden

fazla kopyası, ağdaki her bir katılımcının (node) cihazında tutulur ve işlemler kriptografik algoritmalarla doğrulandıktan sonra bloklara kaydedilerek zincire eklenir (Zheng ve diğ., 2018; Narayanan ve diğ., 2016). Böylece herhangi bir otoritenin tek başına sistem üzerinde tam yetkili olması mümkün değildir. Blokzincirin bu mimarisi, veri bütünlüğünü, değişmezliği ve güvenliği doğrudan mimarinin kendisiyle sağlar (Casino ve diğ., 2019).

Blokzincir ağındaki kullanıcıların %51'den fazlası işlemlerin doğrulanması ve onaylanmasında mutabakata vardıklarında yani uzlaştıklarında işlemler bloklara yazılır ve zaman damgası ile mühürlenir. Gervais ve Wüst'e (2018) göre, Blokzincir ağlarındaki mutabakat veya uzlaşma protokolleri ve mekanizması sayesinde bloklardaki verilerin değiştirilme ve silinmeye karşı güvenliği garanti altına alınmış olmaktadır.



Şekil 2.5: Blokzincir Yapısı (Usta ve Dogantekin, 2017)

Blokzincir yapısı şekilde görüldüğü üzere işlemlerden oluşan blokların birbirlerine zincirleme bağlanarak ve büyüyerek devam eder (Usta ve Dogantekin, 2017). Bloklar, blok işlemlerinin kriptografik olarak hash algoritmasına girdikten sonra üretilen çıktı hash değerleri ile birbirlerine bağlanırlar. Şekil 2.5'te görüldüğü üzere bir blok kendinden önceki bloğun hash değerini kendi yapısında tutarak bağlantı kurulur. Blokzincir yapıları, blokzincir ağı denilen bir bilgisayar ağına dağıtılır ve blokzincir ağı kullanıcıları / katılımcıları bilgisayarlarında blokzincir kopyaları kayıt altında tutulur. Bu sebeple merkeziyetsizdir ve merkezi sistemler gibi yönetilemez. Blokzincir

yapısındaki bloklardaki işlemler, Blokzincir bloğunun kalıcı bir parçası durumuna gelmeden önce bir mutabakat veya fikir birliği mekanizması kuralları ile kontrol edilir, doğrulanır. İşlem mutabakat süreci için, Blokzincir kullanıcılarının fikir birliği onayı gerekmektedir. Doğrulanmış ve onaylanmış işlemlerden oluşan bloklar kriptografik olarak önceki bloklara bağlanarak, verilerin değişmezliği garanti ve güvence altına alınmış olur, verilerin değiştirilmesi, bozulması veya silinmesi blokzincir yapısı altında olanaksız hale gelir (Olsen ve diğ., 2019).

2.5. BLOKZİNCİR MUTABAKAT (UZLAŞI) PROTOKOLLERİ

Blokzincir ağının merkezi olmayan yapısı üzerinde “blokzincir düğümü” adı verilen tüm blokzincir katılımcılarında, blokzincir verisinin veya veri setinin aynı olması ve güncel aynı kalması amacıyla, blokzincir ağında gerçekleştirilen bloklara eklenecek işlemlerin geçerli, doğru olabilmesi için blokzincir ağının geneli tarafından kabul edilen ve uygulanan kurallar bütününe yani protokollere "mutabakat protokolü" ve mutabakat kurallarına blokzincir ağındaki tüm katılımcılar tarafından uyulmasını ve yerine getirilmesini sağlayan algoritmaya “mutabakat algoritması” denilmektedir (Usta ve Doğantekin, 2017).

Blokzincire eklenecek işlemlerden oluşan bir blok, sadece blokzincir ağını oluşturan katılımcı düğümlerin %51 oranında ve fazlasının onayı, doğrulaması, yani bir mutabakata varması sonucunda blokzincire eklenebilir. Bu işlem mutabakat veya uzlaşı olarak tanımlanmaktadır. Baliga’ya (2017) göre Mutabakat (Uzlaşı) algoritmaları blokzincir ağını oluşturan katılımcı düğümlerin blokzincire yeni bloğun eklenmesi konusunda mutabakata varmasını belirleyen süreçler ve mekanizmalardır.

Mutabakat protokolü ve algoritmasının asıl amacı blokları oluşturan işlem kayıtlarını tutan blokzincir düğümlerinin veya katılımcılarının aynı blokzincir verisine sahip olabilmesini sağlamaktır ve böylelikle blokzincir ağının tutarlığını sağlayarak korumaktır. Blokzincir ağının tutarlılığı sağlanırken merkezi bir otorite veya kişilerden bağımsız tamamıyla algoritmayı oluşturan süreç adımları, matematiksel fonksiyonlar ve bilgisayar sistemleri kullanılarak blokzincir güven ortamı sağlanmaktadır (Güven ve Şahinöz, 2018). Bu şekilde blokzincir ağındaki doğrulayıcı düğümlerdeki verilerin aynı ve tutarlı olması tüm ağ ortamında sağlanır.

Bazı mutabakat (uzlaşı) algoritmaları aşağıda listelenmiştir:

Tablo 2.2: Mutabakat (Uzlaşı) Algoritmaları (Güven ve Şahinöz, 2018)

1. İş İspatı (Proof of Work - PoW)	2. Hisse İspatı (Proof of Stake - PoS)	3. Delege edilmiş Hisse İspatı (Delegated Proof of Stake - DPoS)	4. Kiralanmış Hisse İspatı (Leased Proof of Stake - LPoS)
5. Proof of Elapsed Time	6. Practical Byzantine Fault Tolerance	7. Simplified Byzantine Fault Tolerance	8. Delegated Byzantine Fault Tolerance
9. Directed Acyclic Graphs (DAG)	10. Proof of Activity	11. Proof of Importance	12. Proof of Capacity
13. Proof of Burn	14. Proof of Weight		

Blokzincir ağları arasında mutabakat (uzlaşı) algoritmaları bakımından farklı ağ yapıları ve amaçlarına göre farklı mutabakat çözümlerinin ve algoritmalarının ortaya çıktığı görülmektedir. En popüler blokzincir ağı olan Bitcoin Blokzincir ağı, iş ispatı mutabakat algoritması üzerine, özellikle akıllı kontratların (Smart Contracts) ve merkezi olmayan uygulamaların (Decentralized Applications - DApps) en fazla geliştirildiği blokzincir ağı olan Ethereum ise hisse ispatı mutabakat algoritmasını kullanmaktadır. Bitcoin ve Ethereum gibi halka açık blokzincir ağlarında milyonlarca ağ kullanıcısı bilgisayar tarafından eşzamanlı olarak tutulan Blokzincir'deki verilerin senkron, güncel ve aynı tutulması çok etkin işleyen mutabakat algoritmalarına, mekanizmalarına bağlıdır (Buttafoco, 2019). Mutabakat algoritması, yani yeni bir bloğun blokzincire eklenmesi ve bu yeni bloğun tüm blokzincir ağına yayınlanması ve dağıtılması kurallarını belirleyen uzlaşı mekanizması elbette bazı hassas zayıf noktalara sahip olabilmektedir. Blokzincir ağlarındaki mutabakat yapısı genel olarak blokzincir ağ kullanıcılarının %51 ve fazla katılımcı tarafından yeni bloğun onaylanması, doğrulanması temel kuralına bağlıdır, dolayısıyla bir blokzincir ağındaki toplam katılımcı (düğüm) sayısının %51 ve üzerine sahip bir otorite veya yapı, blokzincir ağı üzerinde hakimiyete sahip olabilmektedir. Bu durum blokzincir ağında %51 saldırısı olarak adlandırılmaktadır (Buttafoco, 2019).

Bach, Mihaljevic ve Zagar (2018) çalışmasına göre mutabakat (uzlaşı) algoritmalarının genel listesi, hangi blokzincir ağı tarafından kullanıldığı, hangi yıl geliştirildiği, blokzincir ağı programlama dili, akıllı sözleşme geliştirme imkanının olup olmadığı ve mutabakat algoritmasının artıları ve eksileri aşağıdaki tabloda ortaya konulmuştur. Uzlaşı algoritmalarından en çok kullanılan iş ispatı ve hisse ispatı algoritmalarının detaylarına bu çalışma kapsamında aşağıdaki bölümlerde girilecektir. Diğer mutabakat algoritmalarının birçoğu bu iki temel algoritma baz alınarak türetilmiştir.

Tablo 2.3: Mutabakat Algoritmalarının Karşılaştırılması (Bach, Mihaljevic ve Zagar, 2018)

Uzlaşı Algoritması	Blokzincir Platformu	Çıkış Yılı	Programlama Dilleri	Akıllı Sözleşmeler	Artıları	Eksileri
PoW	Bitcoin	2009	C++	Yok	Düşük 51% atak ihtimali	Yüksek enerji tüketimi Madencilerin Merkezileşmesi
PoS	Ethereum	2015	Solidity	Var	Düşük Enerji Tüketimi Daha merkeziyetçilikten uzak	Nothing-at-stake sorunu
DPoS	Lisk	2016	Javascript	Yok	Düşük enerji tüketimi Ölçeklenebilir Artırılmış Güvenlik	Kısmen merkezi İki kez harcama saldırısı
LPoS	Waves	2016	Scala	Var	Adil Kullanım Coinleri kiralayabilme	Desentralizeleşme Sorunu
PoET	Hyperledger Sawtooth	2018	Python, JS, Go, C++, Java ve Rust	Var	Katılımın ucuzluğu	Özellikli donanım gerekliliği Açık blokzincirler için iyi değil
PBFT	Hyperledger Fabric	2015	JS, Python, Java, REST ve Go	Var	Onaylamaya ihtiyaç yok Enerji tüketim azlığı	İletişim Boşluğu Cybil Saldırısı
SBFT	Chain	2014	Java, Node ve Ruby	Yok	Yüksek güvenlik İmza ile	Açık blokzincirler için

					doğrulama	kullanılmaz
DBFT	NEO	2016	Python, .NET, Java, C, C++, Go, Kotlin, JS	Evet	Ölçeklenebilir Hızlı	Zincirdeki çakışmalar
DAG	IOTA	2015	Javascript, Rust, Java, Go, C++	Yapım aşamasında	Düşük maliyetli ağ Ölçeklenebilirlik	Uygulama boşlukları Akıllı sözleşmeler için uygun değil
PoA	Decred	2016	Go	Var	51% saldırısının olma ihtimalini azaltır Eşit katılım	Yüksek enerji tüketimi Çifte işaretleme
PoI	NEM	2015	Java, C++	Var	Hasat/hakediş İşlem ortaklığı	Desentralizeleşme sorunu
PoC	Burstcoin	2014	Java	Var	Ucuz Verimli Dağıtık	Daha büyükleri desteklemeye Desentralizeleşme sorunu
PoB	Slimcoin	2014	Python, C++, Shell, JS	Yok	Ağın korunması	Kısa vadeli yatırımcılar için değil Coin ziyanı
PoWeight	Filecoin	2017	SNARK/STARK	Var	Ölçeklenebilir Özelleştirilebilir	Teşviklendirme sorunu

2.5.1. İş İspatı Mutabakat Algoritması

Mutabakat algoritmaları blokzincir ağlarının kayıt defterlerinin güvenli, tutarlı ve ağ düğümleri arasında güncel ve senkron olması için blokzincir ağlarının kullandığı yönetişim ve yöntemler bütününe verilen addır (Binance Academy, 2023). İş ispatı (Proof of Work - PoW) mutabak algoritması, Blokzincir teknolojisinin ilk bilinen ve kapsamlı ağı olan Bitcoin blokzincir ağında kullanılan bir uzlaşı algoritmasıdır ve bundan dolayı ağın tutarlılığının ve bütünlüğünün sağlanması ve korunması açısından kendini ispatlamasından dolayı kritik öneme sahiptir (Nakamoto, 2009). Blokzincir ağlarına sahip kripto paralar önemli oranda uzlaşı algoritması olarak iş ispatı algoritması üzerine inşa edilmişlerdir. Örneğin Bitcoin blokzincir ağı sonrası, bitcoin ağından çatallanarak ortaya çıkan Litecoin vb. blokzincir ağları da iş ispatı uzlaşı algoritması kullanarak ağın bütünlüğünü sağlamaktadır (Binance Academy, 2023).

İş ispatı mutabakat algoritması, blokzincir ağları için tanımlanan ilk mutabakat algoritmasıdır. Birçok blokzincir ağı işlemleri onaylamak, doğrulamak ve bloklarını üretmek için bu uzlaşı algoritmasını kullanır veya temel alır.

İş İspatı mutabakat algoritmasına göre (Yaga ve diğ., 2018);

- Ağdaki katılımcı düğümler kendilerine verilen zor bir problemi çözmeye çalışırlar,
- Bu zor problem ile aslında blok içinde tanımlı olan "nonce" olarak adlandırılan değeri bulmaya çalışırlar,
- İlk önce ağ düğümleri yeni blok içerisinde yer alacak işlem verisini seçerler,
- Bu işlem verisi kullanılarak Merkle ağacı ve Merkle kök değeri oluşturulur,
- Merkle kök değeri, bir önceki bloğun özetleme (hash) değeri, zaman bilgisi ve ardışık olarak artan bir sayaç olarak tanımlanabilecek “nonce” değeri hash’lenerek blok başlığı oluşturulur,
- Bu şekilde elde edilen blok başlığı formatı (belirli bir karakter kümesi ile mi başlıyor gibi) ve “hedef değeri” blokzincir katılımcı düğümlerinde bulunmaktadır,
- Dolayısıyla ağ düğümleri kendi bilgisayar işlemci güçleri ile bloklara yazılacak işlem verileri ile hangi "nonce" değerini hash'lersek bu son "hedef değeri" elde ederiz sorusuna yanıt bulmaya çalışırlar,
- Ağ düğümlerinin yaptıkları bu işleme blokzincir madenciliği (mining) adı verilir,
- "Nonce" değerini ilk bulan ağ düğümü blokzincir ağındaki tüm diğer düğümlere doğru "nonce" değerini bulduğunu deklare eder, yayınlar,
- Diğer tüm ağ düğümleri bulunan "nonce" değerinin doğru olup olmadığının sağlamasını yapıp, teyit ederler,

- Belli bir orandaki ağ düğümü (genellikle tüm ağ düğümlerinin %51 veya fazlası) bulunan "nonce" değerinin doğru olduğunu teyit ederse ve ağdaki tüm diğer düğümler ile bu "nonce" değerini paylaşırsa seçilen işlemlerden oluşan aday blok, blokzincire eklenir ve
- "Nonce" değerini bulan ağ kullanıcısı düğüme, teşvik edici ödül olarak blokzincir ağının yerel kripto para birimi (coin) verilir.
- Usta ve Doğantekin'e (2017) göre, eğer belirlenen "nonce" değeri ile uygun bir blok özetleme değeri oluşmadı ise "nonce" değeri arttırılarak uygun özetleme değeri yaratılmaya çalışılır. "Nonce" değeri belirlenen limite geldiğinde hala geçerli bir blok oluşturulamadı ise (yani geçerli bir özetleme değeri oluşturulamadı ise) bu durumda blok başlığını oluşturan diğer değerlerde (blok içerisinde yer alacak işlemler kümesinin sırası, içeriği gibi) güncelleme yapılır ve akış tekrar baştan ele alınır.

Gerdan'a (2019) göre iş ispatı mutabakat algoritması blokzincire blok eklemek için ağ katılımcılarının emek sarfettiğini kanıtlar. Dolayısıyla, iş kanıtı uzlaşı algoritması üzerine kurulu blokzincir ağ madencilerinin özel tasarlanmış güçlü işlemcilere sahip cihazlara ihtiyacı vardır, bu durumda eleştiri konusu olarak iş kanıtı mutabakat algoritmasının büyük enerji tüketimlerine neden olduğu konusunu gündeme getirmektedir. İş ispatı uzlaşı algoritmasının çalışma yapısından dolayı özel donanımlı güçlü işlemcili grafik kartlarından oluşan bilgisayarlara ihtiyaç duyulmaktadır ve bu durumda çok fazla enerji kullanımı ve blokzincir ağı hızının olumsuz yönde etkilenmesi demektir (Tanrıverdi, Uysal ve Üstündağ, 2019).

Diğer taraftan, iş ispatı uzlaşı algoritması isim olarak değil ama fikir ve kavram olarak "Pricing via Processing or Combatting Junk Mail" adlı çalışmaları ile Dwork ve Naor (1992) tarafından öne sürülmüştür. İsim yani terim olarak ise Jakobsson ve Juels (1999) tarafından gerçekleştirilen, "Proofs of Work and Bread Pudding Protocols" isimli çalışmalarıyla literatüre girmiştir. Özellikle Adam Back'e ait spam e-mailleri engellemek için oluşturulan "Hashcash" isimli uygulama ile blokzincir iş ispatı algoritması özellikleri büyük oranda benzerlik göstermektedir. Satoshi Nakamoto'nun 2008 yılında yayınladığı Bitcoin makalesindeki iş ispatı uzlaşı algoritması ile "Hashcash" uygulaması büyük oranda benzerlik göstermektedir.

2.5.2. Hisse İspatı Mutabakat Algoritması

İş kanıtı mutabakat algoritmasının dezavantajlı yönlerini gidermek için geliştirilen hisse ispatı (Proof of Stake - PoS) uzlaşı algoritması, blokzincir ağına peercoin isimli kripto para sistemi tarafından ilk kez kullanılmıştır ve peercoin blokzincir ağı hisse kanıtı mutabakat algoritmasının diğer geliştirilen blokzincir ağları tarafından da kullanılmasına öncülük etmiştir (Zheng ve diğ., 2017). İş ispatı ve diğer mutabakat algoritmaları ile amacı aynı olmasına rağmen, yani yeni eklenecek blokları doğrulamak, blokzincir ağına yayınlamak ve blokzincir dağıtık yapısındaki veri tutarlılığını ve bütünlüğünü sağlamak olmasına rağmen amaca ulaşma süreçleri farklıdır.

Gerdan'a (2019) göre hisse kanıtı mutabakat algoritması, bir blokzincir katılımcı düğümünün blokzincir ağına ne kadar yatırım yaptığı, yani blokzincir ağına ait yönetişim kripto parasına ne kadar sahip ise, ağın başarılı olması, daha da iyileştirilmesi ve geliştirilmesi için o kadar gayret ortaya koyacağı anlamına geldiğini veya blokzincir ağını ortadan kaldırmak gibi riskli bir işlemi yapma ihtimalinin o kadar az olduğu kavramsal düşüncesine dayanmaktadır. Kısacası, blokzincir ağında ne kadar hissesi var ise bir kullanıcının o ağ hakkında o kadar söz sahibi olması ve ağın daha da geliştirilmesi için önemli destekçilerden olduğu anlamına geldiği fikrine dayanmaktadır. Hisse kanıtı uzlaşı algoritmasında, ağ düğümleri ellerinde tuttukları ağa ait yerel kripto para oranında yeni bir blok ekleme ihtimalini artırarak, eklenen bloklardan teşvik ödülü alırlar (Vasin, 2017). Blokzincir ağındaki her online kullanıcı blok kontrolü yapabilir ve blok doğrulayabilir, dolayısıyla iş ispatı mutabakat algoritmasında olduğu gibi işlemci gücü yüksek bilgisayarlara ihtiyaç bulunmamaktadır.

Hisse ispatı mutabakat algoritmasından, hisse teriminin anlamı, bir blokzincir ağ kullanıcısının, ağa yatırım yaptığı yerel kripto para birimi miktarıdır ve blokzincir ağ kullanıcıların yeni işlemleri ve işlemlerden oluşan blokları doğrulamaları ve blokzincir ağına ekleyip yayınlayabilmeleri ellerinde tutukları ağ kripto para miktarıyla yani hissesiyle ölçülmektedir (Yaga ve diğ., 2018). Dolayısıyla, bir blokzincir ağ kullanıcısının yeni bir blok yayınlama ihtimali, sahip olduğu hissesinin yani elinde tuttuğu ağ kripto para miktarının, ağda dolaşımda olan toplam yerel kripto para miktarı oranına bağlıdır. Bu nedenle, hisse ispatı algoritmasını kullanan blokzincir ağlarındaki kullanıcıların blok doğrulama ve blok ekleme ödülü alma ihtimalleri ellerinde bulundurdukları ağa ait kripto para miktarı oranında artmaktadır.

Diğer taraftan King ve Nadal'a (2012) göre hisse ispatı algoritması kendi içinde önemli bir riski barındırmaktadır. Şöyle ki, blokzincir ağına ait yerel kripto para zengini kullanıcılar ağda baskın kişilere dönüşebilmektedir. Bu riski belli oranda azaltmak için "coin age (para yaşı)" denilen bir kavram geliştirilmiştir ve ağa ait kripto parayı elinde tutma süresi kriteri hisse ispatı uzlaşı algoritmasının bir parçası haline getirilmiştir. Coin age (Para yaşı), kripto para miktarı ile paranın elde bulundurulma süresinin çarpımından oluşan bir kavram haline getirilmiştir ve blokzincir ağ kullanıcıları tarafından elde tutulan ağa ait kripto paranın belli bir gün sayısı kadar elden çıkarılmaması gibi kriterler getirilmiştir.

Hisse ispatı mutabakat algoritması, ilk kez özellikle enerji tüketimi ve ölçeklenebilirlik gibi sorunları çözmeye yönelik bir yaklaşım olarak önerilmiştir (King ve Nadal, 2012). Bu yaklaşım, iş ispatı algoritmasına kıyasla, blok üretimi sürecini yüksek işlemci gücünden ziyade ağın kripto para birimi ya da yönetişim tokenlarına sahip olma oranına dayandırır (Buterin, 2017). Kiayias ve arkadaşlarının (Kiayias ve diğ., 2017) geliştirdiği Ouroboros protokolü, PoS mekanizmasının güvenlik ve merkezsizliğini bilimsel temellere dayandıran ilk yöntemlerden biri olarak öne çıkmıştır. Aşağıda, PoS algoritmasının temel aşamaları ve işleyişi detaylandırılmıştır:

a) **Blokzincir ağına ait yönetişim coin'lerinin oluşturulması:** PoS tabanlı blokzincirlerde, ağın yerel kripto para birimi ya da yönetişim coin'leri, genellikle sistemin ilk kuruluşunda veya belirli akıllı sözleşme koşulları çerçevesinde oluşturulur (Kiayias ve diğ., 2017). Bu coin'ler, ağın temel güvenlik ve yönetişim mekanizmalarını besleyen bir nevi "hisse" (stake) işlevi görür.

b) **Ağ katılımcılarının coin satın alması ve hisse sahibi olması:** Katılımcılar, bu coin'leri satın alarak veya başka yollarla edinerek, ağ içinde söz hakkı ve doğrulama yetkisi elde ederler (Bano ve diğ., 2017). Sahip olunan coin miktarı arttıkça, katılımcıların blok üretme ve doğrulama süreçlerindeki etkisi de artar.

c) **Blok doğrulama ve oluşturma yöntemleri: (i) En fazla hisseye sahip düğüm yaklaşımı:** Birinci yöntemde, sistem blok üretme hakkını en yüksek coin miktarına (stake'e) sahip olan düğüme verir. Eğer belirlenen zaman dilimi içinde bu düğüm yeni bloğu üretmez ve ağa sunmazsa, sıradaki en yüksek stake'e sahip düğüm bu hakkı devralır (King ve Nadal, 2012). **(ii) Hisse oranına göre problem zorluğu yaklaşımı:** İkinci yöntemde, PoW algoritmasındaki gibi matematiksel problemler kullanılır; ancak yüksek stake'e sahip düğümlere daha kolay problemler verilerek blok oluşturma şansı arttırılır (Buterin, 2014). Böylece, sistem hem iş kanıtı benzeri bir yapıya sahip olur hem de yüksek hissesi olan düğümleri ödüllendirir.

d) **Coin age (para yaşı) kavramı ve yüksek hisseli düğümlerin avantajlarının sınırlandırılması:**

PoS algoritmasında, yüksek hisseli düğümlerin sürekli blok üreterek aşırı ödül elde etmesini engellemek amacıyla "coin age" (para yaşı) mekanizması kullanılır (Kiayias ve diğ., 2017). Coin age, katılımcının elindeki coin'leri ne kadar süre boyunca harcamadan veya transfer etmeden tuttuğuna göre artar ve para yaşı yüksek olan düğümlerin blok üretme şansı yükselir. Ancak, blok oluşturma işlemi gerçekleştikten sonra bu düğümlerin coin age değeri sıfırlanır ve yeniden biriktirmeye başlarlar (Saleh, 2021).

e) **Minting veya forging kavramları:** İş kanıtı (PoW) algoritmasında blok yaratma sürecine "madencilik" (mining) adı verilirken, hisse ispatı (PoS) algoritmasında blok üretme süreci "minting" veya "forging" olarak adlandırılır (Narayanan ve diğ., 2016). Blok üreten düğümler de benzer şekilde PoW'da "madenci" (miner), PoS'ta ise "doğrulayıcı" (validator) olarak tanımlanır (Kiayias ve diğ., 2017).

f) **Enerji verimliliği ve donanım gereksinimi:** PoW tabanlı sistemlerde, blok üretme maliyeti yüksek işlemci gücü ve enerji tüketiminden kaynaklanırken, PoS mekanizması bu gereksinimi önemli ölçüde azaltır (Bano ve diğ., 2017). Böylece, PoS sistemleri çevre dostu ve sürdürülebilir bir alternatif sunar.

g) **Depozito mekanizması ve güvenlik:** PoS sistemlerinde, ağa katılmak isteyen doğrulayıcıların başlangıçta belirli bir miktar coin'i akıllı sözleşme yoluyla depozito olarak yatırmaları gerekebilir (Kiayias ve diğ., 2017). Eğer bu doğrulayıcılar kötü niyetli veya ağa zarar verecek işlemler gerçekleştirirse, yatırdıkları depozito ağ protokolü tarafından kısmen veya tamamen el konularak cezalandırılır (Buterin, 2017). Bu mekanizma, ağın bütünlüğünü ve güvenliğini korumayı amaçlar.

Sonuç olarak, Hisse İspatı mutabakat algoritması, enerji tüketimi ve ölçeklenebilirlik bakımından PoW'a kıyasla daha verimli ve çevre dostu bir yapı sunar. Yüksek hisseye sahip düğümlerin ağa hükmetmesini engellemek adına "coin age" gibi ek mekanizmalarla sistem dengede tutulur. Böylelikle PoS, merkeziyetsiz finans (DeFi) ve akıllı sözleşme platformları gibi pek çok uygulamada tercih edilen bir uzlaşı algoritması olarak önem kazanmaktadır.

2.6. BLOKZİNCİR TEKNOLOJİSİNİN AVANTAJLARI

Blokzincir teknolojisinin diğer teknolojilere göre belli başlı avantajları olan “Merkezi olmayan dağıtık bir yapıda kopyaların çoklu olarak tutarlı bir şekilde tutulması”, “Güvenlik ve düşük manipülasyon riski yani kayıtların geriye dönük silinememe ve değiştirilememe özelliği” ve “Blokların belli bir mutabak algoritması ile blokzincire eklenmesi ve şeffaf ve anonim bir şekilde public blokzincir ağlarında görütülenebilmesi” gibi avantajları vardır, her bir temel özelliğin detayları aşağıda listelenmiştir:

2.6.1. Merkezi olmayan dağıtık yapısı

Blokzincir teknolojisi, merkezi bir sunucuya veya otoriteye bağlı olmadığı için, geleneksel sistemlerde sıkça karşılaşılan "single point of failure" (tek hata noktası) sorununa karşı dayanıklıdır. Merkeziyetsiz ve dağıtık yapısı sayesinde, ağdaki her düğüm (node) blokzincirin tam bir kopyasını barındırır. Bu durum, hem veri güvenliği hem de sistemin genel erişilebilirliği açısından önemli avantajlar sağlar. Bir veya birkaç düğümün devre dışı kalması, ağın genel işleyişini bozmaz; çünkü diğer düğümler işlem geçmişini ve veri bütünlüğünü korumaya devam eder (Zheng ve diğ., 2018; Narayanan ve diğ., 2016). Bu özellik, blokzincir teknolojisini özellikle yüksek güvenlik ve kesintisiz hizmet gerektiren uygulamalar için ideal bir altyapı haline getirmektedir (Casino ve diğ., 2019). Veri yapısı herkese açık blokzincir ağlarında şeffaf bir şekilde anlık güncel olarak herkes tarafından görüntülenebilir ve ağ üzerindeki işlemler şeffaf bir şekilde görüntülenebilir (Taş ve Kiani, 2018).

2.6.2. Güvenlik ve düşük manipülasyon riski

Merkezi olmayan dağıtık yapısı itibariyle güvenlik ve veri manipülasyonu anlamında ağdaki katılımcı düğümlerin doğrulama ve onaylaması ile işlem blokları zincire eklenebildiğinden geriye dönük blok verileri üzerinde değişiklik, silme gibi işlemler neredeyse imkansızdır (Taş ve Kiani, 2018). Diğer taraftan ağ katılımcı düğümlerinin %51 ve fazlasını ele geçiren kötü niyetli kişi ve kurumlar ağ üzerinde hakimiyeti ele geçirerek ağı manipüle etme riski vardır (Taş ve Kiani, 2018). Ancak binlerce, yüz binlerce katılımcı düğümü olan ve insanlar tarafından benimsenmiş blokzincir ağlarının bu tür risklere karşı dirençli ve güvenli olduğu rahatlıkla söylenebilir.

2.6.3. Doğruluk, değişmezlik, şeffaflık, anonimlik

Blokzincir ağında, işlem bloklarının ağ katılımcısı düğümler tarafından doğrulanması ve onaylanması (minimum %51 ağ katılımcısının uzlaşmasıyla) sağlanmakta olduğundan bu durum, bloklardaki işlemlerin ve verilerin hiçbir şekilde değiştirilememesi veya silinememesiyle ağın

doğruluğunu ve bütünlüğünü garanti eden temel faktörlerden biridir (Toprak, 2019; Narayanan ve diğ., 2016). Ayrıca, ağ katılımcılarının blokların bireysel kopyalarına sahip olması, işlemlerin ve verilerin anlık olarak şeffaf biçimde erişilebilir olmasını mümkün kılmaktadır (Croman ve diğ., 2016).

Bu şeffaflık, özellikle halka açık, gizli olmayan blokzincir ağlarında, dışarıdan herhangi bir kişinin de işlemlere kolaylıkla ulaşabilmesini ve görüntüleyebilmesini sağlamaktadır (Narayanan ve diğ., 2016). Dahası, blokzincir ağı katılımcı düğümlerinin adres yapısı, kullanıcıların isim, soyisim ve diğer kimlik bilgilerini gizleyerek anonim işlem yapabilmelerine olanak tanımaktadır (Böhme ve diğ., 2015). Blokzincir blok verilerinin değiştirilemez, silinemez veya kurcalanamaması (tampering resistant) özelliği, özellikle bankacılık ve finansal işlemlerde blokzincir teknolojisinin güvenilirliğinin en önemli nedenlerinden biri olarak öne çıkmaktadır (Toprak, 2019; Swan, 2015). Her ne kadar bu özellik %100 garanti vermese de, blokzincir tabanlı sistemlerin merkezi sistemlere göre büyük oranda kurcalanmaya karşı dirençli ve dayanıklı oldukları kabul edilmektedir (Toprak, 2019). Ayrıca, blokzincir ağlarında, bloklar katılımcı düğümler tarafından eklendikçe ve tüm ağa yayınlandıkça, ağ geçici olarak birden fazla rakip blokzincir defterine sahip olabilir; bu durumda, rakip zincirlerden en uzun olanı – yani en fazla işlem sayısını içeren ve en fazla doğrulanmış bloğa sahip olan zincir – gerçek blokzincir olarak kabul edilir (Narayanan ve diğ., 2016). Ancak, seçilmeyen diğer rakip blokzincirlerdeki işlemler tamamen silinmez; bunun yerine, bu işlemler farklı bir aday bloğa eklenir veya bekleyen işlem havuzuna geri gönderilir (Croman ve diğ., 2016). Son olarak, blokzincir ağ veri tutarlılığı ve bütünlüğünün sağlanması amacıyla, mutabakat algoritması, belirli bir süre boyunca aday blokzincirler arasından en doğru olanın seçilmesini ve diğer aday zincirlerdeki işlemlerin kaybolmamasını garanti altına alan arka plan süreçlerini işletmektedir (Toprak, 2019).

2.6.4. Düşük maliyet ve hız

Blokzincir ağı, merkezi olmayan bir ağ olduğu için katılımcı düğümler arasında merkezi bir yapıya, aktöre veya otoriteye ihtiyaç duyulmaz ve bu nedenle, merkezi bir altyapı veya sistem için gerekli olan merkezi sunucular ve altyapı yatırımına gerek yoktur, bu yatırım miktarı bir nevi blokzincir ağı katılımcıları arasında paylaşılmış gibi düşünülebilir. Blokzincir kullanıcıları, kendilerine ait bilgisayarlarla blokzincir ağı'na dahil oldukları için blokzincir ücretleri sadece blok ekleme ödül ücretine bağlı olup, oldukça düşüktür (David, 2018). İş ispatı mutabakat algoritmasını kullanan blokzincir ağları için madencilik (mining) işlemleri oldukça enerji tüketimi gerektirdiğinden, bu enerji tüketimini karşılayacak bir finansal güce sahip kurumsal bir şirket yapısı gerekmektedir ve blokzincir madencilik şirketleri bu iş için gerekli altyapıyı ve finansı kendiler sağlarlar (David, 2018). Diğer taraftan, blokzincir ağ işlemlerinde merkezi bir banka,

aracı kurum gibi işlemleri yavaşlatan engeller olmadığı için ve hafta sonu ve resmî tatillerden bağımsız 7 gün, 24 saat, 365 gün açık olan blokzincir ağlarında işlemler klasik merkezi sistemlere göre daha hızlı ve kesintisiz istenildiği anda dünyanın herhangi bir yerinden yapılabilmektedir (David, 2018).

2.7. BLOKZİNCİR TEKNOLOJİSİNİN ZORLUKLARI

Blokzincir teknolojisinin diğer teknolojilere göre belli başlı zorlukları olan, "Ülkeler bazında ve globalde regülasyon çerçevesinin henüz olgunlaşma aşamasında olması" , "Özellikle PoW yani İş ispatı mutabak algoritmalarının harcadığı yoğun enerji miktarı" ve "Blokzincir ağlarının açık veya gizli olma durumunun çok iyi analiz edilmeden bazı hassas bilgilerin kamuya açık bir şekilde görüntülenebilmesi ihtimali" gibi zorlukları vardır, her bir temel özelliğin detayları aşağıda belirtilmiştir:

a) Hukuki düzenlemeler ve regülasyon

Günümüzde küresel ölçekte blokzincir teknolojisini kullanan ağlara, bu ağlar üzerindeki uygulamalara (örneğin merkeziyetsiz finans - DeFi, metaverse projeleri, blokzincir tabanlı oyunlar, NFT'ler vb.) ve bu ağlarda oluşturulan kripto paralara ilişkin kapsamlı, uluslararası düzeyde standartlaşmış bir hukuki düzenleme mevcut değildir (Girasa, 2018; Zetzsche ve diğ., 2019). Özellikle blokzincir temelli finansal altyapılar ile geleneksel finans sistemleri arasındaki ilişkiyi düzenleyecek ve kullanıcılar ile yatırımcıların haklarını koruyacak yapısal bir regülasyon eksikliği, teknolojinin geniş çapta benimsenmesinin önünde ciddi bir engel oluşturmaktadır (Allen ve diğ., 2020). Geleneksel merkezi finans anlayışı ve merkezi teknolojik sistem modelleri ile blokzincir temelli sistemleri regüle etmeye çalışmak, teknolojinin doğasına aykırı olup, uygulamada çeşitli çelişkiler yaratabilmektedir (Tapscott ve Tapscott, 2016; Mougayar, 2016). Bu nedenle, blokzincir regülasyonlarının başarılı olabilmesi için, düzenleyici otoriteler, devlet kurumları, sivil toplum kuruluşları, blokzincir platformları ve geliştirici toplulukları gibi tüm paydaşların teknolojiyi çok boyutlu olarak anlaması gerekmektedir (Narayanan ve diğ., 2016; Zohar, 2015). Regülasyon süreçleri yalnızca teknik ve ekonomik değil; aynı zamanda sosyal, etik ve yönetişim boyutlarıyla da ele alınmalıdır. Bu tür kapsayıcı bir yaklaşım, blokzincirin sunduğu inovatif potansiyelin hem güvenli hem de sürdürülebilir biçimde topluma entegre edilmesini mümkün kılacaktır (Casino ve diğ., 2019).

b) Maliyet ve enerji tüketimi

İş ispatı mutabakat algoritması gibi yüksek işlem gücü gerektiren kompleks hesaplama kullanılan uzlaşı algoritmaları üzerine kurgulanan blokzincir ağları yüksek enerji tüketimleri nedeniyle ciddi

eleştiri almaktadırlar ve çok ciddi yüksek maliyetlerle madencilik çalışmaları yapılmaktadır (Tasatanattakool ve Techapanupreeda, 2018).

c) Gizlilik, güvenlik riskleri

Blokzincir teknolojisinin gerçek hayatta hangi sektörde hangi ihtiyaçlara cevap vereceği, avantajları, dezavantajları, riskleri, hangi blokzincir çözümünün hangi amaçla kullanılacağı detaylı bir şekilde analiz edilmelidir. Halka açık veya kapalı, izin gerektiren veya gerektirmeyen blokzincir ağlarında yanlış bir analiz ve tasarım ile blokzincir ağı dışarıya karşı güvenlik ve gizlilik zaafiyetleri sunabilir, görülmemesi gereken işlem verileri ve işlem geçmişleri herkese açık hale gelebilir. Kişisel verilerin korunmasını gerektiren tüm uygulamalarda özellikle sağlık ve finans özelindeki belli amaca dönük uygulamalardaki blokzincir şeffaflığı mahremiyet sorunlarını beraberinde getirebilir (Kritikos, 2018).

d) Performans ve ölçeklendirebilirlik

Blok zinciri ağlarının ölçeklendirilmesi, teknoloji ve altyapı geliştikçe önemli bir konu haline gelmiştir. Ağa dahil olan düğüm sayısının artması, blok zincirinin veri kopyalarının çoğalmasına yol açar ve bu durum, özellikle ağda yeni blokların eklenmesiyle ilgili veri dağıtımını ve yayılmasını zorlaştırır. Blok zinciri ağlarında, veri doğrulama ve blokların eklenmesi işlemleri arasında doğrudan bir ilişki vardır; dolayısıyla ağın büyümesiyle birlikte işlem yoğunluğu da artar, bu da ağın hızını olumsuz yönde etkileyebilir (Nakamoto, 2008). Bu sorun, ağdaki işlem kapasitesinin sınırlı olması durumunda daha belirgin hale gelir.

Bitcoin gibi iş ispatı mutabakat algoritmasını kullanan blok zinciri ağları, teorik olarak genişleyebilir ve ölçeklenebilir. Ancak, Bitcoin blok zincirinin işlem hızı sınırlıdır; saniyede yalnızca 6 ila 10 işlem gerçekleştirilir ve her yeni blok yaklaşık 10 dakika arayla eklenir (Nakamoto, 2008). Bu işlem hızı, ağın artan düğüm katılımcı sayısıyla birlikte daha da yavaşlayabilir. Bir işlemin tam olarak onaylanabilmesi için, minimum altı yeni blok oluşturulması gerekmektedir. Bu da, bir işlemin doğrulanmasının en az 60 dakika sürebileceği anlamına gelir (Buterin, 2014). Bitcoin ağındaki her bloğun ortalama 10 dakikalık bir eklenme süresiyle, bu uzun onay süresi, potansiyel olarak çift harcama (double-spending) gibi sorunlara yol açabilir ve aynı zamanda blok zincirindeki çoklu dallanma (forking) riskini artırabilir (Gervais ve diğ., 2016).

Blok zinciri teknolojisinin bu tür ölçeklenebilirlik sorunları, son yıllarda çeşitli çözüm önerileri ve iyileştirme çabalarıyla ele alınmıştır. Bu çözümler arasında, Bitcoin ve benzeri ağlar için alternatif mutabakat algoritmalarının (örneğin, hisse ispatı) kullanılması, işlem onay sürelerinin kısaltılması

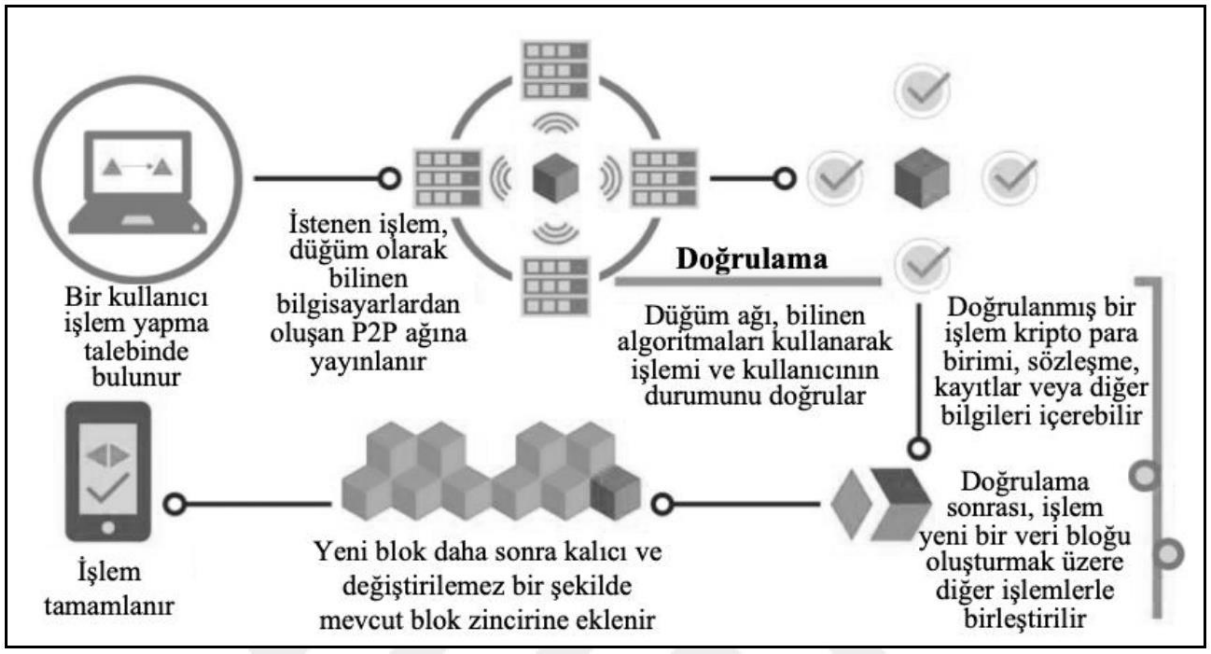
ve ağdaki işlem yoğunluğunun dağıtılmasına yönelik protokoller geliştirilmesi yer almaktadır. Bu tür geliştirmeler, daha yüksek işlem kapasitesine ulaşılmasını ve ağın verimli bir şekilde çalışmasını sağlamayı hedefler (Decker ve Wattenhofer, 2013).

Blokzincir teknolojisinde blok büyüklüğünün belirli bir sınıra sahip olması, ağ üzerindeki işlem hacmini ve işlem hızını doğrudan etkileyen önemli bir faktördür. Özellikle Bitcoin ağı gibi sabit blok boyutu (örneğin 1 MB) kullanan sistemlerde, ağın saniye başına işleyebileceği işlem sayısı (transactions per second - TPS) sınırlı kalmakta; bu da ölçeklenebilirlik sorunlarını beraberinde getirmektedir (Narayanan ve diğ., 2016; Zheng ve diğ., 2018). Ethereum ağı, işlem onaylama sürecinde hisse ispatı (Proof-of-Stake, PoS) mutabakat algoritmasını kullanmaya başlamasına rağmen, blokzincir altyapısının temel mimari sınırlamaları nedeniyle, işlem kapasitesi ve hızında köklü iyileştirmeler sağlamakta hâlâ zorluk yaşamaktadır (Buterin, 2021; Zhang ve Lee, 2021).

Blokzincir ağlarının işlem kapasitesi başlıca iki parametreye bağlıdır: blok boyutu ve iki blok yaratılması arasındaki zaman aralığı. Blok boyutunun artırılması, teorik olarak daha fazla işlemin tek bir blokta toplanmasına olanak sağlayarak işlem kapasitesini artırabilir. Ancak blok boyutunun büyümesi, oluşturulan blokların ağdaki diğer düğümlere (nodes) yayılma süresini uzatmakta ve bu da ağın senkronizasyonunu zorlaştırarak çatallanma (fork) riskini artırmaktadır (Decker ve Wattenhofer, 2013; Antonopoulos, 2017). Bu nedenle, blokzincir tasarımı ölçeklenebilirlik, güvenlik ve merkezsizliğin bir arada optimize edilmesini gerektiren bir denge problemidir (Trilemma) (Buterin, 2021).

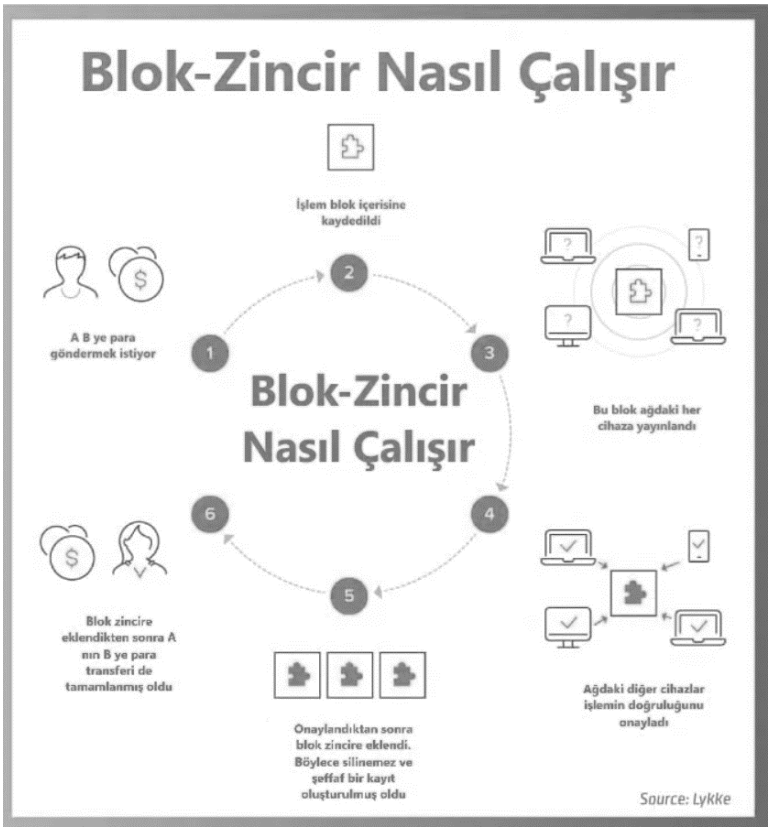
Diğer taraftan, yeni Blokların yaratılma süre aralığını azaltmak işlemlerin doğrulanma ve onaylanma gecikmesini azaltabilir, fakat blokzincir ağının mutabakat içinde olmadığı anlaşmazlık durumlarında yani blokzincir veri tutarlılığını ve bütünlüğün yeniden düzenleme durumlarında blok yaratma sürelerinin düşük olması blokzincir ağında tutarsızlığı daha da artırabilmektedir. Bitcoin ağında gerçekleştirilen, "Lightning Network projesi", Bitcoin blokzincir ağındaki bu tip ölçeklenebilirlik ve performans sorunlarını ortadan kaldırmak üzere geliştirilmiş bir projedir (Burchert, Decker ve Wattenhofer, 2018).

Şekil 2.6'da blokzincir çalışma süreç adımları illüstratif olarak gösterilmiştir: Kullanıcının işlem yapma talebinde bulunması, işlemin P2P ağına yayınlanması, işlemin ve kullanıcının durumunun doğrulanması, işlemin diğer işlemlerle birleştirilmesi, yeni bloğun mevcut blokzincire kalıcı ve değiştirilemez şekilde eklenmesi ve işlemin tamamlanması.



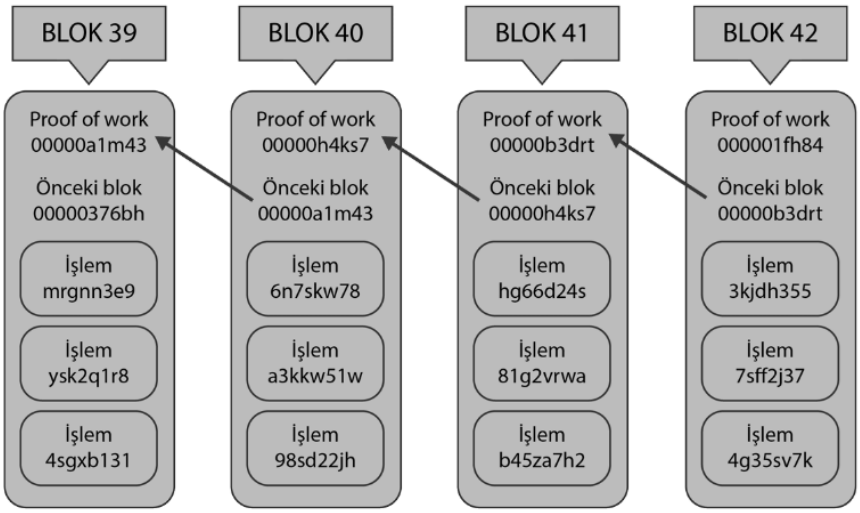
Şekil 2.6: Blokzincir Çalışma Süreç Adımları (Blasetti, 2017)

Şekil 2.7'de ise özetle bir blokzincir ağının çalışma mekanizması, süreç adımları ve bir işlem oluşturulmasından, blok doğrulanması ve işlemin blokzincirdeki bloklara eklenmesine kadar olan tüm süreç resmedilmiştir:



Şekil 2.7: Blokzincir Nasıl Çalışır (Blasetti, 2017)

Şekil 2.8'de görüldüğü üzere, her blok kendinden önceki bloğun şifrelenmiş kodunu içinde barındırarak değişikliklere karşı güvenlik sağlar. Her blok içinde işlem bilgileri ve önceki bloğun şifrelenmiş özet kodu (hash değeri) bulunur. Her blok, kendinden önceki bloğa şifreli biçimde bağlı olduğundan, herhangi birinde değişiklik yapılması, sonraki tüm bloklarda değişiklik gerektirdiğinden, blokzincir yapısı kurcalanmaya karşı dirençlidir (tamper-proof) (Günen, 2020).



Şekil 2.8: Sadeleştirilmiş Blokzincir yapısı (Günen, 2020)

3. SEKTÖREL BAZLI BLOKZİNCİR UYGULAMALARI, GETİRDİĞİ YENİLİKLER VE AVANTAJLARI

Blokzincir teknolojisinin ve mimarisinin kullanımı sadece teknolojik bir karar değil, aynı zamanda stratejik bir yönetim kararıdır (WEF, 2018). Accenture tarafından yapılan "Blokzincir Teknolojisi ile Değer İnşa Etmek" çalışmasına göre, Blokzincir projelerinin %64'ünden fazlası, bilgi teknolojileri, araştırma ile inovasyon bütçeleri içinde finanse edilerek yer bulmaktadır ve kurumlarda halen blokzincir teknolojisine, yeni iş fırsatları ve modelleri yaratmak yerine yeni yaklaşım bir alt yapı mimarisi gözüyle bakılmaktadır (Accenture, 2018).

Blokzincir teknolojisi günümüzde birçok sektörün dönüşümünde rol oynayan önemli bilgi teknolojileri mimarilerinden biri olarak karşımıza çıkmaktadır (Cbinsights, 2018). Özellikle aşağıda sunulan sektörlerde, Blokzincir uygulamaları pratik hayatta karşımıza çıkmaktadır: Bankacılık, Finans, Eğitim, Gayrimenkul, Sigortacılık, Sağlık, Eczacılık, Tedarik Zinciri Yönetimi, Enerji, Spor, Kamu Hizmetleri, Perakende, Hukuk, İnsan Kaynakları, Kurumsal Yönetim, Hızlı Tüketim, Havacılık, Oyun, Tarım, Ulaşım, Sosyal Yardımlaşma.

3.1. FİNANS VE BANKACILIK

Günümüzde global para gönderimleri, farklı ülkelerdeki çeşitli finansal aracılar veya bankalar nedeniyle günlerce, hatta haftalarca sürebilmekte ve bu süreçler, aracı finansal kuruluşların yüksek komisyon ücretleriyle gerçekleşmektedir. Ayrıca, uluslararası para transferleri, farklı ülkelerdeki mevzuat farklılıkları nedeniyle raporlama ve kontrol açısından sorunlar oluşturabilmektedir. Bu bağlamda, blokzincir teknolojisi kullanılarak yeni süreçler ve sistemler tasarlanabilir; blokzincir ağlarında oluşturulan akıllı sözleşmeler ile aracısız, hızlı ve tüm işlemlerin şeffaf bir şekilde erişime açık olduğu yapılar kurgulanabilir (Usta ve Doğantekin, 2018). Bankacılık işlemlerinde en fazla gerçekleştirilen para transferi ve noter süreçlerinin blokzincir mimarisiyle yürütülmesi durumunda elde edilecek maddi katma değerler ile ödenen harç ve komisyonların noter işlemi taraflarının memnuniyetine etkileri, Tabur (2022) tarafından analiz edilmiştir. Türkiye'de bir yılda gerçekleşen noter işlem adetleri ve bu işlemlere konu olan para transferi verileri, Adalet Bakanlığı ve Türkiye Bankalar Birliği'nin yayınladığı raporlar doğrultusunda değerlendirilerek veri analizi yapılmıştır. Ayrıca, noter işlemleri için taraflardan istenen harç ve komisyon miktarları ile tarafların memnuniyeti, düzenlenen anketlerle kayıt altına alınmış ve veriler SPSS programı aracılığıyla KMO nedensellik analizi ile değerlendirilmiştir. Bu çalışmaya göre, blokzincir mimarisi kullanılarak noter işlemlerinin tasarlanması ve yürütülmesi durumunda önemli ölçüde maddi tasarruf elde edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır (Tabur, 2022).

Bankacılık sektörü, sunduğu hizmetlerde teknolojik gelişmeleri yoğun bir şekilde kullanarak fark

yaratmak isteyen sektörlerin başında gelmektedir. Teknolojik yeniliklerin, dijital kanallar ve uygulamalar aracılığıyla bankacılık sisteminin bir parçası haline gelmesiyle, bankacılık sektörü dijital dünyanın gelişiminin ve benimsenmesinin en yoğun olduğu sektörlerden biridir. Özdemir (2019), 2008 yılında Bitcoin ile hayatımıza giren ve teknolojik devrim olarak nitelendirilen blokzincir sisteminin bankacılık sektöründe benimsenmesinin, işveren markasının marka değerine etkilerini incelediği bir çalışma yapmıştır. Blokzincir teknolojisi, merkeziyetsiz, güvenilir ve birçok veri bloğundan oluşan bir veri kayıt sistemi olarak tanımlanmaktadır. Bu teknoloji, sadece kripto para birimleriyle sınırlı kalmayıp, işletme, sanayi, sağlık ve eğitim gibi farklı sektörlerde de kullanılabilen evrensel bir yapıya sahiptir (Yıldız, 2023). Finans alanında, özellikle bankacılık sektöründe, blokzincir teknolojisinin kullanımı vazgeçilmez olacaktır. Blokzincir teknolojisinin muhasebe, denetim ve finans alanlarına etkileri de önemli bir araştırma konusu olmuştur. Sadat (2023), blokzincir teknolojisinin muhasebe bilgi sisteminde gerçek zamanlı ve şeffaf raporlama sağlayarak muhasebe standartlarını artırdığını belirtmiştir. Denetim sürecinde ise akıllı sözleşmeler ile otomatik ve güvenilir bir denetim sağlayarak denetim maliyetlerini azalttığını ifade etmiştir. Finansal teknoloji alanında ise merkezi olmayan bir finans sistemi ile hızlı, maliyet etkin ve güvenli bir değer transferi sağladığını vurgulamıştır. Ancak, blokzincir teknolojisinin yasal düzenlemeler, standartlar ve güvenilirlik gibi bazı zorluklar içerdiğini ve bu nedenle ilgili paydaşların iş birliği içinde olması gerektiğini belirtmiştir. Blokzincir teknolojisinin finans sektöründeki uygulamaları, sadece para transferleriyle sınırlı kalmamaktadır. Örneğin, akıllı sözleşmeler sayesinde kredi işlemleri, sigorta poliçeleri ve yatırım fonları gibi finansal ürünlerin otomasyonu mümkün hale gelmektedir. Bu durum, insan hatalarını azaltmakta ve operasyonel verimliliği artırmaktadır (Türkmen ve Erözel Durbilmez, 2019). Ayrıca, blokzincir teknolojisi, müşteri kimlik doğrulama süreçlerinde de kullanılmaktadır. Geleneksel yöntemlerle yapılan Müşterini Tanı (KYC) ve Kara Para Aklamayı Önleme (AML) süreçleri, zaman alıcı ve maliyetli olabilirken, blokzincir tabanlı çözümler bu süreçleri hızlandırmakta ve maliyetleri düşürmektedir (Chen ve diğ., 2023).

Sonuç olarak, blokzincir teknolojisi, bankacılık ve finans sektöründe önemli dönüşümlere yol açma potansiyeline sahiptir. Bu teknolojinin benimsenmesiyle, işlemlerin hızlanması, maliyetlerin azalması ve şeffaflığın artması gibi avantajlar elde edilebilir. Ancak, bu dönüşüm sürecinde yasal düzenlemeler, standartlar ve güvenilirlik konularında dikkatli olunması ve ilgili paydaşların iş birliği içinde çalışması gerekmektedir.

3.2. KAMU

Blokzincir teknolojisi, kamu sektöründe dijitalleşmeyi geliştirmek için potansiyel bir destek platformu olarak görülmektedir. Bu teknoloji, güvenilir bir denetim sağladığından ve veriyi istendiğinde ilgililerileriyle paylaşabildiğinden dikkat çekmektedir (Lyons ve diğ., 2018). Devletler, her düzeyde büyük bir veri okyanusunun içinde olduğundan, blokzincir teknolojisi, bu verilerin yönetiminde önemli avantajlar sunmaktadır (Olnes ve Jansen, 2017). Türkiye'de de blokzincir teknolojisinin kamu sektöründe kullanımı üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Yaşa (2022), Türkiye'de blokzincir teknolojisinin kamu sektöründe uygulanabilirliğini değerlendirmiş ve bu teknolojinin, kamusal hizmetlerin sunumunda potansiyel faydaları olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, blokzincir teknolojisinin kamu mali denetiminde de kullanılabileceği ve bu sayede denetim süreçlerinin daha şeffaf ve güvenilir hale gelebileceği ifade edilmektedir (Altunbaşak, 2020). Blokzincir teknolojisinin kamu sektöründe uygulanması, aynı zamanda veri güvenliği ve bütünlüğü konularında da avantajlar sunmaktadır. Özellikle, merkezi olmayan yapısı sayesinde verilerin manipüle edilmesi zorlaşmakta ve bu da kamu kurumlarının veri yönetiminde güvenilirliği artırmaktadır (Bozdoğan, 2023).

Sonuç olarak, blokzincir teknolojisi, kamu sektöründe çeşitli alanlarda yenilikçi çözümler sunarak hizmetlerin etkinliğini ve verimliliğini artırma potansiyeline sahiptir. Bu teknolojinin entegrasyonu, vatandaşların kamu hizmetlerine erişimini kolaylaştırırken, aynı zamanda kamu kurumlarının operasyonel süreçlerini optimize etmelerine olanak tanımaktadır.

3.3. EĞİTİM

Alladi, Chamola, Parizi ve Choo'ya (2019) göre blokzincir teknolojisi kullanılarak öğrencilerin kayıtlarının, aldıkları eğitimlerin ve bu eğitimler sonunda aldıkları not çizelgeleri ve sertifikalarının şeffaf ve güvenli bir şekilde kayıt altına alınıp ve bu kayıtların doğrulamasının aracısız ve bağımsız şeffaf ve hızlı bir şekilde firmalar, eğitim ve kamu kurumları tarafından güvenli bir şekilde yapılabileceğini vurgulamışlardır. Loukil, Abed ve Boukadi (2021) ise blokzincir tabanlı teknolojilerin sadece akademik kayıtların saklanması ve doğrulanmasıyla sınırlı olmadığını, aynı zamanda çevrimiçi öğrenme ortamlarının daha güvenli ve etkin bir şekilde yapılandırılmasına da katkı sağlayabileceğini ortaya koymuştur. Çevrimiçi öğrenme platformlarının blokzincir ile entegrasyonu sayesinde, kullanıcıların eğitim geçmişleri değiştirilemez bir şekilde kaydedilerek eğitim süreçleri daha güvenilir hale getirilebilir.

Türkiye'de eğitim sektöründe blokzincir teknolojisinin benimsenme düzeyini inceleyen Özdamar (2022), eğitim kurumlarının bu teknolojiye yönelik beklentilerini ve kullanımın önündeki engelleri analiz etmiştir. Çalışmasında, akademisyenlerin büyük bir kısmının, üniversitelerde blokzincir teknolojisini geliştirecek yeterli teknik donanıma sahip insan kaynağının bulunmamasını en büyük engellerden biri olarak gördüğünü belirtmiştir. Ayrıca, eğitim kurumları ve işletmelerin yöneticilerinin blokzincir konusunda yeterli bilgiye sahip olmamaları, teknolojinin yaygınlaşmasını engelleyen bir diğer faktör olarak öne çıkmaktadır. Benzer şekilde, Yıldız ve Doğan (2022) çalışmasında, blokzincirin eğitim yönetimi ve politika yapımı süreçlerinde kullanılmasının potansiyel faydalarını ele almış, ancak altyapı eksikliği ve yöneticilerin farkındalığının düşük olmasının, yaygınlaşmanın önündeki temel engeller olduğunu vurgulamıştır. Blokzincir teknolojisinin eğitimde kullanım alanları sadece öğrenci kayıtlarının saklanması ve doğrulanması ile sınırlı değildir. Dijital kimliklerin oluşturulması, mikro kredilendirme sistemleri ile öğrencilerin eğitim süreçlerinin daha esnek hale getirilmesi, akademik sahteciliğin önüne geçilmesi gibi birçok farklı alan da blokzincirden faydalınabilir (Zhang ve Xue, 2020). Özellikle diploma ve sertifikaların sahteciliğini önlemek için blokzincir tabanlı doğrulama sistemleri, dünya genelinde birçok üniversite ve eğitim kurumu tarafından test edilmektedir (Grech ve Camilleri, 2017). Eğitimde blokzincir kullanımı, öğrencilerin akademik başarılarını tek bir platformda toplayarak, işverenlerin ve eğitim kurumlarının bu verilere güvenli ve şeffaf bir şekilde erişmesini sağlayabilir.

Blokzincir teknolojisinin eğitim sektörüne entegrasyonu, maliyetleri düşürerek ve içerik paylaşımını kolaylaştırarak eğitimde verimliliği artırabilir. Ancak bu teknolojinin yaygınlaşabilmesi için teknik altyapının güçlendirilmesi, akademik ve idari personelin blokzincir konusunda eğitilmesi ve politika yapıcıların bu alandaki regülasyonları netleştirmesi gerekmektedir. Eğitim sistemlerinde blokzincir kullanımının artırılması hem öğrencilere hem de eğitim kurumlarına uzun vadeli faydalar sağlayabilecek potansiyele sahiptir.

3.4. SAĞLIK

Avrupa Komisyonu raporuna (2020b) göre, sağlık sektöründe ilaç tedarik zincirlerinin blokzincir teknolojisi ile yeniden tasarlanması, her ilacın hareketinin aracısız ve şeffaf bir şekilde izlenebilirliğini ve doğrulanabilirliğini sağlamaktadır (European Commission, 2020). Bu sayede, ilaç ve tıbbi malzeme tedarik zinciri, güvenilir verilerle 7/24 izlenebilir hale gelmekte ve sahte ilaçların tedarik zincirine sızması engellenmektedir. Son yıllarda ilaç satışlarının arttığı göz önüne alındığında, sahte ilaçların yayılması, sağlık sistemlerinde ciddi tehditler oluşturmuş ve blokzincir teknolojisinin sunduğu şeffaflık ve güvenilirlik gibi yetenekler, bu tehdidi önlemekte önemli bir araç haline gelmiştir (Behnke, 2019; Fosso Wamba ve Queiroz, 2020). Blokzincir teknolojisi, sağlık sektöründe hasta verilerinin güvenli ve şeffaf bir şekilde saklanmasını sağlayarak yetkisiz erişim riskini azaltır ve hasta mahremiyetini güvence altına alır. Tıbbi kayıtların blokzincirde tutulması, sağlık çalışanlarının verilere hızlı ve güvenilir bir şekilde erişmesine olanak tanır; böylece tanı ve tedavi süreçleri hızlanır. Özellikle, sağlık sektöründe kullanılan elektronik tıbbi kayıtların blokzincir ile güvence altına alınması, veri güvenliğini artırarak olası veri ihlallerini önlemektedir (Zhang ve Lee, 2020; Fosso Wamba ve Queiroz, 2019). Ayrıca, ilaç tedarik zincirinde blokzincir kullanımı sahte ilaçları önleyerek güvenli ve izlenebilir bir dağıtım sunar (Kshetri, 2018). COVID-19 pandemisi sırasında, sahte ilaçlarla mücadelede blokzincir teknolojisinin önemi daha da artmıştır. Örneğin, MediLedger projesi, ilaçların tedarik zincirindeki izlenebilirliğini blokzincir kullanarak sağlamış ve sahte ilaçların dağıtımını engellemek için Deloitte ile işbirliği yapmıştır (Deloitte, 2020). ABD Gıda ve İlaç Dairesi (FDA), ilaçların tedarik zincirindeki izlenebilirliğini artırmak amacıyla blokzincir teknolojisini pilot projelerde kullanmıştır (FDA, 2019). Türkiye'de de benzer şekilde, ilaç tedarik zincirinde kullanılan İlaç Takip Sistemi ile blokzincir tabanlı uygulamalar karşılaştırılmış ve her iki sistemin de sahte ilaçlarla mücadelede etkin olduğu belirtilmiştir (Kocakulak ve Ünal, 2022).

Sonuç olarak, blokzincir teknolojisi, sağlık sektöründe hem hasta verilerinin güvenliğini ve mahremiyetini sağlamakta hem de ilaç tedarik zincirinin şeffaflığını artırarak sahte ilaçlarla mücadelede önemli bir rol oynamaktadır. Bu teknolojinin uygulamaları, sağlık sistemlerinin daha güvenli, verimli ve izlenebilir hale gelmesini sağlamaktadır.

3.5. GIDA

İnsanlar ne yedikleri ve yiyeceklerin nereden geldiği konusunda giderek daha duyarlı hale gelmektedir. Bir gıdanın kalitesi, nerede üretildiğine ve nereden geldiğine bağlı olarak önemli bir faktör haline gelmiştir. Ayrıca, bir salgın hastalık ya da gıda ile ilgili bir sorun ortaya çıktığında, tüketiciler bunun kaynağını, ne zaman üretildiğini ve kim tarafından üretildiğini öğrenmek istemektedirler. Gıda sektöründe, blokzincir teknolojisi ile gıdanın topraktan üretildiği yerden, tüketiciye ulaşana kadar geçtiği tüm aşamalar şeffaf ve açık bir şekilde, doğrulanabilir bir mimari ile kayıt altına alınabilmektedir. Bu sayede, blokzincir mimarisi, gıda ile ilgili sorunları çözebilme ve insanlara sorunun kök nedenini kolayca gösterme potansiyeline sahip olabilir, böylelikle gıda güvenliği azami seviyeye çıkarılabilir (Toprak, 2019). Blokzincir teknolojisi, gıda sektöründe güvenlik ve izlenebilirlik sağlamanın yanı sıra, gıda tedarik zincirinde şeffaflık ve hesap verebilirlik sağlayarak tüketici güvenini artırmaktadır (Li, 2020). Blokzincir teknolojisi ile şeffaf ve açık bir gıda tedarik zinciri kurmak, aynı zamanda gıda üreticilerinin davranışları üzerinde olumlu etkiler yaratabilir. Hiçbir üretici, taze olmayan gıdayı üretmeye veya tedarik zincirine sokmaya teşebbüs etmeyecektir, çünkü tüketiciler kolaylıkla ürünün geçmişini sorgulayabileceklerdir. Bu durum, gıda sahtekarlığının durdurulmasına ve gıda güvenliğinin artırılmasına yardımcı olabilir. Blokzincir uygulamaları, gıda sektöründe şeffaflık sağlayarak, gıda güvenliğini artıran ve tüketicilerin bilgiye erişimini sağlayan önemli bir çözüm sunmaktadır (Zhang ve Lee, 2020). Ayrıca, gıda tedarik zincirinde yapılan yanlış uygulamalar ya da sahtecilik durumları hızlı bir şekilde tespit edilebilir, böylece tedarik zincirindeki güvenlik ihlalleri ortadan kaldırılabilir. Özellikle, blokzincir, tedarik zincirinde malzeme ve ürünlerin yolculuklarını izlemeyi sağlayarak, bu ürünlerin tazelikleri ve güvenlikleri konusunda yüksek doğrulukla bilgi sunmaktadır (Verhagen, 2021). Örneğin, IBM, daha güvenli, daha akıllı ve daha sürdürülebilir gıda tedarik uygulamaları için "IBM Food Trust" adında bir blokzincir platformu geliştirmiştir. Bu platform, gıda tedarik zincirinin görünürlüğünü ve hesap verebilirliğini şeffaf bir şekilde sağlamayı amaçlamaktadır. IBM Food Trust blokzincir ağı, ürün yetiştiricilerini, işleyicileri, distribütörleri ve perakendecileri birbirine bağlayarak gıda tedarik zincirinde yüksek düzeyde bir şeffaflık sağlar (IBM Food Trust, 2019). Bu sistem sayesinde, her ürünün yolculuğu izlenebilir hale gelir ve bu, gıda güvenliğini artıran önemli bir adımdır. Ayrıca, tüketiciler ürünlerin üretim aşamalarına dair ayrıntılı bilgilere anında erişebilirler, böylece gıda ürünlerinin güvenliği konusunda herhangi bir şüphe durumunda hızlı bir şekilde aksiyon alabilirler (Hosseini, 2021). Diğer taraftan, Hurmuze (2021) çalışmasında, mevcut gıda tedarik zinciri yönetiminde karşılaşılan sorunları çözmek amacıyla blokzincir teknolojisinin uçtan uca bir şekilde tedarik zincirini tasarlayabileceğini vurgulamıştır. Hurmuze'nin (2021) önerdiği blokzincir tabanlı yeni gıda tedarik zinciri, daha etkin bir izlenebilirlik ve güvenlik sağlamaktadır.

Bu tür blokzincir uygulamaları, tedarik zincirinde yaşanan aksaklıkları ve sahtecilikleri önlemeye yardımcı olabilir. Gıda tedarik zincirinde sağlanan bu şeffaflık, tüketicilerin güvende hissetmelerine yardımcı olurken, üreticilerin de daha etik ve güvenilir bir üretim yapmalarını teşvik etmektedir (Kshetri, 2018). Bu gelişmeler, yalnızca gıda güvenliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda sürdürülebilir gıda üretim süreçlerinin teşvik edilmesine de yardımcı olur (Hossain ve diğ., 2021). Blokzincir teknolojisi, gıda tedarik zincirindeki her aşamanın doğruluğunu ve şeffaflığını artırarak, gıda sahtekarlığı ve israfını azaltabilir.

Sonuç olarak, blokzincir teknolojisinin gıda tedarik zincirinde kullanımı, gıda güvenliğini artırmak ve tüketici güvenini sağlamak için büyük bir potansiyel taşımaktadır. Şeffaflık, izlenebilirlik ve doğrulama gibi özellikler, gıda sahtekarlığını engellemeye ve gıda güvenliğini maksimum düzeye çıkarmaya yardımcı olmaktadır. Ayrıca, bu teknolojinin sunduğu güvenlik ve şeffaflık, gıda üreticilerinin daha etik bir üretim süreci benimsemelerini teşvik edebilir, böylece gıda sektöründe sürdürülebilir bir geleceğe doğru önemli bir adım atılabilir.

3.6. GAYRİMENKUL

Akagün'e (2021) göre, blokzincir ağlarında tasarlanan ve çalışan akıllı sözleşmeler, gayrimenkul sektöründe satış öncesinden satış sonrasına kadar tüm süreçleri kolaylaştırabilir. Gayrimenkul satışlarında, satış öncesi problemler genellikle satıcı ve alıcının birbirini tanımaması ve güven eksikliği nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Bu güven eksikliği, işlemlerin güvenli ve şeffaf bir şekilde gerçekleştirilmesinde ciddi zorluklar yaratmaktadır. Tasarlanan akıllı kontratlar, satıcının alıcının mali durumunu öğrenmesine ve alıcının gayrimenkul ile ilgili önemli bilgi ve belgelere kolayca erişebilmesine olanak sağlar (Zohdi ve diğ., 2020). Bu süreçlerin dijitalleşmesi, işlemleri daha verimli hale getirerek, gayrimenkul sektöründe güven sorununun üstesinden gelmeye yardımcı olur (Böhme ve diğ., 2015). Ayrıca, gayrimenkul satışlarında akıllı kontratlar sayesinde, gayrimenkulün devri ile alıcı-satıcı arasındaki bedel transferi aynı anda yapılabilmektedir. Bu, sürecin hızlanmasını ve her iki tarafın da güven içinde işlem yapmasını sağlar. Gerçek dünyadaki bir sözleşmenin dijital versiyonunun şartları, blokzincir ağlarında çalışan akıllı kontratlar ile kolaylıkla sağlanabilir. Bu durum hem alıcılar hem de satıcılar için güvenli, doğrulanabilir ve zaman kazandırıcı bir işlem süreci sunar (Liu ve diğ., 2019). Akıllı sözleşmeler, gayrimenkul işlemlerinde mülkiyet transferi, ödeme onayları ve ilgili belgelerin doğrulanması gibi işlemleri tamamen dijitalleştirerek, işlemlerin hızını artırır ve taraflar arasında güven oluşturur. Ayrıca, akıllı sözleşmelerin sağladığı şeffaflık ve izlenebilirlik, olası anlaşmazlıkları önleyerek, gayrimenkul işlemlerinde hukuki riskleri de en aza indirir (Wright ve De Filippi, 2015). Sezer (2021), çalışmasında gayrimenkul sektöründe blokzincir uygulamalarının potansiyel katkı ve yeniliklerini değerlendirmiştir. Bu değerlendirme, gayrimenkul sektöründe yer alan görüşme

yapılan gayrimenkul uzmanları, blokzincir uzmanları ve hukukçulardan alınan bilgi ve yorumlarla, blokzincir teknolojisinin sektörde nasıl devrim yaratabileceği üzerine odaklanmıştır. Sezer (2021), blokzincir uygulamalarının gayrimenkul sektöründe daha fazla şeffaflık, izlenebilirlik ve hız sağladığını belirtmiştir. Ayrıca, blokzincir ve akıllı sözleşmelerin gayrimenkul işlemlerine entegrasyonu ile hem alıcıların hem de satıcıların güvenliğini artırmak ve dolandırıcılık risklerini azaltmak mümkündür (Peters ve Panayi, 2015). Blokzincir, gayrimenkul mülkiyet belgelerinin dijitalleştirilmesi ve merkeziyetsiz yönetim sağlanarak sektördeki işlemleri güvence altına alabilir (Tapscott ve Tapscott, 2016).

Sonuç olarak, blokzincir ve akıllı sözleşmelerin gayrimenkul sektörüne entegrasyonu, işlemleri daha verimli, güvenli ve şeffaf hale getirirken, aynı zamanda sektörün dijitalleşmesini hızlandırmak adına önemli bir adım olarak öne çıkmaktadır (Luo ve diğ., 2019). Bu uygulamalar, sektördeki alıcı ve satıcılar arasındaki güvenin artmasına, süreçlerin hızlanmasına ve hukuki sorunların en aza inmesine olanak tanıyacaktır.

3.7. TURİZM

Zeren'in (2021) turizm sektöründe akıllı kontratlar dizaynı üzerine yaptığı çalışmada, otel işletmelerinin sunmuş olduğu sözleşmelerin, blokzincir ağı üzerinde oluşturulacak akıllı kontratlar ile blokzincir ağı üzerinde izdüşümünün oluşturularak turizm sektöründe otel-müşteri arasındaki sözleşmelerin dijital olarak akıllı kontratlar ile tasarlanması ve otel-müşteri ilişkilerinin yürütülmesi incelenmiştir. Blokzincir tabanlı akıllı kontratların, sektördeki operasyonel süreçlerin güvenli, hızlı ve düşük maliyetli bir şekilde yürütülmesine yardımcı olacağı vurgulanmıştır (Uckelmann, 2020). Bu bağlamda, akıllı kontratlar, otel işletmelerinin sunduğu hizmetlerin dijitalleşmesini ve müşterilerle olan etkileşiminin daha şeffaf bir hale gelmesini sağlamaktadır (Hassan ve diğ., 2020). Zeren'in çalışmasında, bu tür akıllı sözleşmelerin otelcilik endüstrisinde güvenli bir ödeme mekanizması oluşturmak ve rezervasyon süreçlerini optimize etmek için kullanılabileceği öne sürülmüştür. Ayrıca, Nair'in (2021) turizm sektöründe blokzincir uygulamaları üzerine çalışmasında, turizm sektörü, blokzincir teknolojisinin gücü ile birlikte Turizm 2.0 olarak adlandırılan yeni bir turizm çağına hazırlanıyor, demektedir. Bu "Turizm 2.0" programı, turizm endüstrisinde şeffaflık, güvenlik ve müşteri memnuniyetini ön plana çıkaran yeni bir modelin temelini atmaktadır (Liu ve Wei, 2019). Blokzincir teknolojisi, özellikle otel işletmeleri ile misafirler arasında aracısız, doğrudan ve şeffaf iletişim sağlayarak, bu süreçteki her iki tarafın da güvenliğini teminat altına almaktadır (Gupta ve Pandi, 2021).

Bu, otelcilik sektöründe işletmelerin dijitalleşme yolunda önemli bir adım atmasına olanak tanır ve müşterilerin rezervasyon, ödeme ve hizmet talepleri gibi işlemlerini güvenli bir şekilde gerçekleştirmelerini sağlar. Blokzincir temelli sistemler, turistler ve otel işletmeleri arasında şeffaf ve güvenli bir veri akışı sağlayarak, sektördeki yolsuzlukları ve yanlış anlamaları azaltabilir (Aste ve diğ., 2017). Bu tür uygulamalar, sadece sektöre değil, aynı zamanda tüketicilere de önemli faydalar sunarak, turizm deneyimlerini daha güvenilir ve verimli hale getirebilir (Tapscott ve Tapscott, 2016). Böylece, otel işletmeleri ve misafir adayları arasında yapılan sözleşmelerin dijitalleştirilmesi, sektörde verimliliği artırırken hem işletmelerin hem de müşterilerin haklarını koruyan daha güvenli bir ortam yaratmaktadır.

Sonuç olarak, Zeren (2021) ve Nair (2021) çalışmalarında vurgulanan blokzincir teknolojisinin turizm sektöründeki potansiyeli, sektörün daha dijital, güvenli ve verimli bir şekilde işleyebilmesi için kritik bir rol oynamaktadır. Bu, turizm sektörüne geleneksel işleyişin ötesinde bir yenilik getirirken, aynı zamanda müşteri deneyimlerini iyileştirmektedir.

3.8. LOJİSTİK

Dijital dönüşümün etkisiyle tedarik zinciri yönetiminin bir parçası olan lojistik sektörü, teknolojinin sunduğu yeniliklere hızla adapte olmaktadır. Endüstri 4.0'ın lojistiğe entegrasyonu, sektörde verimliliği artıran yeni iş modellerinin ve uygulamaların ortaya çıkmasına neden olmaktadır (Wang ve diğ., 2019; Hofmann ve Rüsch, 2017). Hammadde üretiminden nihai teslimata kadar uzanan süreçler, geniş bir operasyonel yelpazeyi kapsamakta olup, bu süreçlerin optimizasyonu, lojistik sektörünün rekabet gücünü doğrudan etkilemektedir. Küresel rekabet avantajı elde edebilmek için lojistik firmalarının dijital sistemlerle uyumlu olması şarttır (Christopher, 2020; Bowersox ve diğ., 2013). Lojistik sektöründe yalnızca yük hareketleri değil; depolama, stok yönetimi, gümrük işlemleri ve ürün iadeleri gibi süreçler de büyük önem taşımaktadır. Günümüzde, yapay zekâ ve akıllı robotların özellikle depo yönetiminde kullanılması, hata oranlarını düşürmekte ve firmalara hız ile takip konularında büyük avantajlar sağlamaktadır (Montreuil, 2021; Ivanov ve diğ., 2019). Akıllı lojistik sistemleri, tahmine dayalı analizler ve otomatik karar alma mekanizmaları ile süreçlerin verimliliğini artırmaktadır. Bu bağlamda, büyük veri analitiği, nesnelerin interneti (IoT) ve blokzincir teknolojileri, lojistik operasyonlarının dönüşümünde kritik bir rol oynamaktadır (Lee ve Lee, 2022; Saberi ve diğ., 2019; Pan ve diğ., 2020). Lojistikte çok paydaşlı bir sistem yapısı bulunurken, blokzincir teknolojisi veri hakimiyeti, şeffaflık ve iş birliği konularında çözüm önerileri sunmaktadır. Özellikle, tedarik zincirinde güvenli veri paylaşımını sağlamak, işlem sürelerini kısaltmak ve sahteciliği önlemek için blokzincir tabanlı çözümler giderek daha fazla tercih edilmektedir (Balcı, 2020; Treiblmaier, 2018; Kouhizadeh ve Sarkis, 2018). Lojistik sektöründe blokzincir teknolojisinin entegrasyonu ile ilgili

yapılan araştırmalarda, bu teknolojinin izlenebilirliği ve şeffaflığı artırdığı vurgulanmaktadır (Eper, 2022; Queiroz ve diğ., 2019). Eper'in çalışmasında, Maersk Şirketi'nin "TradeLens" platformu aracılığıyla blokzincir teknolojisini nasıl uyguladığı detaylı olarak incelenmiştir. Bu sistemin, uluslararası taşımacılıkta gümrük işlemlerini hızlandırdığı ve belge sahteciliğini önlediği ortaya konulmuştur. Karayazı'nın (2021) "Lojistik Sektöründe Blokzincir Yazılım Seçimi ve Risk Analizi" adlı çalışmasında, risk değerlendirme süreci entegre edilerek lojistik sektöründe blokzincir yazılım seçiminde yeni bir metodoloji geliştirilmiştir. Çalışmada, blokzincir mimarisinin kullanım durumları ve riskleri, önem derecelerine göre ayrıntılı şekilde incelenmiştir. Lojistik sektöründe blokzincir yazılım seçim kriterlerini tanımlama ve seçimi açısından literatürdeki ilk çalışmalardan biri olarak değerlendirilmektedir. Diğer taraftan, Kaska (2020), "Deniz Lojistiğinde Block Zincir Uygulamaları" adlı çalışmasında alternatif 12 adet blokzincir çözümünü incelemiştir. Özellikle blokzincir, akıllı lojistik çözümleri, tedarik zinciri yönetimi ve deniz taşımacılığı kavramları ele alınarak sektördeki mevcut blokzincir uygulamaları değerlendirilmiştir. Çalışmada tespit edilen 58 seçim ve değerlendirme kriteri, maliyet, teknik gereksinimler ve verimlilik başlıkları altında sınıflandırılmıştır.

Bu doğrultuda, blokzincir teknolojisinin lojistik sektörü üzerindeki etkileri, uygulama alanları ve potansiyel faydaları geniş bir araştırma yelpazesinde incelenmeye devam etmektedir. Dijital dönüşüm sürecinde, lojistik firmalarının blokzincir, IoT ve yapay zekâ gibi yenilikçi teknolojileri benimsemesi, operasyonel verimliliği artırarak rekabet avantajı sağlamalarına katkıda bulunmaktadır.

3.9. PAZARLAMA

Ayberkin (2022), "Blokzincir Teknolojisinin Dijital Pazarlama Sektöründe Yenilikçilik ve Kullanılabilirlik Boyutuyla Uygulanabilmesi İçin Bir Sistem Mimarisinin Tasarımı" adlı doktora tezinde, dijital pazarlama uygulamalarında blokzincir teknolojisinin kullanımının olumlu etkilerini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Günümüz dijital pazarlama sektöründe güven eksikliği, aracıların tam olarak görevini yerine getirmemesi ve ekonomik kayıpların artışı gibi önemli sorunlar bulunmaktadır (Swan, 2015; Cachin, 2016). Bu çalışma, paydaş deneyimlerini iyileştirerek, kurumların hedefledikleri ekonomik ve doğru sonuçlara ulaşabilmesini sağlayacak yeni bir sistem mimarisi tasarımı önermektedir. Önerilen sistem mimarisi, mevcut çözümlerden farklı olarak müşteri ve kurumların mahremiyetlerinden ödün vermeden, aracı firmalara ihtiyaç duymadan işlemlerin gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu yapı, blokzincir teknolojisi ile dağıtık bir veri tabanı kullanarak, gelirin adil bir şekilde dağıtıldığı ve sürecin tüm taraflar tarafından şeffaf bir biçimde izlenebildiği bir altyapı içermektedir (Tapscott ve Tapscott, 2018; Zheng ve diğ., 2018; Casino ve diğ., 2019). Blokzincir tabanlı sistemler, merkezi otoriteye bağlı

olmaksızın işlemleri güvenli ve değiştirilemez bir şekilde kayıt altına almaktadır (Yermack, 2017; Xu ve diğ., 2019). Bu nedenle, yeni mimari yapı, pazarlama sektöründeki güven sorunlarını ortadan kaldırmaya ve işlem süreçlerini daha verimli hale getirmeye yardımcı olmaktadır. Ayrıca, önerilen yapı, dinamik güncellemelerin kolayca yapılabilmesine imkân tanımaktadır. Blokzincir tabanlı akıllı sözleşmeler, süreçlerin otomatik ve güvenilir bir şekilde yürütülmesini sağlamakta, böylece aracı maliyetlerini düşürmekte ve işlem hızını artırmaktadır (Buterin, 2014; Wood, 2017; Antonopoulos, 2017). Yeni sistem mimarisi, kullanıcı arabirimi vasıtasıyla test edilmiş ve deneysel sonuçlar, geleneksel sistemlere kıyasla maliyet avantajının sağlandığını, süreçlerin şeffaf olarak izlenebildiğini ve paydaşlar arasında adil kazanç dağılımının gerçekleştiğini göstermiştir (Iansiti ve Lakhani, 2017; Kim, 2020).

Blokzincir teknolojisinin dijital pazarlama sektörüne entegrasyonu, müşteri deneyimini geliştirmek, veri güvenliğini artırmak ve merkezi otoriteye olan bağımlılığı azaltmak açısından büyük potansiyel taşımaktadır. Bu doğrultuda, sektördeki yenilikçi çalışmalar ve blokzincir tabanlı çözümler, dijital pazarlamanın geleceğini şekillendirmeye devam etmektedir.

3.10. ULUSLARARASI TİCARET

Ekinci'nin (2021) blokzincir teknolojisinin Türkiye dış ticaretine olası katma değeri üzerine hazırlanan çalışmasında, öncelikle dış ticaret süreçlerindeki mevcut problemler incelenmiş ve blokzincir teknolojisinin bu problemleri çözme kapasitesi değerlendirilmiştir. Akabinde, blokzincir teknolojisinin dış ticaret süreçlerinde halihazırda kullanıldığı uluslararası uygulama örnekleri ve bu uygulamaların dış ticaret işlemlerine katkısı incelenmiştir. Örneğin, dış ticaret süreç adımlarının işlem sürelerinin kısalması, dokümantasyonlarda verimlilik sağlanması, güvenilirlik ve şeffaflık etmenlerinde artış gibi gözlemler ortaya konulmuştur. Blokzincir teknolojisinin Türkiye dış ticaret süreçlerinde de aynı katma değeri sunacağı ifade edilmiştir. Harris (2022), blok zinciri modellerinin uluslararası ticaret için nasıl daha uygun olduğunu ve bir blokzincirdeki sıralı işlemlerin, dış ticaretteki vergilerle ilgili dolandırıcılığı azaltmaya nasıl yardımcı olabileceğini göstermiştir. Alsalim ve diğ. (2023), ithal edilen yabancı mallara ilişkin akreditif ve banka havalelerindeki mevcut engelleri incelemiş ve bu engellerin blokzincir teknolojisi kullanılarak aşılmasını önermiştir.

Özyüksel ve Ekinci (2020), Birleşik Arap Emirlikleri, Belçika, Kanada, Hollanda ve Yeni Zelanda gibi ülkelerdeki bazı limanların iş birliği yaparak blokzincir platformları oluşturduğunu ve operasyonlarını otomatikleştirerek kargo aktarım ve doğrulama süreçlerini kolaylaştırmayı ve böylece verimliliği artırmayı hedeflediklerini belirtmişlerdir. Yıldızbaşı ve Üstünyer (2019) çalışmaları ise blokzincir teknolojisinin tarım ve gıda tedarik zincirindeki entegrasyonuna dikkat çekmekte ve bu bağlamda dış ticaret süreçlerinde kalite kontrolü, menşe tespiti ve gıda güvenliği gibi unsurların nasıl daha verimli yönetilebileceğini ele almaktadır. Yıldızbaşı ve Üstünyer'e (2019) göre, blokzincir teknolojisi, uluslararası ticarette yalnızca finansal süreçleri değil, aynı zamanda ürünlerin lojistik takibini ve kalite güvencesini sağlamada da kritik bir rol oynamaktadır. Tarım ürünlerinin blokzincir ile izlenebilirliği sayesinde hem ihracatçılar hem de ithalatçılar için daha güvenli ve şeffaf bir ticaret ortamı oluşturulmaktadır.

Sonuç olarak, blokzincir teknolojisi, dış ticaret süreçlerinde işlem sürelerinin kısalması, dokümantasyon süreçlerinde etkinlik sağlanması, şeffaflık ve güvenilirlik unsurlarının artırılması gibi olumlu etkiler sunmaktadır. Bu teknolojinin Türkiye dış ticaretinde de benzer katkılar sağlayacağı değerlendirilmektedir.

3.11. ENERJİ

Yoncacı (2022) çalışmasında, yenilenebilir enerji ve dijitalleşmenin artan kullanımı doğrultusunda, blokzincir tabanlı enerji ticaretinde arz ve talebin entegrasyonu, dağıtım sürecinin izlenebilirliği, akıllı sözleşmeler ve P2P (peer-to-peer) enerji ticareti gibi unsurlar değerlendirilmiştir. Çalışma, enerji ticaretinin daha şeffaf ve verimli bir hale gelmesi için blokzincir teknolojisinin potansiyel kullanımını incelemektedir (Xie ve diğ., 2020). Blokzincir teknolojisi, enerji sektöründe merkeziyetsiz sistemlerin kurulmasına ve arz-talep dengesinin daha etkili bir şekilde yönetilmesine olanak tanır (Zhao ve diğ., 2019). Yoncacı (2022), bu bağlamda, kullanıcıların kaydedildiği ve enerji ticaretinin gerçekleştirilebildiği bir web platformu tasarlamıştır. Bu platform, enerji ticaretinin güvenli ve izlenebilir bir şekilde yapılmasını sağlayarak, sektördeki verimliliği artırmayı hedeflemektedir.

Akıllı sayaçlar aracılığıyla ölçülen, üretilen ve tüketilen ortalama enerji miktarları, enerji alıcısına sunulurken, satıcılar alıcıya olan mesafeye göre sıralanarak, alıcının daha yakın satıcıdan daha uygun fiyatlı enerji temin etmesine olanak tanımaktadır (Liu ve diğ., 2021). Bu sistem, blokzincir teknolojisinin enerji ticareti alanında nasıl verimlilik sağlayabileceğini göstermektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarını artıran bu ticaret modelinin, enerji alışverişi süreçlerini daha güvenilir ve şeffaf hale getirmesi, alıcı ve satıcılar arasındaki güvenin tesis edilmesine yardımcı olmaktadır. Ayrıca, Yoncacı'nın (2022) önerdiği modelde, enerji ticaretinde kullanılan ödemelerin adres tabanlı bir ödeme sistemi ile yapılması, işlemlerin daha hızlı ve şeffaf bir şekilde gerçekleşmesini sağlamaktadır (Zhang ve diğ., 2020). Remix editöründe Solidity diliyle geliştirilen bir akıllı sözleşme, enerji ticareti süreçlerini otomatikleştirerek, işlem güvenliğini ve doğruluğunu artırmaktadır. Akıllı kontratlar, enerji alışverişi ve ödeme süreçlerinin dijitalleştirilmesini sağlamakta ve böylece sektördeki finansman, şebeke işlemleri, faturalandırma ve ödeme gibi operasyonel süreçlere değer katmaktadır (Swan, 2015). Blokzincir teknolojisi, şeffaflık ve güvenilirlik sağlarken, yenilikçi bir ödeme ve ticaret altyapısı oluşturmakta ve bu altyapı, sektördeki hizmetlerin erişilebilirliğini artırmaktadır.

Sonuç olarak, Yoncacı'nın çalışması, yenilenebilir enerji sektöründe blokzincir teknolojisinin uygulanabilirliğini ve bu uygulamanın sektöre nasıl katma değer sağlayabileceğini ortaya koymaktadır. Bu çalışma, özellikle P2P enerji ticaretinin gelecekte nasıl şekilleneceği konusunda önemli bir yol haritası çizmektedir (Andoni ve diğ., 2019).

3.12. TARIM

Behnke ve Janssen (2020) blok zinciri teknolojisinin hammadde izlenebilirliği için tedarik zincirlerinde ve ürün arzında şeffaflık yaratmak için kullanılabileceğini; Abeyratne ve Monfared (2016) dağıtık defter teknolojisinin, birçok geleneksel sistemden daha güvenli, şeffaf, işbirlikçi sistemlerine dönüşmesinin devrim niteliğinde bir yenilik olduğunu belirtmişlerdir. Kamble ve diğ. (2020) merkezi olmayan, güvenli ve paylaşılan veri tabanına sahip bir blokzincir modellemiş ve bu teknolojinin kullanımının tedarik zinciri izlenebilirliğinin maliyetlerini azalttığını vurgulamışlardır. Indap (2022), çalışmasında, blokzincir teknolojisinin tarımsal gıda tedarik zinciri yönetiminde, izlenebilirlik, şeffaflık, gıda güvenliği, gıda kaybı ve sürdürülebilirlik konularında nasıl kullanılabileceği ve potansiyel katkıları üzerine çalışmasında, vaka çalışması olarak kiraz ürünü tedarik zincirinde, ürün sertifikasyonu konusunda blokzincir teknolojisinin olası katkıları üzerine sektör ve blokzincir uzmanları ile yarı yapılandırılmış mülakatlar yaparak, blokzincir teknolojisinin tarım alanında kullanımı ile ilgili farkındalık düzeyini ölçümlemiştir.

Avrupa Birliği'nin Yeşil Dönüşüm politikası, tarım sektöründe karbon emisyonlarının azaltılmasını, sürdürülebilir tarımsal uygulamaların benimsenmesini ve dijital dönüşüm araçlarının yaygınlaştırılmasını hedeflemektedir (European Commission, 2021). Blokzincir teknolojisi, bu dönüşümde önemli bir rol oynayarak tedarik zincirinde şeffaflığı ve izlenebilirliği artırmaktadır (Behnke ve Janssen, 2020). Özellikle "çiftlikten sofraya" (farm to fork) stratejisi kapsamında, tarımsal ürünlerin üretimden son tüketiciye kadar olan tüm süreçlerinin kayıt altına alınması ve doğrulanması, blokzincir sayesinde güvenilir hale gelmektedir (Galvez ve diğ., 2018; Kamble ve diğ., 2020).

Blokzincir teknolojisi, tarımsal faaliyetlerde kaynak kullanımını optimize ederek su, toprak ve enerji verimliliğini artırmayı sağlar (Sarmah ve Kaur, 2021). Örneğin, tarımsal girdilerin (tohum, gübre, pestisit) kullanım kayıtlarının blokzincir üzerinde tutulması, kaynak israfını önleyerek sürdürülebilir tarım uygulamalarının benimsenmesini kolaylaştırır (Tian, 2016). Ayrıca, karbon kredileri gibi sürdürülebilirlik teşvik mekanizmalarının doğrulanabilirliği, blokzincir teknolojisi ile güvence altına alınır (Rejeb ve diğ., 2022). Bu durum, çiftçilerin sürdürülebilir uygulamalara teşvik edilmesini sağlar. Birleşmiş Milletler'in 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA), tarım sektöründe açlıkla mücadele, gıda güvenliği, iklim değişikliğiyle mücadele ve doğal kaynakların korunması gibi hedefleri kapsamaktadır (UNDP, 2015). Blokzincir teknolojisi, bu hedeflerin gerçekleştirilmesine katkıda bulunarak tarımsal üretimde güvenilir veri akışı sağlar (Lin ve diğ., 2020). Gıda güvenliği açısından, tarımsal ürünlerin kökeninin izlenebilirliği sağlanarak sahteciliğin önüne geçilir (Galvez ve diğ., 2018). Ayrıca, küçük çiftçilerin dijital platformlara erişimi kolaylaşırken, şeffaf bir piyasa ortamı yaratılarak finansmana erişimlerinin artırılması mümkün olur (Treiblmaier ve Sillaber, 2021). Böylece blokzincir, BM sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda tarımsal kalkınmayı destekleyen güçlü bir araç haline gelir.

3.13. HAVACILIK

Blokzincir teknolojisi, havacılık sektöründe çeşitli projeler ile önemli değişimler sağlayarak sektöre ciddi katkılar sunmuştur (Taçılık, 2021). Havacılık sektörü, büyük miktarda verinin güvenli ve verimli bir şekilde yönetilmesini gerektiren bir alan olup, blokzincir teknolojisi bu süreçlerin şeffaf ve güvenli bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır (Smith ve Brown, 2020). Tablo 3.1'de görüldüğü üzere, havayolu firmaları için yolcu kimlik yönetimi, bilet rezervasyonları ve biletlerin kripto paralar ile satışı, yolcular ve pilotlar arasında özel online platformların oluşturulması, sadakat programları, kayıp bagajların takibi ve yönetimi gibi birçok uygulama blokzincir teknolojisi ile tasarlanmıştır ve sektörde yoğun olarak kullanılmaktadır (Zeren ve Demirel, 2020). Özellikle, yolcu kimlik yönetimi konusunda blokzincir tabanlı çözümler, kimlik doğrulama süreçlerini hızlandırarak sahtekarlığı azaltmakta ve güvenliği artırmaktadır (Zhang ve diğ., 2022).

Biletleme sistemlerinde blokzincir kullanımı, üçüncü taraf aracıların ortadan kaldırılmasını sağlayarak işlem maliyetlerini düşürmekte ve doğrudan havayolu şirketleri ile yolcular arasında güvenli bir işlem platformu oluşturmaktadır (Fernandes ve Patel, 2021). Ek olarak, merkeziyetsiz sadakat programları, yolcuların farklı havayolu şirketleri arasında puan transferi yapmalarını kolaylaştırmakta ve bu programların etkinliğini artırmaktadır (Anushva, 2019).

Tablo 3.1: Havayolu İşletmelerinde Geleceğe Hitap Eden Startup Projeleri (Zeren ve Demirel, 2020)

Dapps (Merkezsiz Uygulamalar) Proje Adı	**Uygulamayla İlgili Bilgiler**	**Uygulama Alanı**	**Menşei**
Taksi Blockchain	Havayolundan yararlanan yolcuların uçuş bilgilerini bir araya getiren akıllı sözleşmeler meydana getirmektedir	Havayolu İşletmeleri	İsviçre
Aeron	Çevrimiçi uçak biletinin rezervasyonu ile satın alınmasında blokzincir teknolojisinden yararlanmışlardır	Havayolu İşletmeleri	Belize
SKYBIT	Çevrimiçi uçak biletinin rezervasyonu ile satın alınmasında blokzincir teknolojisinden yararlanmışlar ve kripto paralar üzerinden ödeme yapılmasını temin etmişlerdir	Havayolu İşletmeleri	Mynmar
FLYLA GmbH	Çevrimiçi uçak biletinin rezervasyonu ile satın alınmasında blokzincir teknolojisinden yararlanmışlardır	Havayolu İşletmeleri	Almanya
Commute 21 LTD	Yolcu taşımacılığında kullanılan uçakların pilotsuz uçmasını sağlayacak sistemleri geliştirilmesi üzerinde çalışmaktadır	Havayolu İşletmeleri	Çin
Coavni	Yolcular ile pilotlar arasında uçuş platformu meydana getirilmesini temin etmişlerdir	Havayolu İşletmeleri	Fransa

Blokzincir teknolojisi, bagaj yönetimi konusunda da yenilikçi çözümler sunmaktadır. Merkeziyetsiz defter yapısı sayesinde, yolcular bagajlarının konumunu anlık olarak takip edebilmekte ve kayıp bagaj olaylarının önüne geçilebilmektedir (Lee ve diğ., 2020). Aynı zamanda, güvenli ödeme sistemleri blokzincir aracılığıyla geliştirilen akıllı sözleşmeler ile mümkün hale gelmiş olup, bu sistemler gecikmeleri azaltarak işlemlerin hızlanmasını sağlamaktadır (Kouhizadeh ve Sarkis, 2018). Ayrıca, uçuş operasyonları açısından da blokzincir teknolojisinin çeşitli faydalar sunduğu belirtilmektedir.

Özellikle uçak bakım kayıtlarının blokzincir üzerinde tutulması, verilerin güvenliğini ve değişmezliğini sağlayarak bakım süreçlerinde şeffaflığı artırmaktadır (Treiblmaier, 2018). Uçuş gecikmelerini önlemek adına geliştirilen özel sadakat programları, havayolu şirketlerinin yolcu memnuniyetini artırmasına ve operasyonel verimliliği yükseltmesine yardımcı olmaktadır (Jiang ve diğ., 2021).

Sonuç olarak, blokzincir teknolojisi havacılık sektörüne birçok yenilikçi çözüm sunmakta olup, yolcu deneyimini iyileştirme, operasyonel verimliliği artırma ve güvenliği sağlama açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Bu alanda yapılan çalışmalar, teknolojinin havacılıkta daha geniş çapta benimsenmesi için gerekli altyapının oluşturulması gerektiğini vurgulamaktadır.

3.14. İNŞAAT

Işıktekin (2020) çalışmasında, inşaat projeleri yönetimi sürecini aşama aşama aktarmış ve her aşamada karşılaşılan sorunları kök-neden analizi ile saptamıştır. Bu analizde, saptanan sorunların ilişkilerini grafikler aracılığıyla göstererek, proje yönetimindeki aksaklıkları açıkça ortaya koymuştur. Çalışmada, mevcutta kullanılan Yapı Bilgi Modelleme (YBM) teknolojisinin, bu sorunların hangilerini çözebileceği vurgulanmış ve YBM'nin sağladığı verimlilik ve doğruluk artırma özelliklerine değinilmiştir. Yapı Bilgi Modelleme (YBM) teknolojisinin, inşaat projelerindeki bilgi akışını kolaylaştırmak ve süreçleri daha şeffaf hale getirmek adına büyük bir potansiyel sunduğu belirtilmiştir (Eastman ve diğ., 2018). Ancak, bazı yönetim problemleri, YBM'nin sınırları içinde hala çözülmemiştir. Bu bağlamda, Işıktekin, blokzincir teknolojisinin, YBM teknolojisiyle entegre edilerek çözebileceği proje yönetim problemlerini ele almış ve blokzincir ile sağlanabilecek güvenlik, doğrulama ve izlenebilirlik avantajlarını tartışmıştır. Özellikle, proje süreçlerinde şeffaflık, paydaşlar arasındaki güvenin artırılması ve veri bütünlüğü gibi blokzincirin sunduğu olanaklar, inşaat projelerinin yönetimini daha etkili hale getirebilir (Wang ve diğ., 2019). Blokzincir teknolojisi, inşaat projelerindeki veri paylaşımı ve işlem güvenliğini artırarak, YBM ile birleştiğinde, proje sürecindeki her adımın doğru ve zamanında

kaydedilmesini sağlar. Bu sayede, projelerde yaşanabilecek gecikmeler ve yanlış bilgi paylaşımı gibi sorunlar minimize edilebilir (Swan, 2015). Işıktekin'in (2020) önerisiyle, blokzincir teknolojisinin YBM süreçlerine entegrasyonu ile, inşaat projelerindeki zaman yönetimi ve kaynakların etkin kullanımı gibi temel problemler çözülebilir. Bunun yanında, projedeki tüm katılımcılar, işlem geçmişini güvenli bir şekilde izleyebilir ve doğrulayabilir, böylece projelerin daha verimli ve hatasız bir şekilde yönetilmesi sağlanabilir.

Ayrıca, Işıktekin'in (2020) geliştirdiği "Yapı Bilgi Modelleme (YBM) Zincir" projesi, bu teknolojilerin entegrasyonu için somut bir çözüm sunarak, proje yönetimi sürecindeki eksiklikleri gidermeye yönelik önemli bir adım atmaktadır. Çalışma, inşaat projeleri yönetimi için daha güvenli, şeffaf ve etkin bir yol haritası çizmiştir. Blokzincir ve YBM teknolojilerinin birlikte kullanımı, inşaat sektöründe daha güvenli ve verimli bir yönetim sağlamak adına önemli bir yenilik olarak öne çıkmaktadır (Zhang ve diğ., 2020). Ayrıca, blokzincir teknolojisinin, inşaat projelerindeki sözleşmelerin ve tedarik zincirinin dijitalleştirilmesi konusunda sunduğu avantajlar da, projelerdeki tüm paydaşlar için yüksek güvenlikli ve doğrulanabilir veri akışı sağlamaktadır (Makhdoom ve diğ., 2020).

Sonuç olarak, Işıktekin'in (2020) çalışması, inşaat projelerinin yönetiminde karşılaşılan problemleri çözmek için blokzincir teknolojisinin nasıl etkili bir şekilde entegre edilebileceğini ve bu entegrasyonun projelerin yönetiminde nasıl değer yaratabileceğini ortaya koymaktadır.

3.15. SAVUNMA SANAYİİ

Blokzincir teknolojisi ve sunduğu mimari özellikler, askeri projelerde de önemli katkılar sağlayabilecek niteliktedir. Askeri alan, bir ülkenin en yüksek düzeyde mahremiyet ve veri güvenliği gerektiren sektörlerinden biridir. Bu nedenle, bilgi alışverişi ve emir komuta zincirinin güvenliği büyük önem taşır. Özel blokzincir ağlarının tasarlanması ve bu ağlarda çalışan akıllı sözleşmelerin entegrasyonu, askeri verilerin yetkisiz erişimden korunmasında etkili bir çözüm sunmaktadır (Usta ve Doğantekin, 2017). Akıllı sözleşmelerin gelişmiş kriptografik algoritmalarla desteklenmesi, şifrelenmiş mesajların bütünlüğünü sağlayarak dış müdahalelere karşı güvenli bir iletişim altyapısı oluşturur (Zhou ve diğ., 2020). Böylece blokzincir tabanlı sistemler, her seviyedeki askeri operasyonlarda izlenebilir ve değiştirilemez veri akışı sunarak operasyonel güvenliği güçlendirir (Alhadid ve Zou, 2020).

Blokzincir teknolojisi, askeri operasyonlarda veri manipülasyonunu önleme, şeffaflık sağlama ve karar destek sistemlerinin doğruluğunu artırma potansiyeline sahiptir. Verilerin her adımda dijital olarak imzalanarak bloklara kaydedilmesi, sahteciliğin önüne geçilmesini mümkün kılar (Harris,

2020). Özellikle askeri tedarik zinciri süreçlerinde, blokzincir kullanımı sayesinde lojistik faaliyetler şeffaf ve izlenebilir hale gelmektedir. Bu durum, sahte teçhizat riskini azaltarak savaş alanındaki malzeme akışının doğruluğunu ve güvenliğini artırır (Saberi ve diğ., 2019).

Ayrıca, blokzincir teknolojisi sadece güvenliği sağlamakla kalmaz; aynı zamanda tedarik zincirinin dijitalleştirilmesine yönelik önemli bir adımdır. Bu sayede askeri organizasyonlar kaynaklarını daha verimli kullanabilir. Özellikle çok uluslu askeri iş birliklerinde (örneğin NATO operasyonları), ülkeler arası güvenli veri paylaşımı için blokzincir teknolojisi büyük bir potansiyel sunmaktadır (Alhadid ve Zou, 2020; Dwivedi ve diğ., 2021). Blokzincir, taraflar arasında veri bütünlüğüne olan güveni sağlayarak uluslararası askeri iş birliklerinin etkinliğini artırır. Yapay zekâ ile entegre edilen blokzincir altyapıları, askeri karar destek sistemlerinde daha yüksek doğrulukla tehdit analizi yapılmasını sağlar. Örneğin, İHA (insansız hava aracı) operasyonlarında toplanan veriler yapay zekâ ile analiz edilip blokzincir üzerine kaydedilerek hem şeffaflık hem güvenlik elde edilir (Tian, 2021; Rejeb ve diğ., 2022).

Sonuç olarak, blokzincir teknolojisi askeri alanda yalnızca bilgi güvenliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda operasyonel verimliliği ve uluslararası iş birliklerini güçlendiren stratejik bir araçtır. Bu teknolojinin sunduğu değiştirilemezlik, şeffaflık ve güvenilirlik özellikleri, askeri stratejilerin başarıya ulaşmasında belirleyici rol oynayabilir.

4. TARIM SEKTÖRÜNE YÖNELİK BLOKZİNCİR UYGULAMALARI, GETİRDİĞİ YENİLİKLER VE AVANTAJLARI

Tarım sektöründe, aşağıdaki temel başlıklarda bir takım blokzincir uygulamalarının geliştirildiğini görmekteyiz (Doğantuna, 2019):

- Tarımsal ürün ve gıda tedarik zinciri yönetimi,
- Gıda güvenliği ve bütünlüğü,
- Tarımsal ürünlerin son kullanıcıya ulaşmasında şeffaflık ve izleme,
- Tarımsal ürünlerinin kalite güvencesi ve yönetimi.

Ayrıca, tarım sektöründe blokzincir teknolojileri ile ilgili bilimsel makalelerin yaklaşık %60'ının tarımsal ürün gıda tedarik zinciri yönetimi üzerine olduğu gösterilmiştir (Bermeo-Almeida, 2018). Tarım ve blokzincir kavramlarını irdeleyen bilimsel çalışmalardan bazı makaleler ise tarımsal ürünlere ait tedarik zinciri yönetiminde, gıda güvenliği ve bütünlüğüne temel teşkil eden bilgi güvenliği sistemlerine entegrasyonu üzerine olmuştur. Bu konu üzerine odaklanan bir çalışmada ise blokzincir teknolojisinin uygulanması ile tarımsal ürün gıda tedarik zinciri yönetiminin aktörleri olan üreticiler, ürün işleyiciler, aracılar ve tüketiciler için bir tedarik zinciri yönetimi platformu yaratmayı tavsiye etmektedir (Tse ve diğ., 2017).

Diğer bir çalışmada ise, tarım sektöründe faaliyet gösteren firmalarda süreçlerin şeffaflığı ve titiz bir şekilde izlenmesi, raporlanması üzerine blokzincir teknolojisinin kullanım durumu incelenmiştir (Papa, 2017). Diğer taraftan, Lucena (2018) çalışmasında, Brezilya Tarım Ürünleri İhracatçıları Birliği'nin, HyperLedger blokzincir ağını kullanarak tarım ürünlerinin kalite güvencesi ve yönetimi üzerine bir case-study sunmuştur. Ayrıca, Caro'nun (2018) ortaya koyduğu "AGRIBLOCKIOT" sistem mimarisi ile IoT (Nesnelerin İnterneti) ve blokzincir mimarisinin birlikte kullanılarak tarımsal ürün tedarik zinciri yönetiminde gıda güvenliği için yeni bir sistem mimarisi ortaya konulmaktadır. Tian (2016) yaptığı çalışma ile tarımsal ürün tedarik zinciri yönetiminin şeffaflığı üzerine, RFID (Radyo Frekansı ID) ve Bloknccincir teknolojilerinin birlikte kullanılabilirliği üzerine bir analiz yapmıştır.

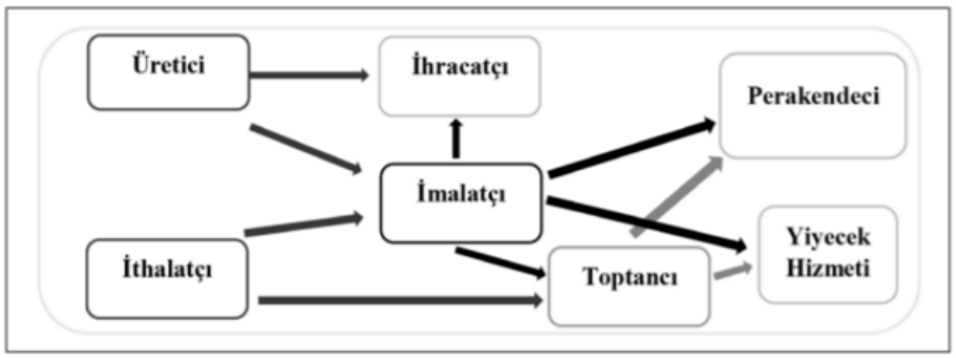
Blokzincir teknolojisi ilk uygulama alanını ve etkilerini, finans ve bankacılık sektörlerinde göstermiştir. Blokzincir uygulamalarının, finans ve bankacılık sektörlerinde yer bulması sonraları blokzincir mimarisinin ve getirilerinin çok daha fazla hissedilmesinin önünü açmıştır. Blokzincir teknolojisi özellikle 2008 yılı Ekim ayında Bitcoin blokzincir ağının ortaya çıkması sonrasında Bitcoin ağı ve kripto para biriminin piyasada zaman içinde kabul görmesi ile daha çok duyulmaya başlanmıştır ve günümüzde birçok sektörde kullanım alanı bulmuştur. Araştırmalara göre kurumsal iş dünyasının ve sektörlerin özellikle 2018 yılı ve sonrasında mevcut iş süreçlerinin

iyileştirilmesi ve belki de yeniden tasarlanması yönünde blokzincir teknolojisinin benimsenmesinde artış görülmektedir (Demirkan, 2021). Finans, Bankacılık, otomotiv, tarım, sağlık, gayrimenkul, lojistik ve enerji gibi birçok sektörde blokzincir teknolojisi uygulama alanı bulmuştur (Deloitte Türkiye, 2018). Blokzincir teknolojileri ve mimarisi bu sektörlerin süreçlerdeki verimsiz ve yüksek maliyetli aşamaların yeniden tasarlanıp geliştirilmesini sağlayacak bir yaklaşım ortaya koymuştur.



Şekil 4.1: Blokzincir Teknolojisinin Bazı Sektörlerde Kullanımı (Doğantuna, 2019)

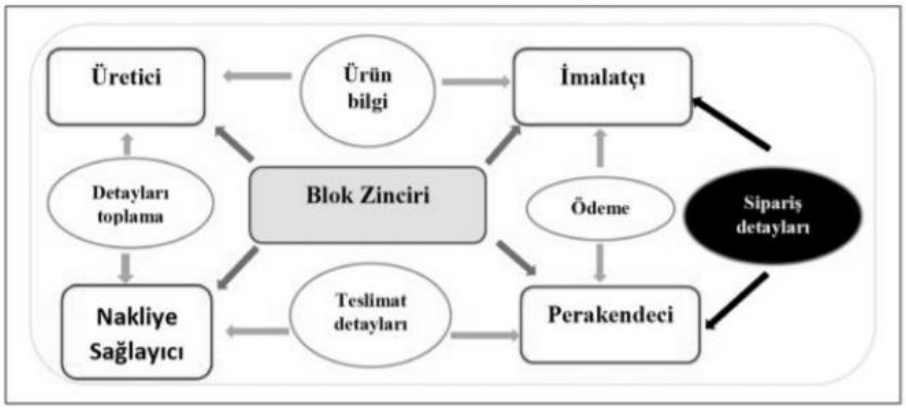
İrak ve Topcu'ya (2020) göre, Tarım sektörü için, tarım ürünleri tedarik zinciri ve yönetiminde blokzincir teknolojisi uygulama örneği aşağıda gösterilmiştir. Mevcut tedarik zincirlerinde bulunan üreticiler, ürün işleyiciler ile başlayıp aracılar ile devam eden ve perakendeci ve hizmeti alan veya tüketiciye kadar olan tüm aktörler arasında doğrusal bir akış vardır.



Şekil 4.2: Geleneksel Tedarik Zinciri Örneği (İrak ve Topcu, 2020)

Blokzincir teknolojisinin ve sunduğu mimarinin tarım ürünleri tedarik zincirinde kullanımı ile birlikte, aktörler arasındaki veri akışı merkezden başlayarak dağıtılmakta ve blokzincir ağında

yapılan tüm işlemler, blokzincir ağı içerinde dağıtık olarak kayıt altında tutulmaktadır. Blokzincirde bulunan aktörler, yerine getirdikleri süreç işlemlerini blokzincir ağına dağıtık olarak kaydedebilmekte ve yerine getirdikleri işlemleri, ilgili blokzincir ağı bloklarını inceleyerek okuyabilmektedirler (İrak ve Topcu, 2020).



Şekil 4.3: Geleneksel Tedarik Zincirinde Blokzincir Teknolojisinin Uygulanması (İrak ve Topcu, 2020)

Blokzincir teknolojisinin "Geleneksel Tedarik Zincirine Uygulanması" ile ortaya konulan Blokzincir temelli Tedarik zinciri yönetiminde, geleneksel tedarik zincirinde her bir aktör tarafından üretilen bilginin, yine aynı noktada kalması, yani tedarik zincirinde bulunan diğer aktörler tarafından görülememesi problemi, blokzincir teknolojisinin sunduğu dağıtık defter mimarisi ile ortadan kaldırılmaktadır (İrak ve Topçu, 2020). Geleneksel tedarik zincirinde, son tüketici aldığı gıdanın kökenini ve kaynağını ve geçtiği aşamaları görememektedir.

Blokzincir temelli tedarik zinciri yönetiminde ise, tarımsal ürün üreticiden, yani çiftçiden, ürün işleyiciye, yani imalatçıya, oradan aracı, yani nakliyeciye, oradan perakendeciye geçiş aşamalarında her bir blokzincir ağ noktası ve düğümünde bulunan aktör, kendi yaptığı işlemi blokzincir ağına dağıtık defter mimarisi ile kaydetmektedir ve her bir aktör kendisi ile ilgili tüm bilgileri dağıtık defter mimarisi ile birçok noktada kaydı bulunan kayıtlardan elde edip okuyabilmektedir. Dolayısıyla, geleneksel gıda tedarik zincirlerinde bulunan bilgi akışının blokzincir mimarisi ile merkeziyetsiz olarak dağıtık kayıt altında tutulması ile bilgi eksiklikleri ve ek maliyetler önlenebilmektedir. Özetle, blokzincir temelli tedarik zincirlerinde, her bir aktör kendisi ile ilgili bilgi ve işlemleri okuyabilmektedir ve son tüketici de aldığı gıdanın kaynağını şeffaf bir şekilde görebilmektedir.

Tarım sektörü, Neolitik Çağ'da yaklaşık olarak M.Ö. 9000 yıllarında başlamıştır ve küresel ekonomi için büyük önem arz etmeye devam etmektedir. Ülkelerin gelişmişlik düzeyleri fark etmeksizin tarım sektörü ülkeler için kritik bir sektördür. Tarım, gıda üretiminin güvenliğini sağlama ve sanayi sektörüne hammadde temin etme işleviyle sanayileşmiş ülkeler için de

vazgeçilmez ve stratejik bir sektör olarak öne çıkmaktadır (Silsüpür, 2011). Bu sektörün gelişiminin diğer sektörlerin gelişimine ve ekonomiye katkısı bulunmaktadır. Tarım sektöründe gerçekleşecek bir büyüme, sektörler arasındaki ticari ilişkilerin artmasını sağlayacak ve bunun sonucunda tarım sektörü ekonomiye entegre olarak sanayinin ve diğer sektörlerin gelişimine katkıda bulunacaktır (Dura, 1987). Kaynak yetersizliği, artan talep gibi faktörler tarım sektöründe gelişim ihtiyacını doğurmaktadır. Bu sebeplerden ve sahip olduğu potansiyelden ötürü tarım sektörünün gelişimi teknolojideki gelişmelerle desteklenmiştir, sorunlara çözüm aranmıştır.

Blokzincir uygulamaları tarım sektörünü önemli ölçüde etkilemiştir, birçok yenilik sunmuştur. "Blokzincir teknolojisi, son dönemde ulusal ve uluslararası basın, çeşitli uluslararası kuruluşlar, özel sektör ve kamu tarafından yoğun ilgi görmektedir; bazı araştırmacılar ise bu teknolojiyi internetten daha güçlü bir potansiyele sahip olarak nitelendirmektedir (Sultan ve diğ., 2018). Blokzincir uygulamaları mevcuttaki birçok sorunu çözüme ulaştırmaktadır. Blokzincir, işlemlerde şeffaflığı sağlaması, paydaşlar arasındaki entegrasyonu güçlendirmesi ve dijitalleşmeyi artırmasıyla tedarik zinciri performansını destekleyebilecek güvenilir bir teknolojidir (Sheel ve Nath, 2019). Küresel ekonomiyi büyük ölçüde etkileyen Blokzincir uygulamaları tarım sektörüne de birçok yenilik ve avantaj kazandırmıştır. Tarım sektörü halihazırda gelişmeye ihtiyaç duyarken blokzincir, tarım uygulamalarının gelişim sürecini desteklemektedir.

Blokzincir teknolojisi son dönemlerde, gıda tedarik zincirindeki çeşitli zorlukları çözmede önemli bir ivme kazandırmıştır (Demestichas ve Daskalakis, 2020; Nandi ve diğ., 2021; Upadhyay ve diğ., 2021). Blokzincir uygulamaları tarım sektöründe süregelen takip etme zorluğu ve tedarik zinciri yönetimi gibi problemleri çözmede etkili olmuştur. Blokzincir teknolojisinin savunucuları, bu teknolojinin daha verimli izlenebilirlik özellikleri sayesinde gıda geri çağırmalarını azaltarak sürdürülebilir tarımı desteklediğini; değiştirilemez ve şeffaf yapısıyla tedarik zincirindeki karbon emisyonlarının doğruluğunu belirlemede yardımcı olduğunu ifade etmektedir (Nayal ve diğ., 2021; Saberi ve diğ., 2018). Blokzincir uygulamalarının efektif verimli izlenebilirliği sağlaması sürdürülebilir tarımı mümkün kılmaktadır.

4.1. TARIMSAL GIDA ÜRÜNLERİNİN TEDARİK ZİNCİRİ YÖNETİMİNDE BLOKZİNCİR TEKNOLOJİSİNİN ETKİSİ

Dünya nüfusunun artması tarımsal gıda ihtiyacının artmasına sebep olmuştur. Artan sera gazı emisyonlarının etkisiyle hızla ilerleyen ve önlenmesi giderek zorlaşan iklim değişikliği, dünya genelindeki mahsul veriminin yaklaşık dörtte birini tehlikeye atmaktadır (Misra ve Mention, 2022). Artan talebe karşın mahsulün verimsizleşmesi ve talebin karşılanmasında zorluk yaşanması tarım sektöründe tedarik zincirini daha karmaşık bir yapı hâline getirmiştir. Oluşan bu karmaşık yapı tedarik zincirinde sorunlar yaratmaktadır. Tedarik zincirindeki üyeler arasında güven eksikliği, yetersiz bilgi ve düşük iletişim gibi sorunlar, halihazırda mevcut tedarik zincirinin en büyük problemleri arasında yer almaktadır (İrak ve Topçu, 2020). Tedarik zincirinin yarattığı sorunlar üretim ve dağıtımı etkilemektedir. Üreticiler, tüketicilerin taleplerini karşılamakta sorun yaşamaktadırlar. Blokzincir uygulamaları ortaya çıkan tedarik zinciri problemlerini çözebilmektedir.

Tedarik zincirinin blok zinciri teknolojisiyle yeniden yapılandırılması, süreçlerin izlenebilirliğini kolaylaştırırken aynı zamanda verimlilik ve güvenilirliği de arttırmaktadır (Yıldızbaşı ve Üstünyer, 2019). Blokzincir teknolojisi tedarik zincirinin takibini kolaylaştırdığından ötürü tarım sektöründe süreci iyileştirmektedir. Artan nüfustan dolayı artan üretim ihtiyacı blokzincir uygulamaları desteğiyle karşılanabilmektedir. Zamanla tüketiciler daha bilinçli hâle gelmişlerdir ve tarım sektöründe güven problemi oluşmuştur. Blokzincir uygulamalarının sağlamış olduğu izlenebilirlikteki şeffaflık tüketicilerin akıllarındaki soru işaretlerini kaldırmaya yardım etmektedirler. İzlenebilirlikte şeffaflığı sağlamak ve olası sorunları çözmek için blok zinciri teknolojisinin kullanılması gerekmektedir (Gerdan ve diğ., 2020). Gıda tedarik zincirinden kaynaklı hastalıkların oluşması da tüketicilerin güvenini zedelemektedir. Gıda maddelerinin kökeni, kalitesi ve güvenliğinin doğru bir şekilde izlenebilmesi için bir sistemin kurulması, tüketiciler, düzenleyiciler ve endüstri paydaşları açısından büyük önem taşır. Blokzincir uygulamaları sonucuyla gıda kaynaklı hastalık riskleri azalmaktadır. Süreçlerin şeffaf olarak izlenebilmesi, tüketicileri kasten ekonomik kazanç için kandıran gıda sahtekârlarının engellenmesine de katkı sağlamaktadır.

Blok zinciri uygulamaları, tarım sektöründe tedarik zincirini daha şeffaf ve verimli hale getirebilir, gıda sahteciliğini önleyebilir ve tüketicilerin satın aldıkları gıdanın gerçek kaynağına dair bilgi edinmelerini sağlayabilir. Mukherjee ve diğ. (2022) bu teknolojinin tarımsal sürdürülebilirliği nasıl geliştirebileceğini tartışarak, blokzincirin verilerin güvenli ve değiştirilemez bir şekilde kaydedilmesini sağlayarak, tedarik zincirinde şeffaflık ve izlenebilirlik sunduğunu belirtmektedir. Bu da tüketicilere ürünlerinin kaynağı hakkında doğru bilgi vererek, gıda güvenliğini artırır. Tüm bunların sonucu olarak blokzincir uygulamalarıyla üretici ve müşteri arasındaki güven problemleri çözülür ve tedarik süreci iyileşir.

Blokzincir teknolojisi, tarım sektöründe şeffaflık ve güvenilirliği artırarak sektörün kaderini ve geleceğini önemli ölçüde etkilemiştir. Blokzincir teknolojisi, e-tarım sayesinde ürünlerin takibini kolaylaştırarak gıda güvenliğini artırır, piyasa verimliliğini yükseltir ve belirsizliklerle mücadele eder (Özyürek, 2021). E-tarım sistemlerinde blokzincir teknolojisini uygulamak, bilgilerini paylaşarak e-tarım sunucularını çiftçilik faaliyetlerini iyileştirmede kullanan katılımcılar arasında güven oluşturmaya yardımcı olur; bu hizmetler maliyet etkinliğini, gıda güvenliğini artıracak, belirsizliği ve riskleri azaltacaktır (Al-Jaroodi ve Mohamed, 2019). Bu sayede süreçler optimize edilir ve verimlilikleri artırılabilir, sürdürülebirlik sağlanabilir.

Blokzincir teknolojisi şüphesiz tarım sektörünün geleceğini derinden etkilemiştir. Hem üretici hem tüketici açısından hem daha şeffaf hem de daha güvenilir bir ortam sağlamıştır. Gelecekte de sektörde önemli bir yer edineceği ve sektörü değiştireceğine şüphe yoktur. Ancak bunların yanında olası zorlukların olması ihtimali oldukça yüksektir. Maliyetinin ağır olmasının kırsaldaki küçük çiftçiler için karşılamasının zor olması, teknolojinin yaygınlaşmasını yavaşlatabilir. Ayrıca, blokzincir ağlarının yüksek enerji tüketimi de bir diğer zorluktur. Ianstiti ve Lakhani (2017) gibi araştırmacılar, bu teknolojinin potansiyelini vurgularken aynı zamanda bu zorlukların üstesinden gelinmesi gerektiğini belirtmektedir.

4.2. TARIMDA BLOKZİNCİR KULLANIMI

Tarımda blokzincir teknolojisi, çiftçilerin karşılaştığı temel sorunlara çözüm sunarak sektörde önemli bir dönüşüm sağlamaktadır. Bu teknoloji öncelikli olarak üç ana alanda kullanılmaktadır: mahsul ve gıda üretimi, iklim krizinin yönetimi ve tarım finansmanının düzenlenmesi. Mahsul ve gıda üretiminde blokzincir, ürünlerin tarladan sofraya kadar olan yolculuğunu şeffaf ve izlenebilir hale getirerek gıda güvenliğini artırmakta ve sahteciliği önlemektedir. İklim krizinin yönetiminde ise, blokzincir destekli veri paylaşım sistemleri sayesinde çiftçiler iklim değişikliği, kuraklık veya sel gibi ani hava olaylarına karşı daha hazırlıklı olabilir, böylece erken uyarı sistemleri ve veri tabanlı karar alma mekanizmaları daha etkili çalışır. Tarım finansmanı alanında blokzincir, çiftçilerin krediye erişimini kolaylaştırmakta, akıllı sözleşmeler aracılığıyla ödemeleri güvence altına almakta ve mikrofinans çözümleri sunarak küçük ölçekli üreticilerin ekonomik sürdürülebilirliğini desteklemektedir. Bu üç temel kullanım alanı, blokzincirin tarım sektöründe nasıl stratejik bir rol oynadığını açıkça ortaya koymaktadır ve aşağıda detaylı değerlendirilmiştir.

Özetle, blokzincir teknolojisi tarım sektöründe yalnızca verimliliği artırmakla kalmayıp, aynı zamanda şeffaflık, güvenilirlik ve sürdürülebilirlik gibi kritik alanlarda da iyileştirmeler sunmaktadır. Mahsul takibinden iklim risklerinin yönetimine ve finansal erişime kadar geniş bir yelpazede sağladığı katkılar, bu teknolojinin tarımda neden stratejik bir öneme sahip olduğunu gözler önüne sermektedir. Bu doğrultuda, blokzincirin doğru şekilde entegre edilmesi ve yaygınlaştırılması, tarım sektörünün gelecekteki dayanıklılığını ve gelişimini doğrudan etkileyebilecek önemli bir faktör olarak değerlendirilmektedir.

4.2.1. Mahsul ve Gıda Üretimi

Artan nüfusun ihtiyaç duyduğu gıda taleplerini karşılamada sınırlı hammadde ve iklim krizi faktörleri problem yaratmaktadır. Çiftçiler, üretim sürecini yönetmekte ve müşteri talebini karşılamakta zorlanmaktadırlar. Blokzincir teknolojiai, Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojisi ile entegre edildiğinde, üreticilerden imalatçılara ve gıda dağıtıcılarına kadar gıda işleme sektöründe dönüşüm sağlamaktadır. Blokzincir teknolojisinin, “Su, iş gücü ve gübre gibi çiftlik hizmetlerinden yararlanarak, tarımı daha verimli ve rekabetçi hale getirmek için daha etkili bir çözüm sunmayı amaçlamaktadır” (Kumar ve diğ. 2024).

Artan dünya nüfusu ve bununla doğru orantılı olarak yükselen gıda talebi, tarım sektörünü daha verimli, şeffaf ve sürdürülebilir çözümler aramaya itmektedir. Ancak bu talebi karşılamada sınırlı doğal kaynaklar, arazi kıtlığı, değişen tüketici davranışları ve iklim krizi gibi faktörler önemli engeller oluşturmaktadır. Çiftçiler, üretim sürecinde veri eksikliği, güvenlik açıkları ve tedarik

zinciri boyunca yaşanan izlenebilirlik sorunları nedeniyle hem verimlilik hem de kalite açısından zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır (Kumar ve diğ., 2024). Bu bağlamda, blokzincir teknolojisinin Nesnelerin İnterneti (IoT) ile entegrasyonu, tarımsal üretim süreçlerine devrimsel bir nitelik kazandırmaktadır. Blokzincir, ürünlerin tarladan sofraya kadar tüm yolculuğunu kayıt altına alarak, şeffaflık ve güvenilirlik sağlamaktadır (Marzougoui ve diğ., 2024). Örneğin, sensörlerle donatılmış akıllı tarım sistemleri sayesinde toprak nemi, sıcaklık, gübre kullanımı gibi veriler blokzincir üzerinde otomatik olarak kaydedilmekte ve paydaşlarla paylaşılabilmektedir. Bu da hem üretimin optimize edilmesini sağlamakta hem de tüketiciye güvenilir bilgi sunarak gıda güvenliğini artırmaktadır (Safeer, 2024).

Ayrıca, söz konusu teknoloji sayesinde su, gübre ve enerji gibi kaynakların kullanımı daha etkin hale gelmekte, böylece maliyetler azalmakta ve çevresel sürdürülebilirlik desteklenmektedir (Zhang, 2023). Blokzincirin akıllı kontratlarla birlikte kullanılması ise üretici ve alıcı arasında doğrudan güvene dayalı ticareti mümkün kılmakta, aracılara olan bağımlılığı azaltmakta ve çiftçinin gelir güvencesini artırmaktadır (Patra, 2022). Sonuç olarak, blokzincir ve IoT teknolojileri, tarımda dijitalleşmeyi hızlandırarak hem üreticinin hem de tüketicinin kazançlı çıkacağı bütünsel bir sistem sunmaktadır.

4.2.2. İklim Krizini Yönetme

Ekilen mahsullerin gelişimi, ekildiği dönem, verimi iklimsel koşullara bağlıdır. İklim krizi sebebiyle çiftçiler bekledikleri hava durumlarıyla karşılamamaktadırlar. Bu belirsiz hava durumlarının sonucu olarak tarım sektöründe verim düşmektedir. Mahsuller için hava koşulları kritik rol oynamaktadır. Aşırı hava koşulları tarımsal üretimi tehdit ederek gıda güvenliğini riske atar (Lesk ve diğ., 2016). Çiftçiler, belirsiz hava koşullarından ötürü verimsiz mahsulle karşılaştıklarında bu durum, tüketiciye fiyat artışı olarak dönmektedir. Blokzincir teknolojisi, çiftçilerin ve diğer paydaşların gıda dağıtım sektöründeki fiyat farklılıklarını izleyebilmesini sağlayarak daha fazla bilgi edinmelerine olanak tanır. “Lisanslı kurumlar, iklim koşullarını blokzincir defteri üzerinden izleyebilir ve bu izlenebilirlik sayesinde çiftçiler, akıllı sözleşmeler aracılığıyla ürün sigortası tazminatları alabilirler” (Kumar ve diğ. 2024). Bu süreç 3 adımdan oluşmaktadır: Hava Durumu İstasyonu hayati verileri blokzincire gönderir, çiftçiler tarafından önleyici önlemler alınır, tarım sübvansiyonları için hızlı başvuru yapılır.

İklim krizi, tarım sektörünü doğrudan etkileyen ve giderek artan bir tehdit oluşturan faktörlerin başında gelmektedir. Mahsullerin gelişimi, ekildiği dönem ve nihai verimi büyük ölçüde iklimsel koşullara bağlıdır. Ancak günümüzde çiftçiler, geçmişe kıyasla daha öngörülemez ve aşırı uçlarda seyreden hava koşullarıyla karşılaşmakta; bu durum tarımsal verimliliği olumsuz yönde

etkilemektedir (Lesk ve diğ., 2016). Kuraklık, aşırı yağışlar, don olayları veya sıcak hava dalgaları gibi iklim kaynaklı ekstrem olaylar, ürün kayıplarına ve dolayısıyla gıda arzında dengesizliklere neden olmaktadır. Bu durum yalnızca üreticiyi değil, zincirin diğer halkalarını da etkileyerek tüketiciye fiyat artışı olarak yansımaktadır. Gıda güvenliği açısından da ciddi tehdit oluşturan bu kriz ortamında, tarımsal üretimin istikrarını sağlamak için teknoloji destekli çözümler giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

Blokzincir teknolojisi, tarımsal verilerin güvenli, değiştirilemez ve şeffaf biçimde kayıt altına alınmasını sağlayarak, iklim temelli belirsizliklere karşı yeni bir direnç mekanizması sunmaktadır. Örneğin, blokzincir tabanlı sistemler aracılığıyla hava durumu istasyonlarından gelen veriler gerçek zamanlı olarak bloklara kaydedilmekte, bu sayede çiftçiler ani değişimlere karşı daha hızlı önlemler alabilmektedir (Omar ve diğ., 2023). Bu süreç üç temel adımda işlemektedir: İlk olarak, hava durumu istasyonları nem, sıcaklık, yağış miktarı gibi kritik verileri blokzincir ağına aktarır. Ardından çiftçiler bu verilere dayanarak sulama, gübreleme veya hasat zamanlaması gibi stratejik kararlarını optimize eder. Son olarak, meydana gelen zararlarda, akıllı sözleşmeler aracılığıyla sigorta şirketleri tarafından hızlı ve güvenilir tazminat ödemeleri yapılır (Kumar ve diğ., 2024). Bu sistem, yalnızca üreticiye değil; devlet kurumlarına, tarım sigortası sağlayıcılarına ve tüketicilere de yüksek düzeyde şeffaflık sunar. Ayrıca, geçmiş iklim verilerinin değiştirilemez biçimde kayıt altına alınması, uzun vadeli tarım politikalarının oluşturulmasında ve iklim değişikliği ile mücadelede önemli bir veri kaynağı oluşturmaktadır (Awan ve diğ., 2023). Böylece blokzincir, sadece kısa vadeli risk yönetimi değil, aynı zamanda iklim adaptasyonuna yönelik stratejilerin geliştirilmesinde de kilit rol oynamaktadır. Bu bağlamda, iklim değişikliğinin tarım üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmada blokzincir teknolojisinin entegre edilmesi, sürdürülebilir ve dayanıklı bir tarım ekosistemi için vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir.

4.2.3. Tarım Finansmanını Yönetmek

Çiftçiler tarım operasyonlarını optimize ederken finansal açıdan sorun yaşamaktadırlar. Alıcılar, yeterli mal temininde zorluk yaşarken, finansal kurumlar küçük çiftçilere harcama imkânı sağlamakta ve finansman engellerini hafifletmektedir. “Blokzincir, şeffaflık ve erişilebilirlik sunarak tarım finansmanına tutarlılık katmaktadır.” (Kumar ve diğ., 2024). Tarım sektörü birçok koşula bağlı olduğundan dolayı risk taşımaktadır. "Tarım sigortası planları, genellikle hava koşullarına bağlı riskleri yönetmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir" (Xiong, Dalhaus, Wang ve Huang, 2020). Bu sigorta kapsamında çitçiler ekim döneminden önce sigortayı yaparlar ve olası bir kayıp durumunda sigorta ödemesi alırlar. Blokzincir, endeks sigortasını iki farklı açıdan geliştirmeye yardımcı olabilir. İlk olarak, ödemeler, akıllı sözleşmelerde tanımlanan hava durumu verilerine dayalı olarak zamanında ve otomatik şekilde yapılabilir. İkinci olarak, hava

durumu verileri, bitki büyüme bilgileri veya çiftlik makinelerinden alınan veriler gibi diğer kaynaklar, temel risk azaltımını iyileştirerek endeks belirleme ve ödeme sürecini daha verimli hale getiren akıllı bir sistemle otomatik olarak entegre edilebilir (Gatteschi ve diğ., 2018).

4.3. AKILLI TARIM

"Akıllı tarım, BİT, nesnelerin interneti (IoT) ve insansız hava araçları (İHA) gibi teknolojilerin yanı sıra sensörler ve makine öğrenimi gibi çağdaş veri toplama ve analiz araçlarının kullanımını içermektedir." (Xiong ve diğ., 2020). Akıllı tarım verimin çok yüksek olmasını hedeflediğinden çok fazla veriyi kullanmakta ve yönetmektedir. Çok fazla veri kullanıldığından dolayı güvenlik sorunları yaşanabilmektedir. "Blokzincir teknolojisi, tarım ürünlerinin tohumdan satışa kadar olan tüm üretim süreçlerinde, farklı aktörler ve paydaşlar tarafından oluşturulan verilerin ve bilgilerin güvenli bir şekilde saklanmasını sağlar. Bu teknoloji, verilerin şeffaf bir şekilde paylaşılmasına olanak tanırken, kaydedilen tüm bilgilerin geri alınamaz ve değiştirilmez olmasını temin eder" (Xiong ve diğ., 2020). Blokzincir uygulamaları sayesinde güvenlik sistemi kurmak kolaylaşmaktadır.



Blockchain Türü	İzinsiz ve izinli	İzinli	İzinsiz ve izinli	İzinsiz ve izinli	İzinsiz	İzinsiz ve izinli	İzinsiz	İzinli
Blockchain Platformu	Ethereum ve Hyperledger	Hyperledger	Ethereum ve Hyperledger	Ethereum ve Hyperledger	Ethereum	Ethereum ve Hyperledger	Ethereum	Hyperledger
Konsolos Mekanizması	PoW, PoS ve (P)BFT	(P)BFT	PoW, PoS ve (P)BFT	PoW, PoS ve (P)BFT	PoW ve PoS	PoW, PoS ve (P)BFT	PoW ve PoS	(P)BFT

Şekil 4.4: Tarım için Blokzincir Teknolojisi: Uygulamalar ve Gerekçe (Xiong ve diğ., 2020)

Tarım sektörü, artan küresel nüfus, iklim değişikliği ve gıda güvenliği gibi zorluklarla karşı karşıya kalarak, üretim süreçlerinde daha verimli, şeffaf ve sürdürülebilir çözümler arayışına girmiştir. Bu bağlamda, blokzincir teknolojisi, tarımsal tedarik zincirlerinde devrim niteliğinde yenilikler sunarak, ürünlerin tarladan sofraya kadar olan yolculuğunda izlenebilirlik ve güvenilirlik sağlamaktadır (Behnke ve Janssen, 2020).

Blokzincir, merkezi olmayan ve değiştirilemez bir defter yapısıyla, tarımsal ürünlerin üretiminden tüketimine kadar olan süreçte tüm paydaşların erişebileceği şeffaf bir kayıt sistemi oluşturur. Bu sayede, ürünlerin menşei, yetiştirilme koşulları ve taşınma süreçleri gibi kritik bilgiler güvence altına alınır ve tüketicilerin bilinçli tercihler yapmasına olanak tanır (Behnke ve Janssen, 2020). Örneğin, IBM'in geliştirdiği Food Trust platformu, tedarik zinciri boyunca gıda ürünlerinin izlenebilirliğini artırarak, gıda güvenliğini sağlamayı hedeflemektedir (Behnke ve Janssen, 2020).

Ayrıca, blokzincir tabanlı akıllı kontratlar, tarımsal işlemlerin otomatikleştirilmesine ve aracıların ortadan kaldırılmasına yardımcı olarak, işlemlerin hızını ve güvenilirliğini artırır. Bu sözleşmeler, belirli koşullar yerine getirildiğinde otomatik olarak yürürlüğe girer ve taraflar arasındaki güven sorunlarını minimize eder (Hasan ve diğ., 2022). Örneğin, bir çiftçi belirli bir miktarda ürün teslim ettiğinde, ödeme otomatik olarak gerçekleştirilir, böylece ödemelerde gecikme veya anlaşmazlıkların önüne geçilir.

Blokzincir teknolojisinin tarımsal tedarik zincirlerinde uygulanması, gıda güvenliğini artırmanın yanı sıra, sahtekarlık ve yolsuzluk gibi sorunların da önüne geçilmesine katkı sağlar. Her işlemin değiştirilemez bir şekilde kaydedilmesi, tedarik zincirindeki tüm aktörlerin hesap verebilirliğini artırır ve tüketicilerin güvenini pekiştirir (Kamble ve diğ., 2020).

Ayrıca, blokzincir teknolojisi, tarım sigortası ve finansmanında da yenilikçi çözümler sunmaktadır. Örneğin, hava koşullarına dayalı sigorta poliçeleri, blokzincir tabanlı akıllı sözleşmeler aracılığıyla otomatikleştirilerek, çiftçilerin iklim değişikliğinin olumsuz etkilerine karşı korunmasına yardımcı olur (Omar ve diğ., 2023). Bu sistemler, hava durumu verilerini gerçek zamanlı olarak izleyerek, belirlenen koşullar gerçekleştiğinde tazminat ödemelerini otomatik olarak tetikler.

Blokzincir ve Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojilerinin entegrasyonu, tarımsal üretimde veri toplama ve analiz süreçlerini geliştirerek, çiftçilerin daha bilinçli kararlar almasına olanak tanır. Sensörler aracılığıyla toplanan veriler, blokzincir üzerinde güvenli bir şekilde saklanarak, tarımsal faaliyetlerin optimize edilmesine katkı sağlar (Awan ve diğ., 2023).

Sonuç olarak, blokzincir teknolojisi, tarım sektöründe şeffaflık, güvenilirlik ve verimlilik sağlayarak, sürdürülebilir akıllı tarım uygulamalarının benimsenmesine önemli katkılarda bulunmaktadır. Bu yenilikçi yaklaşım, tarımsal üretim ve dağıtım süreçlerinde devrim yaratarak hem üreticilerin hem de tüketicilerin fayda sağlamasına olanak tanımaktadır.

5. TOKEN, TOKENLEŞTİRME VE TOKEN EKONOMİSİ KAVRAMLARI

M.Ö. 600'lerde Anadolu'da Lidya kralı Alyattes'ın ilk parayı basmasıyla, insanoğlunun o zamana kadar alışverişlerinde kullandığı geleneksel emtianın yerini devletler tarafından basılan paralar almaya başlamıştır. İnsanlığın yaşamı ve değişimi, gelişimi ile doğru orantılı olarak ortaya çıkan alışveriş ihtiyacı ile değiş-tokuş aracı olarak kullanılan para birtakım evrelerden geçerek şu anki haline ulaşmıştır (Sanlioglu, 2019). Özellikle son 50 yıldır çok büyük bir ivme ile ilerleyen teknolojik gelişmelerin etkisiyle para kavramı da dijitalleşme sürecinden nasibini almıştır. Özellikle, 2008 yılı Ekim ayında yayınlanan manifesto ile blokzincir altyapısı ile oluşturulan ilk blokzincir temelli aracısız ve merkeziyetsiz bir mimari de tasarlanan Bitcoin blokzincir ağı ve bu ağa ait dijital kripto para birimi Bitcoin ile para kavramı evrimleşme sürecinde farklı ve önemli bir aşamaya ulaşmıştır (Nakamoto, 2008). Bu tarihten sonra Bitcoin blokzincir ağı gibi başta Ethereum blokzincir ağı olmak üzere farklı amaçlara hizmet eden blokzincir ağları ve bu ağların dijital kripto paraları oluşturulmuştur.

Devletlerin çıkardığı kendi paraları, yani bir nevi geleneksel para dediğimiz itibari paralar ve diğer taraftan 2008 Ekim ayı sonrası hayatımıza giren, "Satoshi Nakamoto" takma ismini kullanan bir kişi veya kişiler tarafından, matematiksel bir kripto algoritması ile bir matematiksel problemin çözümü karşılığında "bitcoin" ödülü veren ve "dijital-sanal-kripto para birimi" olarak adlandırılan soyut para birimleri ortaya çıkmıştır (Sanlioglu, 2019). Bir tarafta, yüzyıllar içinde evrimleşerek regüle edilmiş ve ülkelerin itibarı ve ekonomik güçlerinin göstergesi olan ülkelerin merkez bankalarında dayanağı olan geleneksel paralar, diğer taraftan blokzincir teknolojisi ile oluşturulan ve merkezi bir otorite tarafından değil merkeziyetsiz bir yapıdaki blokzincir ağları tarafından belli kripto algoritmaları ile oluşan dijital kripto paralar bulunmaktadır.

Her alanda görülen dijitalleşme finans ve ekonomi alanlarında da kendini yoğun bir şekilde göstermektedir. Özellikle dijital para kavramının bir parçası olan kripto para kavramı da kendi içinde kavramsal olarak "coin" ve "token" olarak ikiye ayrılmaktadır (Gedik Yatırım, 2025). Kendisine ait bir blokzincir ağı olan ve bu blokzincir ağının ürettiği kripto paralara "coin", diğer taraftan mevcutta bulunan bir blokzincir ağı üzerinde bir amaca ve projeye hizmet edecek şekilde konumlanan, üretilen kripto varlıklara ise "token" denilmektedir (Gedik Yatırım, 2025).

2020 Eylül ayında, Avrupa Komisyonu tüketiciyi korumak, net kripto davranışı oluşturmak ve lisanslama gereksinimlerini belirlemek amacıyla "Kripto Varlık Piyasaları Yönetmeliği (The Regulation of Markets in Crypto Assets – MiCA)"ni önerdi (KPMG, 2023). Bu metin iki senelik yoğun çalışmalar sonucunda, 2022 Ekim ayında onaylandı ve 31 Mayıs 2023 tarihinde ise resmen yasalaştı. Böylece Avrupa Birliği kripto varlıklar ve kripto piyasalar üzerinde geniş ve kapsamlı bir hukuki düzenlemeye kavuşmuş oldu, 2024 yılı sonuna kadar da Avrupa Birliği'ne üye tüm ülkelerin MiCA yasasına tam uyumlu hale gelmesi hedeflenmiştir (KPMG, 2023).

Son yıllarda dijital teknolojiler hızla gelişmiştir. Bu gelişmeyle yeni iş ve ekonomi modelleri ortaya çıkmıştır. Bu dijital varlıkların yaratılması ve yönetilmesinde token teknolojisi çok önemli bir yerdedir. Token, varlıkların ve mülkiyetlerin dijital temsilcisidir. Token, bir coinin altyapısını kullanarak yaratılan ve bir varlığı temsil eden dijital araçlardır. Kripto para birimlerinden farklı olarak, tokenler, elinde bulunduran kişiye belirli haklar tanıyan ve herhangi bir varlığı temsil eden kripto varlıklar olarak da tanımlanabilir (Yüksel, 2020). Gelişen dünyada veri saklama çok kritik bir yerdedir. Sosyal medya gibi veri yoğun ortamların ortaya çıkması, geleneksel veritabanı sistemlerinin yetersiz kalmasına yol açarak, yeni ve daha esnek çözümlerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır (Ünal ve Uluyol, 2020). Blokchain teknolojisi bu süreci son derece şeffaf ve güvenilir hale getirmiştir. Tokenleştirme ise, fiziksel ve dijital varlıkların tokenlerle temsil edilmesi süreci anlamına gelmektedir. Gayrimenkul, sanat eseri, kitap gibi birçok varlık türü tokenleştirilebilir. Token ekonomisi de tokenlerin oluşturduğu yeni ekonomik modelleri ve bu modellerin iş hayatına etkilerini kapsar. Merkeziyetsiz bir model olması en önemli özelliğidir (CoinMarketCap, 2025).

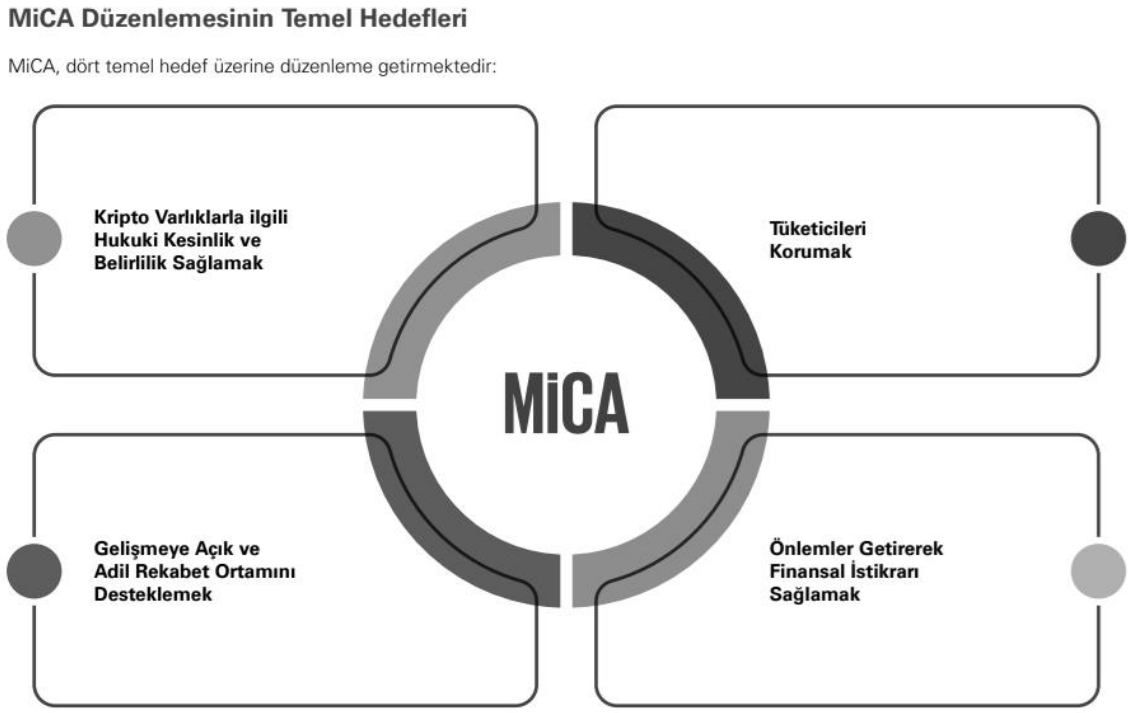
Günümüzde varlık sahipliği transferleri genellikle bankalar gibi geleneksel finansal yapılar ile güvenilir üçüncü taraflar tarafından güvence altındadır. Ancak bu geleneksel yapılar, yüksek maliyetler, gecikmeler ve tek hata noktaları gibi dezavantajları barındırır. "Teknolojik gelişmeler, varlık sahipliğini merkezi olmayan platformlarda dijital belirteçler aracılığıyla temsil ederek aracı ihtiyacını ortadan kaldırırken, güvenli ve dolandırıcılığa karşı dayanıklı sahiplik transferlerini kolaylaştırarak iş modellerini dönüştürme, şeffaflığı artırma ve bireylerin kişisel verilerinden para kazanmalarına olanak tanıyan bir 'token ekonomisi' yaratma potansiyeli sunmaktadır." (Benlian ve diğ., 2018). Bu açıdan token ekonomisi hem taraflar hem de kaynaklar açısından avantajlar sunmaktadır.

MiCA ile kripto varlıklar üç başlıkta kategorize edilmiştir (KPMG, 2023):

1. Asset Referenced Token ("ART"): Bir veya daha fazla varlığa referans vererek/destekleyerek veya dayanak varlık olarak kullanarak referans olarak gösterilen varlıkların değer kazanımını yatırımcılarla buluşturmayı amaçlayan bir token çeşididir.

Tipik olarak, gerçek fiziksel dünya varlıklarının (örneğin, altın, gümüş, tarımsal emtia, gayrimenkul gibi) karşılığı olan varlıkları blokzincir ağında temsil eden kripto varlıklardır.

2. E-Money Token (“EMT”): Devletlerin çıkardığı itibari paraların elektronik dijital versiyonları olarak tanımlanmıştır. Online ödeme yapma alanında kullanılan ve resmi bir devlet para birimi tarafından desteklenen temel bir özelliği bulunmaktadır.
3. Diğer Kripto Varlık: Dijital olarak aktarılabilen ve saklanabilen değer veya hakların dijital temsilidir. İlk iki kategoride temsil edilmeyen tüm kripto varlıkları temsil etmektedir.



Şekil 5.1: MiCA Düzenlemesinin Temel Hedefleri (KPMG, 2023)

MiCA düzenlemesinde, Kripto Varlık: “Dağıtılmış defter teknolojisi veya benzer bir teknoloji kullanılarak elektronik olarak aktarılabilen ve saklanabilen bir değerin veya hakkın dijital temsili anlamına gelir.” olarak net bir şekilde tanımlanmıştır (KPMG, 2023).

Ayrıca, MiCA düzenlemesi kapsamına henüz girmeyen blokzincir ağı içinde üretilen ve birtakım değer/leri temsil eden kripto varlıklar: Non-fungible Tokens (NFTs) ve Security Tokens olarak belirtilebilir (KPMG, 2023). NFT’ler, her biri benzersiz olan ve dijital varlıkların sahipliğini temsil eden token’lar olarak tanımlanırken, Security Tokens ise menkul kıymetlerin dijital temsilleridir ve belirli finansal araçları temsil eder. Bu tür varlıklar, MiCA düzenlemesi kapsamına henüz alınmamış olup, bu durum, ilgili düzenlemelerin gelişimi ve kripto varlık piyasalarının evrimi ile şekillenecektir (KPMG, 2023).

Tokenleştirme, bir varlığın benzersiz bir dijital temsilinin blokzincir ağında oluşturulmasıdır. Genel bir kripto varlık tanımından yola çıkarsak: "Dağıtılmış defter teknolojisi (DLT) veya benzer bir teknoloji kullanılarak elektronik olarak aktarılabilen ve saklanabilen bir değerin veya hakkın dijital temsili anlamına gelir." (Kargın, 2022). Bu tanımda, DLT (Dağıtılmış Defter Teknolojisi) kavramı karşımıza çıkmaktadır. DLT, blokzincir ağında yapılan ve tanımlanan tüm işlemlerin kayıt altına alındığı ve dağıtık bir şekilde merkeziyetsiz olarak blokzincir ağının birçok noktasında birebir kopyalarının tutulduğu dağıtık bir veritabanı teknolojisidir denilebilir. Tokenizasyon sayesinde, gerçek veya sanal hemen hemen her varlık blokzincir ağında merkezi bir üçüncü tarafa ihtiyaç duymadan bir kripto varlığa dönüştürebilmektedir ve token ile ilgili tüm işlemler (aktarımı, depolanması vb.) blokzincir ağında çoklu denetim mekanizması ile güvenli ve şeffaf bir şekilde yapılabilmektedir (Kargın, 2022). Tokenizasyonun ana amacı, somut veya soyut varlıkları daha erişilebilir ve temsil ettiği varlıklar ile ilgili işlemleri daha şeffaf ve verimli hale getirmektir. Tokenize edilmiş varlıklar, dünyadaki herhangi bir kişi tarafından erişilebilir ve mülkiyeti alınabilir ve herhangi birine aktarımı herhangi çok kısa sürede olabilmektedir.

Kripto varlıklar piyasası ve borsaları, geleneksel piyasaların aksine 7/24 açıktır ve bu durum global finansal piyasaların ve ekonomilerin büyümesinde ve demokratikleşmesinde katalizör görevi görecek önemli bir özelliktir. Blokzincir teknolojisi ile yeniden tasarlanmış, 7/24 açık ve tüm işlemlerin şeffaf olduğu merkeziyetsiz bir altyapı ile küresel piyasalara erişim sokağa inmiş olacaktır ve normal bir vatandaş dahi blokzincir teknolojisi ile tasarlanmış bir altyapıda tokenize edilmiş ürün, hizmet ve projelere kolaylıkla 7/24 erişebilecek ve yatırım yapabilecektir ve dolayısıyla küresel likidite de önemli ölçüde iyileşecektir (Aydem Enerji, 2025). Tokenizasyon ile, geleneksel olarak yürütülen manuel, uzun ve yorucu süreçlerin çoğu blokzincir ağlarında tasarlanarak oluşturulabilir ve otomatikleştirilebilir.

Diğer önemli bir konu ise, tokenize edilmiş varlıklar mikro seviyede kısımlara ayrılarak, yatırımcılara sunulabilmektedir, örneğin tarımsal emtia içinde bulunan buğday, arpa, mısır gibi ürünlerin 1 kg'ına karşılık oluşturulan 1 adet tarımsal emtia tokenleri ile birlikte dünyanın herhangi bir bölgesindeki bir insan istediği saat diliminde istediği miktarda token alarak yatırım yapabilmekte ve böylelikle çok fazla sayıda yatırımcının küresel olarak farklı coğrafyalardan katılımı ile yeni küresel pazar altyapıları oluşabilmektedir (AgriFintech Finansal Teknolojiler A.Ş., 2023).

5.1. TOKEN

Günümüzde tokenler benzersiz bir şeyi temsil etmek için kullanılan iyi bilinen bir kavramdır

(Lewis, 2015). En karmaşık zorluklardan biri onları tam olarak anlamaktır (Evans, 2014). Dijital olarak para birimi: değer aktarımı (Pilkington 2015; Evans 2014), hesap birimi (Conley 2017) ve servet saklama (Wenger 2016) işlevi görerek, doğrulama teşviki; dağıtım konsensüsünü ve veri tutarlılığını sağlayan (Pilkington 2015; Evans 2014) kriptografik değer birimidir.

Günümüzde, tokenler dijital ekonomilerde benzersiz varlıkları temsil etmek için yaygın olarak kullanılan bir kavramdır. Tokenler, özellikle blokzincir teknolojisinin temel bir parçası olarak, dijital ortamda varlıkların sahipliğini ve geçerliliğini temsil etmek amacıyla kullanılır. Bu dijital varlıklar, fiziksel varlıkları temsil etmek veya yalnızca dijital ortamda değer taşıyan unsurlar olarak işlev görmektedir (Nakamoto, 2008; Tapscott ve Tapscott, 2016). Tokenlerin evrimi, dijital para birimlerinin ve kripto varlıkların geniş bir kullanım alanına yayılmasına olanak sağlamıştır. Tokenlerin en önemli özelliği, onları sadece sayısal değerler olarak değil, aynı zamanda somut varlıkların dijital temsilleri olarak görmek ve bu özelliklerinin, ekonomik, finansal ve ticari açıdan nasıl dönüştürücü bir rol oynadığını anlamaktır (Catalini ve Gans, 2016; Mougayar, 2016).

Bu kapsamda, tokenler, blokzincir teknolojisinin sunduğu güvenlik, şeffaflık ve doğrulama avantajlarını dijital varlıklarla birleştirir. Tokenler, dijital para birimlerinin işlevini bir adım öteye taşıyarak yalnızca ödeme aracı olarak kullanılmanın ötesine geçer. Bugün, tokenler aracılığıyla gayrimenkul, sanat eserleri, dijital koleksiyonlar, yazılım lisansları ve hatta havaalanı biletleri gibi fiziksel ve dijital varlıklar temsil edilebilir (OECD, 2020; Wang ve diğ., 2019). Bu temsiller, varlıkların daha hızlı ve güvenli bir şekilde takas edilmesine, bölünmesine ve transfer edilmesine olanak sağlar. Böylece, dijital tokenler bir tür "dijital mülkiyet" gibi işlev görür (Treleaven ve diğ., 2017). Tokenler, sadece bir değeri temsil etmenin ötesinde, onları bir ekonomik araç olarak kullanmak, ticaretini yapmak ya da daha geniş bir ekonomik ekosistem içinde yer almak mümkündür (Zhang ve diğ., 2019; Lewis, 2015).

Ancak, tokenlerin işlevini tam olarak anlamak oldukça karmaşık bir süreçtir. Tokenlerin değerini ve işlevini net bir şekilde tanımlamak, dijital para birimlerinin işleyişini anlamaktan daha zordur. Bu karmaşıklığın temelinde, tokenlerin çeşitli kullanım biçimlerinin ve bu kullanım biçimlerinin dijital ortamda farklı şekillerde etkileşimde bulunmaları yatmaktadır (Catalini ve Gans, 2016; European Banking Authority, 2019). Bu noktada, tokenlerin yalnızca dijital para birimleriyle sınırlı kalmadığı, aynı zamanda finansal sistemler ve ticaretin ötesine geçerek farklı sektörlerde de kendine yer bulduğu görülmektedir. Tokenler, özellikle finansal piyasalarda ve dijital hizmetler sektöründe inovatif çözümler sunmakta, yeni iş modellerinin oluşturulmasına imkân sağlamaktadır (OECD, 2020; Schär, 2021). Örneğin, tokenleştirilmiş gayrimenkul projeleri, yatırımcıların küçük parçalara bölünmüş varlıklara yatırım yapmalarını sağlayarak gayrimenkul piyasasında daha geniş

bir erişim ve likidite olanağı sunar (Zohar, 2015). Benzer şekilde, sanat dünyasında NFT'ler (Non-Fungible Tokens) sanat eserlerini dijital ortamda temsil ederek, sanat eserlerinin takas edilebilirliğini ve mülkiyetini dijital ortamda güvenli bir şekilde sağlar (Regner ve diğ., 2019; Dowling, 2022; Evans, 2014).

Dijital para birimlerinin fonksiyonları, üç ana başlıkta toplanabilir: değer aktarımı, hesap birimi ve servet saklama. Değer aktarımı, dijital para birimlerinin sahiplik transferlerini güvenli bir şekilde gerçekleştirmesine olanak tanırken, hesap birimi fonksiyonu, paranın değerinin birim olarak kabul edilmesi ve ölçülmesi için gereklidir. Servet saklama ise, bir dijital varlığın uzun vadede değerinin korunmasını ve büyümesini sağlamaya yöneliktir. Tokenler, bu işlevlerin her birini yerine getirirken, aynı zamanda dijital ortamda, şeffaf ve güvenilir bir işlem kaydı oluşturulmasına da olanak sağlar. Kripto para birimleri, bu tür fonksiyonları bir arada sunarak dijital finansal ekosistemlerin temel yapı taşları haline gelmiştir (Pilkington, 2015; Evans, 2014).

Tokenlerin ekonomik işlevleri, yalnızca dijital varlıklar arasında değil, aynı zamanda geleneksel finansal enstrümanlarla olan ilişkilerinde de önemli değişikliklere yol açmaktadır. Özellikle, kripto paralarla yapılacak finansal işlemler merkeziyetsiz sistemler üzerinden gerçekleştirilir ve bu sistemlerin güvencesi, merkezi otoriteler yerine matematiksel algoritmalar ve blokzincir teknolojisinin kendisiyle sağlanır (Narayanan ve diğ., 2016). Bu durum, geleneksel finansal sistemlerin öngörülemez krizlerine karşı daha dayanıklı ve esnek bir alternatif sunar (Schär, 2021). Blokzincir tabanlı finansal sistemler, sadece ödeme ve transfer işlemlerini değil, aynı zamanda borç verme, sigorta ve yatırım gibi daha karmaşık finansal hizmetleri de dijital ortamda mümkün kılmaktadır (Chen ve diğ., 2020). Bu tür uygulamaların tokenlerle ilişkilendirilmesi, global finansal erişimi kolaylaştırmakta ve piyasa likiditesini artırmaktadır (Zetzsche ve diğ., 2020).

Öte yandan, tokenlerin blokzincir üzerindeki yerleri, dijital para birimlerinin doğrulama teşviklerini ve dağıtım konsensüsünü sağlamada kritik bir rol oynar. Blokzincir teknolojisi, merkeziyetsiz bir yapıya sahip olup, işlemlerin şeffaf ve güvenli bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlar. Bu sayede, dijital tokenler ve para birimleri arasında veri tutarlılığı ve güvenilirliği sağlanmış olur. Kriptografik değer birimleri olarak tokenler, sadece finansal değerlerin transferine değil, aynı zamanda dijital ortamda veri doğrulama ve konsensüs oluşturulmasına da yardımcı olur (Pilkington, 2015; Evans, 2014). Blokzincir üzerindeki bu güvenlik ve doğrulama işlevi, tokenlerin küresel piyasalarda, özellikle finansal piyasalarda etkin ve sürdürülebilir bir şekilde kullanılabilmesini mümkün kılmaktadır.

Sonuç olarak, tokenlerin dijital para birimleri olarak işlev görmesi, yalnızca ödemeleri

kolaylaştırmakla kalmaz, aynı zamanda dijital ekonominin her alanında, özelikle finansal hizmetler ve ticaretin dijitalleşmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu dijital varlıklar, yalnızca kullanıcılar arasında değer transferi sağlamakla kalmaz, aynı zamanda dijital varlıklar ve hizmetler arasında sınırları ortadan kaldıran bir ekonomik modelin ortaya çıkmasını teşvik eder. Gelecekte, tokenlerin daha fazla sektörde ve daha geniş bir ölçekte kullanılması, ekonomik yapıların daha demokratik ve merkeziyetsiz bir şekilde şekillenmesine olanak tanıyacaktır.

5.2. TOKENLERİN SINIFLANDIRILMASI

Tokenlerin çeşitli özelliklerine göre sınıflandırılması konusunda birçok yaklaşım olsa da özellikle kripto paralar ve tokenler arasındaki ayrım gibi örneklerde, bu sınıflandırmaların net ve evrensel bir çerçevede nasıl düzenleneceği konusunda henüz ortak bir görüş bulunmamaktadır (Oliveria ve diğ., 2018). Token sınıflandırılması karmaşık ve esnek bir yapıya sahiptir. Bu esnek yapı, farklı iş modellerine ve kullanıcı beklentilerine hitap etme olanağı sunar. Token ayrışması teknik katman, amaç bazlı, işlevsel, yasal statü ve fayda boyutları şeklinde beş ana parçada yapılabilir. Coin ve token ayrımı genellikle blokzincir teknolojisinin teknik temellerine dayanır; coinler kendi blokzincirlerinde bağımsız dijital para birimleri olarak çalışırken, tokenler akıllı sözleşmeler aracılığıyla bir blokzincirin üzerine kurulur (Catalini ve diğ., 2016; Chen, 2017; BlockchainHub, 2017). Amaç bazlı ise, blokzincir tokenlerinin dijital para birimi olarak kullanılabileceği fikri, Pilkington (2015) ve Evans (2014) tarafından ele alınmıştır. Popüler bir diğer token sınıflandırması, tokenın işlevsel yeteneğine dayanmaktadır. Bu alanda, kullanım tokenleri iş tokenleriyle karşılaştırılır ve hatta bazen her ikisinin bir karışımını temsil eden melez tokenlerle birlikte gelir (Tomaino, 2017).

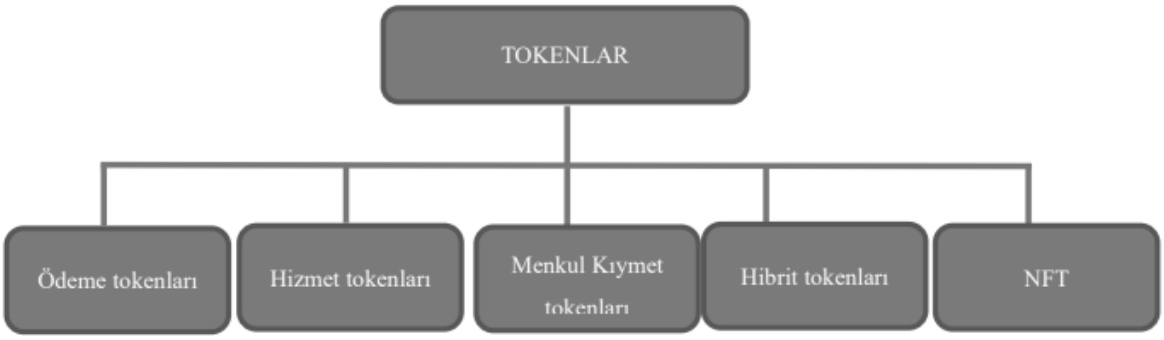
Diğer bir ayrışma biçimi yasal statü üzerindendir. Bazı tokenler menkul kıymet olarak tanımlanabilir ve yasal düzenlemelere tabi olabilir. Bu tür sınıflandırma, tokenlerin yasal olarak korunması ve sınıflandırılmasında fayda sağlar (Benoliel, 2017). Ayrıca token faydası, rol, özellikler ve amaç boyutlarına göre değişkenlik gösterebilir. Bu konuda Mougayar (2017) ve Euler (2017), token faydasını daha esnek bir değişken olarak ele almıştır ve farklı fayda kombinasyonlarının nasıl işleyebileceğini incelemiştir.

Tablo 5.1: Tokenlerin Sınıflandırılması (Oliveria ve diğ., 2018)

Sınıf	Kripto Para Birimi/Kripto Para	Utility Token	Tokenize Edilmiş Menkul Kıymet
Amaç	Fonksiyon	Varlığa Dayalı Token	Kullanım Tokeni
Parametreler	Rol	Hak	Değer
	Temsil	Dijital	Fiziksel
Yönetişim Parametreleri	Arz	Zaman Tabanlı Dağıtım	Önceden Madenlenmiş, Tek Seferlik Dağıtım
	Teşvik Sistemi	Platforma Katıl	Platformu Kullan
Fonksiyonel Parametreler	Harcanabilirlik	Harcanabilir	Harcanamaz
	Ticaret Edilebilirlik	Ticaret Edilebilir	Ticaret Edilemez
	Yakılabilirlik	Yakılabilir	Yakılamaz
	Süresi Olabilirlik	Süresi Olabilir	Süresi Olmaz
	Biribirinin Aynı Olma Özelliği	Biribirinin Aynı	Biribirinden Farklı
Teknik Parametreler	Katman	Blockchain (Yerel)	Protokol (Yerel Değil)
	Zincir	Yeni Zincir, Yeni Kod	Yeni Zincir, Çatallanmış Kod

Piyasada tokenler, yatırımcılara sundukları fayda ve menfaatlere göre farklı şekilde sınıflandırılmaktadır. Adhami ve Guegan (2020) çalışmalarında, finansal olmayan belirli hizmetlere erişim sağlayan tokenleri "utility token" olarak tanımlamışlardır. Bu tokenler, oy hakkı, erişim hakkı, kullanım hakkı gibi imkanlar sunmaktadır. Ayrıca, girişimlerde ortaklık veya alacaklılık hakkı sağlayan ve hisse senedi veya tahvil benzeri özelliklere sahip olan tokenler "security token" olarak sınıflandırılmıştır. Değer değişim aracı olarak kabul edilen ve para birimi işlevi gören tokenler ise "payment token" olarak adlandırılmıştır (Adhami ve Guegan, 2020).

- Değişim Araçları (Ödeme Tokenleri): Mal ve hizmet alışverişinde kullanılan, geleneksel paraya benzer işlev gören tokenlerdir. Nakit veya stok olarak muhasebeleştirilebilirler.
- Kullanım Hakkı Tokenleri (Hizmet Tokenleri): Bir ürün veya hizmetin kullanım hakkını veren tokenlerdır. Ön ödemeli hizmetler gibi düşünülebilir ve finansal araç veya stok olarak sınıflandırılabilirler.
- Varlık Temsili Tokenler (Varlığa Dayalı Tokenler ve Menkul Kıymet Tokenleri): Fiziksel veya dijital varlıkların (altın, hisse senedi gibi) dijital temsilleridir. Bu tokenler, altta yatan varlığın haklarını temsil eder ve yaratım amacı ve kullanım durumuna göre menkul kıymet olarak kabul edilirler.
- Hibrit Tokenler: Yukarıdaki kategorilerin birden fazla özelliğini bir arada bulunduran tokenlerdir. Hem ödeme hem yatırım hem de kullanım hakkı gibi farklı işlevlere sahip olabilirler.
- Teklik Tokenleri (NFT'ler): Dünyada benzersiz olan dijital varlıkları temsil ederler. Sanat eserleri, koleksiyonluk eşyalar gibi varlıkların sahipliğini kanıtlamak için kullanılırlar. Maddi olmayan duran varlık veya stok olarak muhasebeleştirilebilirler.



Şekil 5.2: Token Türleri (Adhami ve Guegan, 2020)

Baur (2019) ise çalışmasında tokenleri, varlık temelli tokenler, hizmet tokenleri ve menkul kıymet tokenleri olarak üç farklı grupta sınıflandırmıştır. Ancak, her gün yeni bir tokenin sisteme dahil olması ve farklı özelliklere sahip olması nedeniyle, literatürde tek bir sınıflama modelinin uygulanması oldukça zordur.

5.3. TOKENLEŞTİRME

Tokenleştirme, varlıkların dijital bir token aracılığıyla temsil edilmesi sürecine verilen isimdir (Pilkington, 2016). Tokenleştirme, özellikle finansal varlıklar, sanat eserleri, gayrimenkul gibi değerli nesneler için kullanılabilir. Blokzincir teknolojisi, bu süreci şeffaf ve güvenilir kılar. Bu süreç, özellikle sanat, finansal varlıklar ve gayrimenkul gibi çeşitli alanlarda, sahiplik ve değer transferini kolaylaştırmaktadır (Pilkington, 2016). Tokenleştirme, varlıkları dijital hale getirerek alım satım işlemlerini kolaylaştırır ve maliyetleri düşürür (Pilkington, 2016). Ayrıca, varlıklara erişimi demokratikleştirerek yatırım fırsatlarını genişletir (Pilkington, 2016).

Dünya genelinde dijital ekonomi yaygınlaşırken, bu dönüşümün merkezinde tokenleştirme önemli bir yer almaktadır. Tokenleştirme, blokzincir gibi dağıtık teknolojilerle bir varlığın dijital bir temsile dönüştürülmesi sürecidir ve böylece varlıkların sahipliği, transferi ve saklanması, merkezi bir aracıya gerek olmadan dijital ortamda gerçekleştirilebilir hale gelir (OECD, 2020). Blokzincir teknolojisi, tokenleştirmeye şeffaflık, güven ve iş birliği unsurlarını ekleyerek her türlü varlığı daha erişilebilir kılar (Zohar, 2015). Bu sayede, dijital tokenler aracılığıyla varlıklar saniyeler içinde dünyanın herhangi bir yerinde işlem görebilir; bu da likiditeyi artırır ve finansal süreçleri hızlandırır (Catalini ve Gans, 2016). Ayrıca, tokenleştirme sayesinde gayrimenkul veya sanat eserleri gibi değerli varlıklar küçük parçalara ayrılabilir ve çok sayıda yatırımcının katılımına açılabilir (Mougayar, 2016). Bu sistem, özellikle temettü ödemeleri, mülkiyet geçişleri ve hisse oylamaları gibi finansal işlemleri otomatik hale getirerek verimliliği artırır ve maliyetleri düşürür (Schär, 2021). Tokenleştirme alanındaki düzenlemeler halen gelişme aşamasında olsa da ülkeler mevcut yasal çerçeveleri içerisinde bu teknolojiye adapte olmaktadır (Kargın, 2022). Sonuç olarak; tokenleştirme hem girişimciler hem de yatırımcılar için dijital ekonominin sunduğu olanaklardan daha fazla yararlanmalarını sağlayan yenilikçi bir dönüşüm aracıdır.

5.4. TOKEN EKONOMİSİ VE UYGULAMA ALANLARI

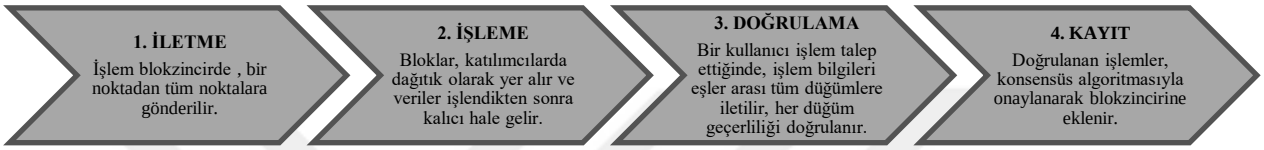
Token ekonomisi, İngilizce kısaltması olan “Tokenomics”, “token” ve “economics” kelimelerinin birleşiminden oluşur (Bitlo, 2022). Tokenomics, belirli bir kripto varlığın toplam arzı, token dağılımı, kullanım alanları ve arz-talep mekanizmaları gibi temel ekonomik yapı taşlarını içerir (Bitlo, 2022; Chohan, 2018). Bu yapı, bir tokenin işlevselliğini, değerini ve dolaşımını doğrudan etkileyen temel parametreleri kapsar. Türkçede “token ekonomisi” olarak karşılık bulan bu kavram, ilgili kripto varlığın “para politikası” olarak da değerlendirilebilir (Bitlo, 2022). Tokenomics kapsamında; tokenin kullanım alanları, maksimum arz miktarı, ilk arz (ICO/IEO) döneminde belirlenen token miktarı, bu tokenlerin dağıtım mekanizmaları, staking ve yakım (burning) gibi arz azaltıcı stratejiler yer almaktadır (Binance Academy, 2020; Chen, 2021). İyi tasarlanmış bir token ekonomisi, bir kripto varlık projesinin sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Tokenlerin nasıl dağıtılacağı ve bu tokenlere yönelik talebi artıran teşvik sistemleri gibi unsurlar, tokenomics'in temel yapı taşlarıdır (Bitlo, 2022; Werbach, 2018). Kripto varlık projelerinde arz-talep dengesi, token fiyatı üzerinde doğrudan etkilidir. Özellikle staking, kilitlenme süreleri, yakım mekanizmaları ve ödül sistemleri gibi token ekonomisinde yer alan unsurlar, tokene olan talebi ve yatırımcı ilgisini şekillendirmektedir (Bitlo, 2022; Schär, 2021).

Token ekonomisi temelde aşağıdaki maddeleri içermektedir (Binance Academy, 2022):

- Kullanım alanları, getiri ve faydaları,
- Maksimum arz,
- Token dağılımı ve kilit açılımı,
- Toplam arz,
- Teşvik mekanizmaları (Madencilik ve Staking gibi),
- Token yakım mekanizması.

Token ekonomisinde, merkeziyetsiz dijital süreçleri yöneten teknik protokoller, varlık sahipliğinin doğrulanabilir ve güvenli bir biçimde yönetilmesini sağlamaktadır. Bu protokoller sayesinde, merkeziyetsiz dijital platformların kullanımı artmakta ve tokenlerin kullanım alanları daha esnek hale gelmektedir (Tapscott ve Tapscott, 2017). Geleneksel güvenilir üçüncü taraflara (TTP) olan bağımlılığı azaltan bu yapı, aynı zamanda taraflar arasında daha hızlı ve düşük maliyetli iş birliklerini mümkün kılmakta ve yeni dijital ekonomik modellerin gelişimine zemin hazırlamaktadır (Catalini ve Gans, 2016). Fiziksel ya da dijital varlıkların mülkiyetinin güvenli bir biçimde el değiştirebilmesi, bu yeni iş modellerinin temel taşlarından biridir. Bu güvenliği sağlayan temel teknoloji ise, verilerin merkezi olmayan bir yapıda, çok sayıda düğüm üzerinde eşzamanlı ve değiştirilemez biçimde saklanmasını mümkün kılan Dağıtılmış Defter Teknolojisi’dir (Zhao ve diğ., 2016).

Bu süreç kısaca şöyle gerçekleşir: İşlem blokzincirde, bir noktadan tüm noktalara gönderilir ve doğrulanması gerekmektedir. Bu sayede veriler değişemez ya da silinemez. Blokzincirdeki bloklar, katılımcılarda dağıtık olarak yer alır ve veriler işlendikten sonra kalıcı hale gelir, manipülasyonu neredeyse imkansızdır; bir kullanıcı işlem talep ettiğinde, işlem bilgileri eşler arası tüm düğümlere iletilir, düğümler geçerliliği doğruladıktan sonra konsensüs algoritmasıyla onaylanarak blok zincirine eklenir (Wamba, Kamdjoug, Bawack ve Keogh, 2020).



Şekil 5.3: Blokzincir İşlem Süreci (Wamba, Kamdjoug, Bawack ve Keogh, 2020)

Finans ve Bankacılık: Token ekonomisi, bankacılık ve finans sektöründe giderek daha fazla kullanılmaktadır. Schär (2021) çalışmasında, tokenlerin ve blokzincir teknolojisinin finans sektöründeki uygulamalarını, özellikle merkeziyetsiz finans (DeFi) ve dijital varlık yönetimi alanlarında nasıl kullanıldığını incelemiştir. Bu teknolojilerin, geleneksel bankacılık sistemlerine alternatif olarak işlem hızını artırdığı ve maliyetleri düşürdüğü belirtilmiştir (Schär, 2021). Merkeziyetsiz finans (DeFi – Decentralized Finance) alanında, tokenler, dijital varlıkların takasında, kredi sağlama süreçlerinde, ödeme sistemlerinde ve borçlanma işlemlerinde önemli bir rol oynamaktadır.

Tedarik Zinciri: Son yıllarda, tedarik zinciri ve lojistik süreçlerinde dijitalleşme büyük bir hız kazanmıştır. Özellikle blokzincir teknolojisi, bu alanlarda önemli değişiklikler getirmiştir. Blokzincir teknolojisi, tedarik zincirindeki her adımı dijital olarak izlemeye imkân tanır, bu da süreçlerin şeffaflığını ve güvenliğini artırır (Kshetri, 2018). Örneğin, blokzincir teknolojisi ile, her bir ürünün kaynağından dağıtım noktasına kadar olan yolculuğu şeffaf bir şekilde izlenebilir, bu da sahteciliği ve kayıpları önleyebilir. Tokenler ise bu izlenebirliğin sağlanması süreçlerinde katılımcılara ödül ve teşvik olarak verilebilmektedir.

Sanat: NFT'lerin (Non-Fungible Tokens) kullanımı, dijital varlıkların sahipliğini ve orijinalliğini kanıtlamak için devrim niteliğindedir. "NFT'ler, dijital sanat eserlerinin fiziksel sanat eserleriyle eşdeğer kabul edilebileceği bir pazar alanı yaratmıştır; dijital sanatın benzersiz ve sınırlı sayıda olması, onları koleksiyoncular ve yatırımcılar için değerli hale getirmektedir." (Yermack, 2017).

Sonuç olarak, token teknolojisi dijital dünyada devrim niteliğinde değişimlere öncülük etmiş ve gelecekte iş dünyasında daha da büyük bir rol üstlenmesi beklenmektedir. Tokenler, varlıkların dijital ortama aktarılmasını mümkün kılarak bu varlıkların şeffaf, güvenli ve izlenebilir bir şekilde transfer edilmesini sağlamaktadır. Tokenizasyon, fiziksel varlıkların dijital temsillerle işlem görmesini sağlayarak, yatırımcılara daha geniş erişim, bölünebilirlik ve likidite gibi yeni fırsatlar sunmaktadır (OECD, 2020; Chohan, 2018). Token ekonomisi, geleneksel finansal sınırlamaların ötesine geçerek daha hızlı, daha düşük maliyetli ve daha kapsayıcı bir ekonomik model ortaya koymaktadır. Bu yenilikçi yapı, finansal sistemlerdeki aracılara olan bağımlılığı azaltarak daha verimli ve demokratik bir yapı oluşturmayı mümkün kılmaktadır (Narayanan ve diğ., 2016; Zetzsche ve diğ., 2020).

6. BLOKZİNCİR TEKNOLOJİSİ İLE TARIM ÜRÜNLERİ İÇİN BİR TOKENİZASYON TASARIMI VE UYGULAMASI: TÜRKİYE ÖRNEĞİ VE BULGULAR

Tez uygulama kısmının yönetimi, sistematik, disiplinli ve çevik bir yazılım geliştirme yaklaşımı ile planlanmıştır. Bu sürecin temelinde, kullanıcı odaklılık, adaptif planlama ve iteratif geliştirme anlayışı yer almaktadır. Araştırmanın temel amacı, Türkiye tarım sektöründe blokzincir tabanlı tokenizasyon uygulamalarıyla şeffaflık, güven, erişilebilirlik ve verimlilik sağlamaktır. Bu hedef doğrultusunda çözülmeye çalışılan temel problemler; tarım sektöründeki finansal işlemlerin izlenebilirliğinin artırılması, ürünlerin tedarik zinciri boyunca şeffaf takibi, dijital varlıkların güvenli ve merkeziyetsiz biçimde yönetimi, yatırımcı erişiminin demokratikleştirilmesi ve küçük ölçekli yatırımcının da tarım emtiasına ulaşımının sağlanmasıdır (Saberi ve diğ., 2019).

Bu bağlamda, tez çalışmasının uygulama bölümü, yazılım mühendisliğinde yaygın kullanılan Proje yönetim süreci olan geleneksel Waterfall (Şelale) Yazılım Geliştirme Yaşam Döngüsü (SDLC – Software Development Life Cycle) aşamaları çerçevesinde planlanmış ve yürütülmüştür. Süreç planlama, analiz, tasarım, uygulama, test ve sürekli geliştirme aşamalarını kapsamıştır. Bu yapı, AGROS sisteminde tarım ürünlerinin tokenleştirilmesini teknik, işlevsel ve güvenlik boyutlarıyla ele alarak sistemin ölçeklenebilir ve sürdürülebilir olmasını sağlamıştır (Sommerville, 2015).

Waterfall (şelale) modeli, yazılım mühendisliği alanında kullanılan en eski ve geleneksel yöntemlerden biridir. Bu modelDE yazılım geliştirme süreci; gereksinim analizi, tasarım, uygulama (kodlama), test, dağıtım ve bakım gibi birbirini izleyen sabit aşamalardan oluşur (Royce, 1970). Her bir aşama tamamlanmadan bir sonraki aşamaya geçilmez. Bu yönüyle model, yapısal ve plan odaklı bir yaklaşımı benimser. Waterfall modeli, ilk olarak Winston W. Royce tarafından 1970 yılında tanıtılmıştır. Royce, modelin özellikle büyük ve karmaşık sistemlerin geliştirilmesinde avantaj sağladığını, ancak modelin başarılı olabilmesi için gereksinimlerin baştan net ve sabit olması gerektiğini vurgulamıştır (Royce, 1970). Waterfall yaklaşımı, sistemin tüm detaylarının proje başlangıcında belirlendiği ve belgelerle kayda geçirildiği projelerde tercih edilir (Sommerville, 2016). Dokümantasyon ağırlıklı yapısı sayesinde denetim, izlenebilirlik ve proje kontrolü kolaylaşır. Ancak bu durum aynı zamanda esnekliği azaltmakta ve değişen gereksinimlere karşı sistemin uyum sağlamasını zorlaştırmaktadır (Pressman ve Maxim, 2020). Günümüzde çevik (Agile) yöntemlerin yükselişiyle birlikte, Waterfall modeli daha çok regülasyonların sıkı olduğu sektörlerde (örneğin finans, sağlık, savunma, havacılık) kullanılmaktadır. Bu alanlarda belgelenme zorunluluğu, net kapsam tanımı ve test edilmeden dağıtıma geçilmemesi gibi gereklilikler, Waterfall yaklaşımını halen geçerli kılmaktadır (Balaji ve

Murugaiyan, 2012).

Tez çalışmasının uygulama süreci, Waterfall (Şelale) Yazılım Geliştirme Yaşam Döngüsü aşamaları (**Analiz – Tasarım – Uygulama Geliştirme – Test – İyileştirme – Canlıya Alma**) bağlamında aynı zamanda aşağıdaki ilgili bölümlerde algoritmik bir akış şeklinde aktarılmaktadır. Bu akış içinde, tarım ürünlerinin güvenli bir şekilde depolama aşaması, kalite kontrolünün yapılması, dijital kayıtların oluşturulması, token üretimi (mint), tokenin transferi, piyasada işlem görmesi ve tokenin gerektiğinde itfa edilerek fiziksel ürünle ilişkisinin kesilmesi adımları da yer almaktadır. Bu akış, AGROS sisteminin teknik mimarisini ve iş süreçlerini bütünsel biçimde ortaya koymakta, çalışmanın anlaşılabilirliğini artırmaktadır.

6.1. TARIM ÜRÜNLERİ İÇİN BİR TOKENİZASYON ÖRNEĞİ SİSTEM ANALİZİ

Günümüzde tarımsal emtia üretimi, tüketimi ve ticaretinin fonlanması, içine girdiğimiz global kriz dünyasında her zamankinden daha fazla önem arz etmektedir. Yaklaşan potansiyel gıda krizi tarımsal emtia fiyatlarını arttırmakta ve yatırım fırsatını da beraberinde getirmektedir. Meta kelimesi Türkçe'de "ticari mal" anlamına gelir ve çoğulu "emtia"dır. Bu çalışmada konu edilen token sistemi ve emtiaya dayalı tokenler (commodity token), bundan sonra blokzincir uygulamaları arasında daha sık göreceğimiz dev bir kategori olmaya adaydır. Bu çalışmada hedef, buğdaydan başlayarak, tarım kökenli emtiaya dayalı emtia tokenler ile yeni bir finansal varlık sınıfı oluşturmaktır.

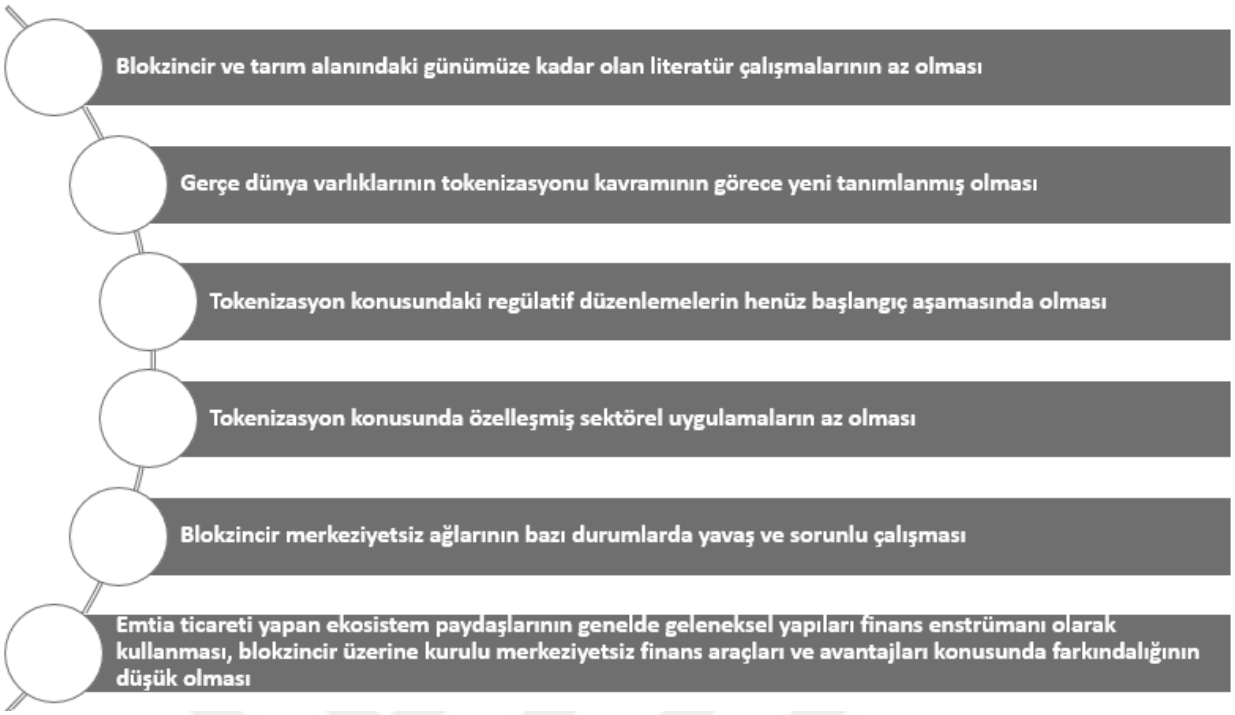
Şekil 6.1, blokzincir konusunun literatürdeki eksikliğini ve tez çalışmasına konu edilme gerekçelerini anlatan bir akışı ifade etmektedir. İlk aşamalarda dijital dönüşüm ve yıkıcı teknolojilere yönelik kapsamlı bir literatür taraması yapılmış; ardından yapay zeka, bulut bilişim, büyük veri ve blokzincir konuları önceliklendirilmiştir (Tapscott ve Tapscott, 2018). Blokzincir, demokratik, katılımcı ve merkezî otoritenin gücünü azaltan özellikleri sebebiyle seçilmiş ve özellikle sektör olarak tedarik zinciri yönetimi uygulamalarındaki kullanım alanı belirginleşmiştir (Saberi ve diğ., 2019). Sonrasında, blokzincirin kripto varlık ekosistemindeki temel mimari rolü anlaşılmıştır. Şeklin ilerleyen kısımlarında, blokzincirde dijitalleşmiş gerçek dünya varlıklarının literatürde yeterince incelenmediği vurgulanmıştır (Mougayar, 2016). Tezin özgünlüğü, tarım sektöründe blokzincir teknolojisinin yeterince incelenmemiş ve ele alınmamış olmasıyla ortaya çıkmıştır. Tarım sektörüne ilişkin kişisel ve aileden gelen alan bilgisi ile blokzincir teknolojisinin kesişim noktası vurgulanarak konu seçimi yapılmıştır. Literatür taraması sürecinde küresel ölçekte tarım ve blokzincir ilişkisinin yeterince çalışılmadığı belirlenmiş, ardından 300'den fazla kaynak incelenerek, "Türkiye Tarım Tokenizasyon Örneği" uygulamasıyla Türkiye ve küresel çapta bir

ilki temsil eden uygulamalı çalışma konusu belirlenmiştir (Lin ve diğ., 2018).



Şekil 6.1: Gerçek Dünya Varlıklarının Tokenizasyonu: Blokzincir Mimarisine Dayalı Türkiye Tarım Tokenizasyon Örneği Uygulaması Süreci

Şekil 6.2, blokzincir ve tokenizasyon alanındaki mevcut durum ve karşılaşılan zorlukları ifade etmektedir. İlk olarak, blokzincirin tarım alanında literatürde yeterli ölçüde ele alınmamış olması vurgulanmaktadır (Kamble, Gunasekaran ve Sharma, 2020). Buna ek olarak, gerçek dünya varlıklarının tokenizasyon kavramının henüz yeni tanımlanmakta olduğu belirtilmektedir. Tokenizasyon konusundaki düzenleyici çerçevenin başlangıç aşamasında olması ve sektörel bazda özelleşmiş uygulamaların azlığı, bu alanda mevcut engellerden biri olarak sunulmaktadır (OECD, 2020). Ayrıca, blokzincir merkezsiz ağlarının bazen yavaş ve problemli işlemesi belirtilirken, emtia ticareti yapan aktörlerin çoğunlukla geleneksel finans araçlarını kullanmaları nedeniyle, blokzincire dayalı merkeziyetsiz finans araçlarının sağladığı avantajlar konusunda yeterince farkındalığa sahip olmadıkları vurgulanmaktadır.



Şekil 6.2: Blokzincir Mimarisine Dayalı
Türkiye Tarım Tokenizasyon Örneği Uygulaması Kısıtları ve Zorlukları

Blokzincir tokenlerinin birçok kullanım alanı vardır. Bunlar bir projenin kullanım durumundan faydalar sağlayan (utility token), bir proje hakkında sahiplik veya oy hakkı veren (security token ve governance token) ve genel kullanımıyla dijital bir içeriğin sahipliğini iddia eden özel tokenler (NFT) gibi olabilir. Varlığa Dayalı Token (asset-backed token) ise fiziksel dünyada temsili karşılığı olan tokenlerdir (Chohan, 2022). Fiziki varlığın birtakım özellik bilgileriyle blokzincire taşınması karşılığında, yani blokzincir dağıtık veri tabanında kaydının oluşturulmasıyla üretilmişlerdir (AgriFintech, 2023).

Dolayısıyla, tokenize edilmiş bu fiziki varlığın gerçek dünyadaki fiziki karşılığının kullanımı, satımı, tüketimi gibi işlemler tokenlerin ticaret dolaşım arzında olduğu sürece bir gözetmen (custodian) tarafından dondurulur ve engellenir. Tokenizasyon sürecinde ancak varlığa karşılık üretilen tokenler itfa (burn) edildikten sonra fiziki varlık veya emtia fiziki kullanıma tekrar açılabilir (Catalini ve Gans, 2020). Yani blokzincir yapısı altında tokenize edilen (mint edilen) Varlığa Dayalı Tokenler (asset-backed tokenler), itfa (burn) edildikten sonra karşılık gelen fiziki emtia kullanıma açılabilir, tüketilebilir. Aksi takdirde Varlığa Dayalı Token (asset-backed token) kavramı ihlal edilmiş olur (AgriFintech, 2023).

Bu tokenizasyon sayesinde bu varlıklar çeşitli avantajlara (yüksek likidite / demokratizasyon / parçalı alım) sahip olabilir. Fiziki dünyada blokzincir dijital kayıtları "değiştirilemez" olduğu için, varlığa dayalı tokenlerin kamuya açık (public) blokzincirlerde tutulması şeffaflık ve güven

açısından tercih edilir. Böylelikle gözetimde tutulan fiziki varlıkların, blokzincire giriş ve çıkışları daha kolay denetlenebilir ve şeffaf bir şekilde herkes tarafından görüntülenebilir.

Varlığa dayalı tokenler, stabil kripto paralar (USDT-Tether, USDC vb.), gayrimenkul tokenleri, fiziki sanat eserine dayalı tokenler ve emtia karşılığında üretilen emtiaya dayalı tokenler (commodity token) olabilir. Bu çalışma kapsamında ortaya konulan Tokenizasyon Örneğinin adı AGROS (Agriculture Operating System) 'dur ve bu sistem tarafından üretilen Tarım Ürünleri Tokenleri, ana tarım ürünleri olan Buğday, Arpa ve Mısır ürünlerine veya emtiasına ait Varlığa Dayalı Token (asset-backed token)'lerdir ve "commodity token" sınıfına dahildirler.

Tarım Ürünleri için Tokenizasyon Örneği olan AGROS (Agriculture Operating System) uygulaması ile amaç; tarımsal emtiaya dayalı varlıkları blokzincire taşıyarak "emtia token" veya "commodity token" oluşturmak, bu sayede yeni bir global pazar oluşturmaktır. Böylece blokzincir teknolojisinin sağladığı şeffaf ve merkeziyetsiz değer transferi imkanını tarım endüstrisine uyarlamaktır. Zira tarımsal emtia, insanların en önemli gıda tüketim maddesi olduğu gibi büyük stratejik önemi olan, ülkeler arasında ticaretinin yapılması da engellenmesi de savaş nedeni sayılacak hale gelmiş olan hayati bir ürün grubudur.

Birinci aşamada tarımsal varlıkların tokenize edilmesi, yani fiziksel emtianın kaydının dijital ortama aktarılması ve blokzincir üzerine yazılması amaçlanmıştır. Bunu yaparken, halihazırda tüm dünyada yaygın kullanılan, Anlaşmalı, Güvenilir Depoculuk Sistemleri ile iş ortaklığı yapılarak tokenize edilecek tarımsal emtianın öncelikle depolarda fiziksel olarak depolanması sağlanacaktır. Güvenilir depolarda saklanan ve merkezi veri tabanlarında kaydı bulunan emtia, merkeziyetsiz blokzincir ortamına getirilerek tokenize edilecektir.

Güvenilir depolarda muhafazası yapılan ve Depo Rezerv Belgesi ile fiziksel kaydı ispat edilen tarımsal emtia, AGROS uygulaması kullanılarak blokzincir üzerinde çoklu imzalarla, "emtia token" haline getirilmektedir. Dolayısıyla bu tokenlerin, DeFi (Decentralized Finance) adı verilen merkeziyetsiz sistemler üzerinde çalışan ve DEX (Decentralized Exchange) olarak anılan merkeziyetsiz borsalarda veya klasik merkezi borsalarda, yani CEX'lerde (Centralized Exchange) değiş-tokuşu, ticareti mümkün olacaktır. Gerçek fiziksel varlıklara dayalı "emtia token" kullanımı, yalnızca tarım ticareti dünyasında yeni ve daha iyi fırsatlar yaratmaya katkıda bulunmayacak, aynı zamanda genel olarak blokzincir ekosistemini ve merkezi olmayan finansı (DeFi) da büyütme potansiyeli bulunmaktadır.

6.1.1. Varlığa Dayalı Tokenler

Varlığa dayalı tokenler, blokzincir ekosisteminde yer alan binlerce mevcut ürün ve projede sunulan dijital değer kavramından ayrışmaktadır. Mevcut token türleri genellikle yalnızca blokzincir ağı üzerinde tanımlı bir değeri ya da belirli bir kullanım hakkını temsil eder. Buna karşılık, varlığa dayalı tokenler, fiziksel dünyada uzun süredir işlem gören ve ekonomik değer taşıyan somut varlıklara dayanır. Bu nedenle, Bitcoin veya Ether gibi sadece dijital ortamda varlık gösteren ve fiyatları yüksek dalgalanmalara açık olan tokenlere kıyasla, daha istikrarlı bir değer yapısına sahiptirler.

Blokzincir tabanlı varlıkların, özellikle yüksek fiyat dalgalanmalarına (volatiliteye) sahip coin ve tokenlerin ticaretinde fiyat dengesini sağlamak amacıyla çeşitli teminatlandırma modelleriyle oluşturulan farklı türlerde stabil kripto paralar geliştirilmiştir. Bu stabil varlıkların bir kısmı ABD doları, Euro gibi itibari para birimlerine sabitlenirken; bazıları altın, gümüş gibi değerli metaller ya da farklı emtialara endekslenmiştir. Ancak, küresel ölçekte yaşanan ekonomik krizler ve söz konusu varlıkların büyük finansal kuruluşlar ve ulusal para otoriteleri tarafından dijitalleştirilmesi nedeniyle, özellikle değerli metallere dayalı stabil kripto paraların piyasadaki güvenilirliği ve teminat karşılıkları yatırımcılar tarafından sorgulanmaya başlanmıştır.

Bu çalışmada ele alınan emtiaya dayalı tokenler, doğrudan fiziksel varlıklarla ya da bu varlıkların teminat gösterilmesiyle desteklenen dijital varlıklar olarak tasarlanmıştır. Bu yönüyle, söz konusu tokenler, yalnızca itibari para birimleriyle kıyaslandığında değil, aynı zamanda güvenilirlik ve değer istikrarı açısından da daha güçlü bir ekonomik önerme sunmaktadır.

Literatürde, varlığa dayalı token kavramı genellikle “asset-backed token” terimiyle ifade edilmektedir. Türkçede “stabil kripto para” şeklinde anılan ve dolar, euro veya Türk lirası gibi ulusal para birimlerine endeksli stablecoin’ler de teknik olarak varlığa dayalı token kategorisine girebilir. Ancak bu tür stabil kripto paraların arkasında fiziki bir varlık bulunmamakta; yalnızca itibari varlıklarla teminatlandırıldıkları için, zaman içinde yaşanan ekonomik dalgalanmalardan ve dayandıkları kâğıt paraların değer kaybından doğrudan etkilenmektedirler.

Stablecoin'ler, yani stabil kripto paralar, kripto para borsalarında işlem kolaylığı ve fiyat istikrarı sağlama açısından önemli bir rol üstlenmektedir. Benzer bir etki, emtiaya dayalı tokenler aracılığıyla da oluşturulabilir. Bu bağlamda, AGROS uygulaması ile Türkiye'den başlayarak Avrupa ve Asya'yı kapsayan geniş bir coğrafyada ilk kez üretilecek emtiaya dayalı tokenlerin, stabil kripto paraların yanında alternatif bir dijital varlık sınıfı olarak konumlanması

beklenmektedir. Nasıl ki USDT (Tether) ve USDC gibi stabil kripto paralar, Bitcoin veya Ether gibi varlıklarla işlem çiftlerinde (örneğin BTC/USDT, ETH/USDC) kullanılıyorsa; aynı şekilde, Buğday Token, Arpa Token veya Mısır Token gibi emtiaya dayalı dijital varlıkların da kripto borsalarında işlem çiftlerinde kullanılabilme potansiyeli bulunmaktadır. Öte yandan, stabil kripto paralar, yatırımcılar tarafından yüksek volatiliteye sahip kripto piyasalarında bir tür değer koruma aracı olarak tercih edilirken; fiziksel emtia ile desteklenen bu yeni tür tokenlerin de, fiyat istikrarı açısından güvenli liman olarak değerlendirilmesi mümkündür.

Fiat para birimlerine dayalı stabil kripto paralar, kripto varlıklar arasında anlaşılması en kolay olanlardan biridir. Ancak teknik açıdan değerlendirildiğinde, bu varlıklar birer "coin" değil, çoğunlukla Ethereum gibi Katman-1 blokzincirleri üzerinde oluşturulan ve ERC-20 standardına uygun olarak geliştirilen tokenlerdir. Bu tür stabil kripto paralar, ilgili itibari para birimiyle (örneğin Amerikan doları, Euro vb.) birebir oranda değer eşlemesi sağlar ve teorik olarak da bu para birimleri tarafından 1:1 oranında rezervle desteklendikleri kabul edilir. Buna karşın, buğday, mısır, arpa ve fındık gibi tarımsal ürünlere dayalı emtia tokenleri ise doğrudan fiziksel varlıklar tarafından desteklenerek dijital temsillerini oluşturur ve farklı bir değer temellendirme modeline sahiptir.

Devletler tarafından ihraç edilen ve fiziksel dolaşımda bulunan geleneksel para birimlerine (örneğin Amerikan doları, Euro, Türk lirası) endeksli stabil kripto paralar (USDT, USDC gibi), dijital varlıklar dünyasında en kolay kavranabilen ürünler arasında yer almaktadır. Bu tür tokenlerin temel amacı, dijital varlık piyasalarında yaşanan yüksek fiyat dalgalanmalarını azaltmak ve geleneksel para birimlerinin blokzincir teknolojisi üzerindeki dijital karşılıklarını oluşturabilmektir. Teknik açıdan değerlendirildiğinde, bu dijital varlıklar genellikle bağımsız bir blokzincire sahip olmadıklarından dolayı “coin” değil, token olarak sınıflandırılırlar. Yaygın olarak, Ethereum gibi Katman-1 blokzincir altyapıları üzerinde, Ethereum’un standart token protokolü olan ERC-20 aracılığıyla oluşturulurlar. Bu tokenler, arkasında birebir oranda bir itibari para rezervine dayalı değer taşıyacak şekilde tasarlanmıştır; örneğin 1 USDT token’in teorik karşılığı 1 Amerikan dolarıdır. Bu nedenle, söz konusu stabil kripto paraların itibari para rezervleriyle 1:1 oranında desteklenmesi öngörülür. Ancak bu rezervlerin varlığı ve yönetimi her zaman şeffaf bir şekilde denetlenemediğinden, rezervlerin güvenilirliği ve açıklığı zaman zaman kamuoyunda tartışmalara neden olmaktadır. Buna karşılık, buğday, mısır, arpa veya fındık gibi tarımsal ürünlere dayalı emtia tokenleri farklı bir yaklaşım sunar. Bu tür tokenler, somut fiziksel varlıkların – örneğin bir ton buğday – dijital temsili olarak işlev görür. Ancak bu yapının sağlıklı işlemesi için yalnızca teknik değil, aynı zamanda lojistik, depolama, denetim (custodian hizmetleri) ve hukuki çerçeve gibi çok katmanlı bir altyapı gereklidir. Ayrıca, bu tokenlerin fiziki

varlıklarla gerektiğinde birebir değiştirilebilir olması, projelerin güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, emtiaya dayalı tokenizasyon sistemleri, itibari paraya dayalı stabil token modellerine kıyasla daha karmaşık ve çok disiplinli bir yapı sergilemektedir.

Tablo 6.1: Stabil Kripto Paralar ile Emtiaya Dayalı Tokenlerin Karşılaştırması

Özellik	**Fiat Paraya Dayalı Stabil Kripto Paralar (Stablecoin)**	**Emtiaya Dayalı Tokenler**
Dayanak Varlık	İtibari para birimi (USD, EUR, vb.)	Fiziki emtia (buğday, mısır, fındık, vb.)
Blokzincir Yapısı	Genellikle Katman-1 zincir (Ethereum) üzerinde ERC-20 token	Çeşitli blokzincirlerde tokenizasyon
Teknik Tür	Token (genellikle coin değildir)	Token (asset-backed token olarak sınıflandırılır)
Değer Sabitleme Mekanizması	1:1 oranında itibari para rezervine dayalı	Fiziki varlıkla birebir temsil ilişkisi
Likidite ve Kullanım Kolaylığı	Yüksek – hızlı ticaret, DeFi entegrasyonu	Orta - fiziki varlığa bağlı, sınırlı kullanım
Şeffaflık ve Denetim	Rezerv denetimi gereklidir, tartışmalı olabilir	Fiziki varlık gözetimi ve saklama denetimi gereklidir
Fiziki Varlıkla İlişki	Yoktur	Varlığın itfa (burn) edilmesiyle erişim sağlanır
Regülasyon ve Hukuki Zemin	Finansal regülasyonlara tabidir	Hem finansal hem emtia regülasyonlarına tabidir
Kullanım Alanları	DeFi, ticaret, değer transferi	Tarım, emtia ticareti, lojistik

Emtiaya dayalı tokenler, çoğunlukla Ethereum gibi Katman-1 blokzincirleri üzerinde, ERC-20 standardına uygun olarak ihraç edilen, takas edilebilir (fungible) nitelikte dijital varlıklardır. Bu tokenler, belirli bir fiziksel emtiayı temsil edecek şekilde tasarlanmakta ve karşılık geldikleri somut tarımsal ürünlerin resmi kayıtlarıyla ilişkilendirilmektedir. Bu kayıtlar arasında, ürünlerin fiziksel olarak depolandığını gösteren belgeler – örneğin Depo Rezerv Belgeleri – yer almakta olup, tokenlerin dijital dünyadaki değerinin, gerçek dünyada varlığı bulunan tarımsal ürünler ile desteklendiğini ifade etmektedir. Bu yapı, tokenlerin sadece dijital bir varlık değil, aynı zamanda fiziki dayanağı olan bir finansal enstrüman olarak değerlendirilmesini sağlamaktadır.

Stabil kripto paralar, teorik olarak volatiliteyi minimize eden yapılarıyla öne çıkarken, bu avantajın ardında yüksek düzeyde bir merkezileştirme riski barındırmaktadır. Zira bu tür dijital varlıkların değeri, genellikle banka hesaplarında tutulan itibari para rezervleriyle teminat altına alınmakta ve bu durum, söz konusu rezervleri yöneten merkezi kuruluşlara mutlak güveni zorunlu kılmaktadır. Örneğin USDT gibi bazı stabil kripto para birimlerinin yalnızca bir kısmı doğrudan Amerikan dolarıyla desteklenirken, geri kalan teminatlar arasında finansal menkul kıymetler, devlet tahvilleri, özel sektör bonoları ve çeşitli emtialar da yer alabilmektedir. Bu çeşitlilik, istikrar

sağlama amacı güden bu araçların zaman zaman yatırımcı nezdinde “güvenli liman” olarak algılanmasını zorlaştırmaktadır. Nitekim, USDC örneğinde olduğu gibi, bazı teminatların iflas eden bankalarda tutulması durumunda sistemik riskler açığa çıkabilmektedir. Bu tür bir olay sonucunda, USDC'nin Amerikan doları ile olan 1:1 sabit paritesi geçici olarak bozulmuş ve ciddi değer kayıpları yaşanmıştır. Bu örnek, stabil kripto paraların da dışsal ekonomik ve finansal koşullardan etkilenebileceğini ve mutlak fiyat istikrarı garantisi sunamayabileceğini göstermektedir.

Emtiaya dayalı tokenler, istisnai durumlar — örneğin savaş veya doğal afetler — dışında, itibari paralara endeksli stabil kripto paralarda gözlemlenen türden yüksek volatiliteye maruz kalmazlar. Bunun temel nedeni, tarımsal ürünlerin arz-talep dinamiklerinin itibari paralardan farklı olarak merkez bankaları tarafından keyfi müdahaleye açık olmamasıdır. Kriz dönemlerinde merkez bankalarının karşılıksız para basarak para arzını artırabilmesi mümkünken, fiziksel tarım ürünlerinde bu tür bir müdahale mümkün değildir. Buğday, arpa, mısır gibi tarım ürünlerinin fiyatları uzun yıllar içinde oluşmuş piyasa dengelerine ve sezonluk faktörlere (örneğin yağış miktarı veya kuraklık) bağlı olarak belirlenir. AGROS uygulamasında da sistem, yalnızca fiziksel olarak depoda bulunan ve doğrulanabilir tarımsal ürünler karşılığında token üretimine izin verir. Dolayısıyla, karşılığı olmayan bir varlık üzerinden emtia token basımı teknik ve yapısal olarak sistemin dışında tutulmuştur. Bu yaklaşım, emtiaya dayalı dijital varlıkların hem fiyat istikrarı hem de güvenilirliği açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır.

İlk iki maddede anlatılan olumsuzluklarına ve merkeziyetsiz algılanma zorluklarına karşın stabil kripto paraların olumlu bir tarafı, genel kitle tarafından tanınmaları ve ekonomik hayat içinde sık kullanılan fiat paralara endeksli olmalarıdır. Bu da stabil kripto paraların vatandaşlara anlatılmasını kolaylaştırmaktadır.

Tarımsal emtia, genel kamuoyu tarafından çoğunlukla egzotik varlıklar olarak algılanmakta; yatırım ya da değişim aracı olarak değerlendirilmemektedir. Bu durum, yani tarımsal emtia piyasalarının geniş kitlelere erişememesi, aslında bir neden değil, finansal erişim eşitsizliğinin bir sonucudur. AGROS tarafından geliştirilen Tarım Ürünleri Tokenleri, bu soruna çözüm sunmayı hedeflemekte; buğday, mısır, arpa ve benzeri ürünleri dijitalleştirerek sıradan bireyler için ulaşılabilir bir yatırım aracına dönüştürmektedir.

Varlığa dayalı token modellerinde, blokzincir kayıtlarının ilgili fiziksel varlıklarla eşleştiğinin doğrulanabilmesi için şeffaf ve zorunlu bir denetim mekanizması gereklidir. Oysa, itibari paralara endeksli stabil kripto paralar için bu tür bir denetim mekanizması hem daha karmaşık hem de daha

az şeffaftır. Dış denetim raporları yalnızca belirli bir zamandaki durumları yansıtmakta; denetim ile rapor arasındaki zaman diliminde neler yaşandığını tespit etmek çoğu zaman mümkün olmamaktadır.

AGROS uygulaması, bu zorluklara karşılık olarak şeffaf ve denetlenebilir bir yapı sunmaktadır. Sistemde üretilen (mint) ve itfa edilen (burn) her token, tekil bir Depo Rezerv Belgesi ile ilişkilidir. Token üretimi veya itfasına dair işlem zamanları, bu işlemleri gerçekleştiren yetkililerin kimlik bilgileri ve onayları gibi veriler sistemde açıkça tanımlanmıştır. Hangi ürün için hangi belgeye dayalı olarak token üretildiği ya da itfa edildiği bilgisi, uygulama arayüzü üzerinden anlık olarak kontrol edilebilmektedir. Ayrıca tüm işlemlerin blokzincir üzerinde kalıcı ve şeffaf şekilde kaydedilmesi, sistemin denetimini kolaylaştırmaktadır.

Diğer yandan, fiat para birimlerine dayalı stabil kripto paralar, küresel jeopolitik gelişmelere ve ülkelerin düzenleyici politikalarına doğrudan bağlıdır. Tarım ürünlerine dayalı token modelleri ise bu tür dışsal siyasi risklerden daha az etkilenmektedir. Örneğin, 2022 yılında başlayan Ukrayna-Rusya savaşı, kısa süreliğine buğday ve bazı tarımsal ürünlerin fiyatlarında dalgalanmalara yol açsa da, fiyatlar kısa süre içerisinde önceki piyasa dengelerine geri dönmüştür. Bu durum, tarımsal emtia piyasalarının uzun vadeli istikrar yapısını göstermektedir.

Tüm bu değerlendirmeler ışığında, fiat paralarla teminatlandırılmış stabil kripto paraların gerek dijital varlık ekosisteminde gerekse geleneksel finans sisteminde önemli bir rol üstlenmeye devam ettiği görülmektedir. USDT (Tether) ve USDC gibi örnekler, hem merkezi (CEX) hem de merkeziyetsiz (DEX) borsalarda geniş hacimli işlem görmektedir. Nitekim bu çalışmanın kaleme alındığı 5 Mayıs 2024 tarihi itibarıyla, USDT'nin günlük işlem hacmi yaklaşık 55 milyar Amerikan doları iken, USDC'nin aynı dönemdeki hacmi 5 milyar doları bulmuştur (Techdows, 2024). Bu veriler, stabil kripto paraların piyasadaki etkinliğini açık biçimde ortaya koymaktadır.

6.1.2. Emtia'ya Dayalı Tokenler Neden Gerekli?

Türkiye ve dünya genelinde tarım ürünlerinin ticareti, büyük ölçüde merkezi ve ihtisaslaşmış borsalar aracılığıyla yürütülmekte olup, bu platformlar çoğunlukla kurumsal yatırımcılara hitap etmektedir. Bu tür borsalar, bireysel yatırımcılara ya tamamen kapalıdır ya da karmaşık ve zaman alıcı başvuru süreçleri gerektirmektedir. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri ve Amerika kıtasında yetiştirilen tarım ürünlerinin ticaretinde en yaygın kullanılan borsalar arasında, merkezi Chicago'da bulunan CME Group Inc.'e bağlı Chicago Mercantile Exchange (CME), Chicago Board of Trade (CBOT), New York Mercantile Exchange (NYMEX) ve The Commodity Exchange (COMEX) gibi finansal türev piyasaları yer almaktadır.

Tarım emtia ticaretinin düzenlenmesi ve gözetimi açısından ABD'de önemli bir rol üstlenen kurumlardan biri, 1974 yılında kurulan ve federal hükümete bağlı bağımsız bir kamu ajansı olan Emtia Vadeli İşlemler Komisyonu'dur (Commodity Futures Trading Commission - CFTC). CFTC, özellikle ABD'de üretilen tarım ürünlerine dayalı finansal enstrümanların denetimi ve düzenlenmesinden sorumlu otoritedir. Kurumun temelini oluşturan yasal altyapı, 1922 yılına kadar uzanan ve tarım ürünleri piyasalarının istikrarını sağlamayı amaçlayan çeşitli yasal düzenlemelere dayanmaktadır (CFTC, 2023).

Benzer biçimde, Birleşik Krallık ve Avrupa Birliği'ne üye ülkelerden Almanya ve Fransa gibi gelişmiş ekonomilerde de tarım emtia piyasalarını düzenleyen benzer kamu otoriteleri ve işleyen merkezi borsa yapıları bulunmaktadır. Bu borsalar, tarımsal ürünlerin fiyatlandırılması, sözleşmeli ticareti ve türev işlemleri açısından büyük önem taşımakta; ancak bireysel katılımı sınırlayan yapıları nedeniyle piyasaların geniş kitlelere açılmasını zorlaştırmaktadır.

6.1.3. Türkiye Tarım Tokenizasyon Örneğinin Avantajları

Türkiye'nin tarım sektörü, hem ekonomik yapının temel taşlarından biri hem de ulusal kalkınma politikaları açısından stratejik öneme sahip bir alandır. Gıda güvenliğinin sağlanması, kırsal kesimde istihdamın sürdürülmesi ve ihracata katkı gibi işlevleriyle, tarım sektörü Türkiye ekonomisinde çok boyutlu bir rol oynamaktadır. Ancak buna rağmen, sektördeki yapısal sorunlar ve ekonomik dengesizlikler, verimlilik artışı ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin gerçekleştirilmesini zorlaştırmaktadır.

Türkiye, farklı iklim kuşaklarına sahip olması nedeniyle tarımsal üretim açısından oldukça elverişli bir coğrafyaya sahiptir. Ancak bu avantaj, üretimin büyük oranda küçük ölçekli aile işletmeleri tarafından gerçekleştirilmesi nedeniyle istenen düzeyde değerlendirilememektedir. Tarımda modernleşme yönünde çeşitli adımlar atılmış olsa da geleneksel üretim yöntemlerinin yaygınlığı hâlâ önemli bir verimlilik engeli olarak karşımıza çıkmaktadır (Çalışkan, 2020).

Sektör, Türkiye iş gücünün yaklaşık %18'ini istihdam etmekte olup, ülke ekonomisindeki büyüme ve üretim kapasitesi açısından kayda değer bir katkı sağlamaktadır. Üretim hacmi açısından en öne çıkan tarım ürünleri buğday, mısır, pamuk, üzüm ve zeytin iken; meyve-sebze üretimi ve hayvancılık da sektörün önemli bileşenleri arasında yer almaktadır (TÜİK, 2021).

Türkiye tarım sektörü birkaç önemli sorundan muzdariptir:

1. **Verimlilik Sorunları**: Küçük aile işletmeleri ve geleneksel tarım yöntemleri, verimliliği sınırlamaktadır.
2. **Su Kıtlığı ve İklim Değişikliği**: Türkiye'deki tarım sektörü, su kaynaklarının azalması ve iklim değişikliği ile ciddi şekilde tehdit altındadır.
3. **Dışa Bağımlılık**: Tarımda kullanılan bazı girdiler, özellikle gübre ve pestisitler, büyük oranda dışa bağımlıdır.
4. **Pazar Sorunları**: Tarım ürünlerinin pazarlama ve satış süreçlerindeki eksiklikler, çiftçilerin gelirlerini olumsuz etkilemektedir (Sarp, 2021).

Küresel ölçekte, Türkiye dünya tarım ticaretinde önemli bir oyuncu olup, özellikle tarım ürünleri ihracatında büyük bir paya sahiptir. Türkiye'nin tarım ihracatındaki en büyük pazarlar arasında Avrupa Birliği, Orta Doğu ve Kuzey Afrika bulunmaktadır. Yerel olarak ise, tarım sektörü, kırsal kalkınmayı sağlamak için kritik bir alan olup, TÜİK (2021) verilerine göre, Türkiye'nin tarım sektörü GSYİH'ye yaklaşık %6 katkı sağlamaktadır.

Türkiye'de buğday, mısır, arpa, fındık, pirinç, çavdar, mercimek, kuru üzüm, zeytin ve pamuk gibi temel tarım ürünlerinin ticareti, ürünlerin belirli kalite standartlarına uygun olarak lisanslı ve güvenilir depolarda saklanması esasına dayanmaktadır. Bu sistem çerçevesinde, ürünler hasat sonrası özelliklerine göre sınıflandırılarak merkezi bir ürün ihtisas borsasında alınıp satılabilir hale gelir. Benzer uygulamalara Amerika Birleşik Devletleri ve bazı Avrupa Birliği ülkelerinde de rastlanmakta olup, hasat sonrası depolama ve ticaret süreçlerinin kurumsal yapılar içinde yürütülmesi küresel bir standart haline gelmiştir.

Ancak söz konusu merkezi sistemler, blokzincir teknolojisinin yaygınlaşmasından önce geliştirilmiş geleneksel yapılar olup, bireysel yatırımcıların bu piyasalara erişimi oldukça sınırlıdır. Çoğu zaman, bu sistemlere katılım ancak belirli lisanslara sahip aracı kurumlar aracılığıyla mümkün olmaktadır. Bu merkezi tarım emtia borsalarında işlem yapan yatırımcılar ise genellikle yüksek finansal kapasiteye sahip büyük ölçekli firmalar, bankalar ve bunlara bağlı menkul kıymet şirketleri ile devlet destekli kurumlar veya fiyat düzenleyici otoritelerden oluşmaktadır. Bu yapı, küçük ölçekli yatırımcıların doğrudan katılımını zorlaştırmakta ve piyasaların demokratikleşmesini engellemektedir.

Blokzincir teknolojisinin sunduğu merkeziyetsiz yapılar, akıllı sözleşmeler ve kendi kendini yöneten dijital organizasyonlar aracılığıyla tarım ürünleri ticaretinde önemli bir dönüşüm potansiyeli barındırmaktadır. Bu teknolojik altyapı, tarımsal ürünlerin mülkiyetinin, ticaretinin ve

fiyat oluşum süreçlerinin geniş kitlelerin erişimine açılmasına olanak tanıyarak piyasanın demokratikleşmesini mümkün kılmaktadır. Böylece, yalnızca büyük yatırımcıların değil, sıradan tüketicilerin dahi fiyatların belirlenmesinde etkili olduğu, daha katılımcı bir ekonomik model hayata geçirilebilecektir. Bu durum, klasik merkezi borsa sistemlerine alternatif olarak, tıpkı kripto varlık piyasalarının itibari paralara ve geleneksel finansal sistemlere sunduğu "disruptive" yaklaşım gibi, tarım sektöründe de paradigmatik bir değişimi beraberinde getirmektedir.

Mevcut merkezi emtia borsalarının sınırlı yatırımcı kitlesiyle çalışması hem sermaye tabanının dar kalmasına hem de tarım ürünlerinde adil ve dengeli fiyat oluşumunun engellenmesine neden olmaktadır. Bu yapı, sofralara gelen ürünlerin fiyatlarında piyasa gerçeğini yansıtmayan, spekülatif dalgalanmalara açık bir ortam yaratmaktadır. Ayrıca, finansmana erişim güçlüğü yaşayan çiftçiler ve üreticiler, ürünlerini önceden nakit ödeme yapabilen sınırlı sayıdaki büyük sermaye gruplarına düşük fiyatla satmak zorunda kalmakta; bu da sektördeki gelir dağılımında ciddi bir dengesizlik doğurmaktadır.

Oysa yatırımcı tabanının genişletilmesi ve sermaye kaynaklarının daha kapsayıcı hale getirilmesi durumunda, çiftçiler ve üreticiler daha çeşitli yatırımcı profillerine ulaşabilecek ve ürünlerini daha rekabetçi koşullarda değerlendirme imkânına sahip olabilecektir. Böylece hem üreticinin gelir seviyesi yükselecek hem de tüketiciye daha dengeli fiyatlar yansıyan daha adil bir piyasa yapısı oluşturulabilecektir.

Türkiye ve çevresindeki ülkeler — başta Rusya, Mısır, Kazakistan ve Ukrayna olmak üzere — küresel ölçekte hububat üretiminin en yoğun gerçekleştiği bölgelerden biridir. Bu coğrafya, buğday, mısır ve arpa gibi temel tarım ürünlerinin hem üretiminde hem de depolanmasında stratejik bir rol oynamaktadır. Özellikle Göbeklitepe'nin bulunduğu Anadolu toprakları, tarım faaliyetlerinin başladığı ve buğdayın anavatanı olarak kabul edilen bölge olması nedeniyle, insanlık tarihinin tarım ile şekillenen evrelerinde önemli bir yer tutmaktadır. Bu nedenle, Anadolu'da üretilen tarım ürünlerinin blokzincir teknolojisi aracılığıyla merkeziyetsiz yöntemlerle dijital olarak temsil edilmesi ve sıradan bireylerin dahi bu ürünlerde ticari faaliyette bulunabilmesini mümkün kılan bir yapı sunulması hem bölge açısından hem de insanlık tarihi bağlamında dikkat çekici bir dönüşümdür. AGROS uygulaması aracılığıyla geliştirilen Tarım Ürünleri Tokenleri, bu dönüşümün temelini oluşturmaktadır.

2016 yılından itibaren kripto varlık piyasalarında çok sayıda altcoin ve token türünün ihraç edildiği gözlemlenmiştir. Ancak bu dijital varlıkların büyük çoğunluğu yalnızca zincir üstü kullanım değerine sahip olup fiziksel bir varlıkla doğrudan ilişkilendirilmemiştir. Buna karşılık, 2023

yılından itibaren öne çıkmaya başlayan emtia temelli token modelleri, gerçek fiziksel varlıkları dayanak alan ve blokzincir altyapısı üzerinden temsil edilen yeni bir kripto varlık kategorisi olarak önem kazanmaktadır.

Varlığa dayalı fiziksel token pazarı, önümüzdeki yıllarda fiziksel varlıkların dijitalleştirilmesi eğiliminin hız kazanmasıyla birlikte büyük bir büyüme potansiyeli taşımaktadır. Fiziksel bir ürün tokenize edildiğinde, yalnızca mülkiyetin dijital aktarımı kolaylaşmakla kalmaz, aynı zamanda parçalı sahiplik, kolay transfer, yüksek likidite ve sınır ötesi erişim gibi çok sayıda yeni avantaj sunar. Bu tokenler, kullanıcıların tercihlerine göre blokzincir cüzdanlarında güvenli şekilde saklanabilir; ihtiyaç duyulduğunda başka tokenlerle ya da varlıklarla kolaylıkla takas edilebilir. Üstelik tüm bu işlemler, geleneksel finansal aracı kurumlara ya da merkezi borsalara gerek duyulmadan, doğrudan blokzincir teknolojisi üzerinden şeffaf, izlenebilir ve güvenli biçimde gerçekleştirilebilmektedir.

Tarım Ürünleri Tokenleri, AGROS platformu aracılığıyla buğday, arpa ve mısır gibi tarımsal varlıklara dayalı olarak üretilen ve blokzincir üzerinde ihraç edilen kripto varlıklar kapsamında, hem Türkiye'de hem de uluslararası düzeyde öncü bir girişim niteliğindedir. Bu çalışmanın temel amacı, fiziksel olarak güvenilir depolarda saklanan tarım ürünlerine karşılık gelen, blokzincir üzerinde şeffaf biçimde izlenebilen ve denetlenebilir tokenler üretmek ve bunları yatırımcıların erişimine sunmak üzere özel bir kripto varlık altyapısı oluşturmaktır. AGROS uygulaması, buğday, arpa ve mısıra ek olarak ayçiçeği tohumu, çavdar, çeltik, fasulye, fındık, keten tohumu, kabuklu Antep fıstığı, kuru kayısı, mercimek, nohut, pamuk, soya fasulyesi, soya küspesi, soya yağı, tritikale, yulaf ve zeytin gibi çeşitli tarım ürünlerinin tokenize edilmesine olanak sağlayacak şekilde genişletilebilir. Örneğin; Buğday Token (BT), 1 kilogram fiziksel buğdayı; Mısır Token (MT) ise 1 kilogram fiziksel mısırı temsil etmektedir.

Çalışma kapsamında geliştirilen AGROS platformu, yalnızca Türkiye ile sınırlı kalmayıp, bölgesel ve küresel ölçekteki güvenilir depolarda tutulan tarımsal ürünlerin tokenize edilmesini ve her bir kilogramlık ürün karşılığında bir ERC-20 standardında tokenin oluşturulmasını mümkün kılmaktadır. Bu tokenler, blokzincir üzerine kalıcı ve değiştirilemez şekilde kaydedilerek, dijital varlıkların şeffaflık ve denetlenebilirlik ilkeleri çerçevesinde yönetilmesini sağlar. AGROS tarafından üretilen Tarım Ürünleri Tokenleri, bu yönüyle güvenilir dijital emtia varlıkları olarak tanımlanabilir.

AGROS uygulaması, yalnızca Türkiye pazarını hedeflemekle kalmayıp, farklı ülkelerdeki anlaşmalı lisanslı depolarda saklanan ürünleri ve bu ürünlere ait Depo Rezerv Belgelerini temel

alarak da token üretimini mümkün kılmaktadır. Bu sistem sayesinde, tarımsal emtiaya yatırım yapmak isteyen bireyler ve kurumsal aktörler, AGROS tarafından ihraç edilen tokenleri hem merkezi (CEX) hem de merkeziyetsiz (DEX) kripto para borsaları üzerinden 7/24 erişilebilir biçimde alıp satabilmektedir. Ayrıca sistemdeki tüm işlem süreçleri, yetkili kullanıcıların çoklu imza (multi-signature) doğrulamasıyla güvence altına alınmakta; bu sayede insan hatası ve kötü niyetli müdahalelere karşı sistemsel koruma sağlanmaktadır.

AGROS platformu tarafından geliştirilen Tarım Ürünleri Tokenleri, tarımsal emtia ticaretinde uzun süredir var olan bazı yapısal sorunlara yenilikçi çözümler sunmayı amaçlamaktadır. Bu çözümler, hem teknolojik olanaklara hem de finansal kapsayıcılığa dayanmaktadır. Platformun çözüm sunduğu başlıca sorun alanları şunlardır:

1. **7/24 İşlem İmkânı:**
   Geleneksel tarım borsalarının sınırlı işlem saatlerinin aksine, Tarım Ürünleri Tokenleri ile günün her saatinde, hafta sonları da dâhil olmak üzere işlem yapılabilmesi mümkündür. Bu sayede piyasa erişimi kesintisiz hale gelmektedir.
2. **Küresel Tarım Token Standardının Oluşturulması:**
   Her tarım ürünü için AGROS tarafından belirlenen sabit nitelikteki token standardı ile buğday, arpa, mısır gibi ürünlerin sınıf ve kalitesine göre çeşitlilik gösteren piyasalar yerine, sade ve tekil bir parite üzerinden işlem yapılması sağlanmaktadır. Örneğin, Buğday Token (BT) yalnızca belirlenmiş kalite standartlarını karşılayan buğdayları temsil eder.
3. **Ticaretin Demokratikleşmesi:**
   Tarımsal ürünlere yatırım yapabilme fırsatının yalnızca büyük yatırımcılara değil, bireysel kullanıcıya da açılması sayesinde hem ticaret hem de finansmana erişim demokratikleşmektedir.
4. **Vadeli İşlem Potansiyeli (Futures):**
   Emtia tokenlerinin standartlaştırılmış yapısı sayesinde gelecekte vadeli işlemlere (futures trading) konu olmaları mümkündür. Bu durum hem üretici hem de yatırımcı için riskten korunma (hedging) aracı olarak yeni fırsatlar doğurabilir.
5. **Yüksek Likiditeye Erişim:**
   Tarım ürünleri tokenleştirilerek global likidite havuzlarına açıldığında, kullanıcılar merkezi (CEX) ve merkeziyetsiz (DEX) kripto para borsaları üzerinden doğrudan işlem gerçekleştirebilir. Buğday Token (BT)/USDT, Buğday Token (BT)/TRY gibi işlem çiftleri ile bu ürünlerin alım-satımı kolaylaşır. Aynı şekilde, BTC/Buğday Token veya ETH/Buğday Token gibi çiftlerle de alternatif yatırım yolları açılabilir.
6. **Kalite Standartlarının Güvence Altına Alınması:**
   Tokenleştirilecek tarım ürünlerinin yalnızca belirli kalite kriterlerini karşılaması, sistemin

güvenilirliğini ve yatırımcı nezdindeki şeffaflığını artırır. Kalite standardının altındaki ürünlerin tokenleşmeye uygun olmaması, platformda emtia niteliğinin korunmasını sağlar.

Bu bağlamda AGROS platformu, yalnızca bir dijital ticaret altyapısı değil, aynı zamanda tarım ürünlerinin standartlaşmasını sağlayan, yatırımcı erişimini genişleten ve tarım piyasalarında daha adil ve etkin bir yapı kurulmasını mümkün kılan bütüncül bir ekosistem sunmaktadır.

Merkezi (CEX) ve merkeziyetsiz (DEX) kripto para borsaları üzerinden hesap açan tüm kullanıcılar, herhangi bir coğrafi kısıt olmaksızın istedikleri miktarda emtia token satın alma hakkına sahiptir. Bu sistemde kullanıcıların depolarda saklanan buğday veya diğer tarımsal ürünlerin çeşitleri hakkında teknik bilgi sahibi olmaları gerekmez. Aynı şekilde, ürünleri fiziksel olarak görmeleri, depoya gitmeleri ya da ürün teslim almaları da beklenmez. AGROS platformu, yatırımcıların düşük tutarlarda yatırım yapmalarına da imkân tanıyarak, küçük ölçekli bireylerin de bu finansal sisteme dahil olabilmesini sağlamaktadır. Böylece, dünyanın herhangi bir yerindeki bir kullanıcı, söz konusu tarımsal emtia tokenlerinin işlem gördüğü kripto borsalar üzerinden 7 gün 24 saat kesintisiz bir şekilde yatırım gerçekleştirebilir.

Zaman içinde bu tür tokenlerin yoğun olarak işlem gördüğü piyasalarda, örneğin Karadeniz ve Doğu Akdeniz ticaret güzergâhlarına özel bir "Buğday Token" spot fiyatı oluşması muhtemeldir. Ayrıca, fiziksel buğdayın uzak bölgelere gönderimine ilişkin ticarette, coğrafi farklılıklar dikkate alınarak bölgeye özgü "futures" kontratlarının oluşturulması da mümkün hale gelecektir. Bu tür vadeli işlem sözleşmeleri, blokzincir tabanlı akıllı kontratlar aracılığıyla otomatik ve güvenilir bir şekilde düzenlenebilir. Böylece geleneksel finans piyasalarında kâğıt üzerinde oluşturulan vadeli işlem sözleşmeleri, dijitalleşerek daha şeffaf, değiştirilemez ve izlenebilir bir yapıya kavuşturulmuş olacaktır.

Akıllı kontratlar yalnızca futures işlemlerini değil, aynı zamanda daha karmaşık finansal ürünlerin de oluşturulmasına olanak sağlayarak, tarım emtia piyasalarının dijitalleşmesi ve modernleşmesinde önemli bir kaldıraç işlevi görebilecektir. Bu durum, tarım ekonomisinin finansallaşması sürecine katkı sunarken, aynı zamanda geleneksel piyasa yapılarının dönüşümüne yönelik yenilikçi bir paradigma ortaya koymaktadır.

AGROS uygulaması tarafından ilk kez geliştirilen emtia token standardının benimsenmesiyle birlikte, algoritmik yapıya dayanmayan, güvenilir ve lisanslı depolarda fiziksel olarak saklanan tarımsal ürünlere endeksli kripto varlıkların uluslararası ticarette kullanılabilir hale gelmesi mümkün olacaktır. Bu yenilik, ülkeler arası ticaretin daha şeffaf, hızlı ve düşük maliyetle

gerçekleştirilmesine katkı sağlayarak döviz ve kambiyo kısıtlamalarından doğan finansal dengesizliklerin giderilmesinde de etkili bir araç işlevi görebilir.

Yakın gelecekte, bölgesel ve küresel düzeyde tarımsal ürün ticaretinin hacminin artması beklenirken, bu sürecin dijital altyapısını tarım emtiasına dayalı tokenler oluşturacaktır. Kripto para borsalarının büyük çoğunluğu, kullanıcı kimlik doğrulaması (KYC – Know Your Customer) süreçlerinden geçen bireylerin token işlemlerine katılımına olanak tanımaktadır (Swan, 2015). Ancak, bazı merkeziyetsiz (DEX) ve merkezi (CEX) kripto para borsaları, bu prosedürü zorunlu kılmadan, anonim kullanıcıların da işlem gerçekleştirmesine izin verebilmektedir (Swan, 2015). Bu durum, emtia tokenlerin daha geniş bir kullanıcı kitlesi tarafından erişilebilir olmasını sağlamakta; böylece, bölgesel ve küresel ölçekte tarımsal ürün ticaretinin ve yatırımının demokratikleşmesine katkı sunmaktadır.

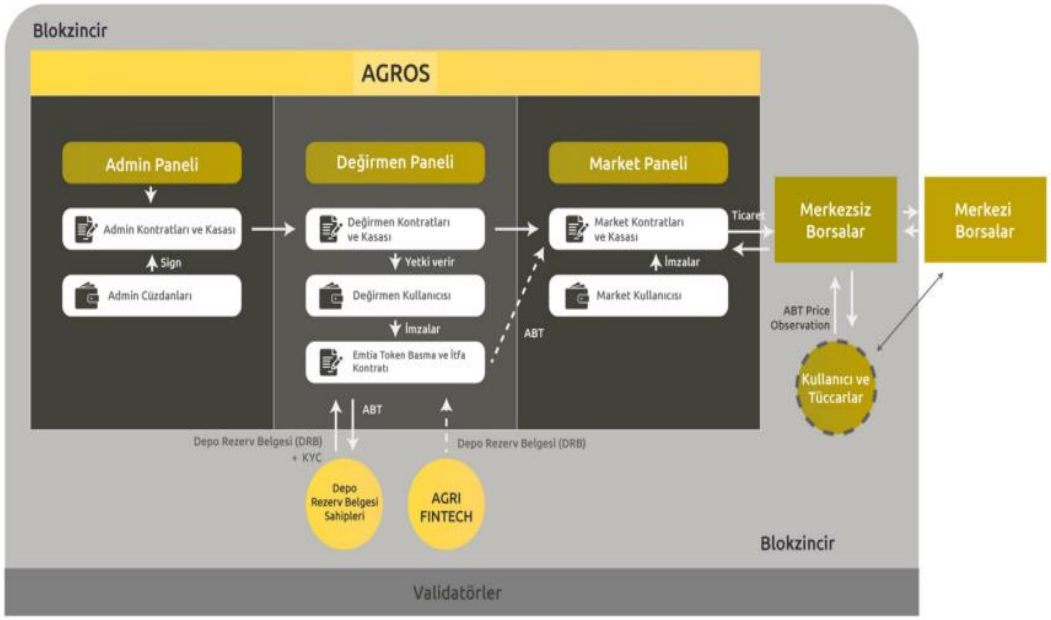
Tarım ürünlerine dayalı tokenlerin, bir kez tokenize edilerek kripto para borsalarında işlem görmeye başlamasının ardından, yalnızca alım-satım aracı olarak değil, aynı zamanda **teminat** niteliği taşıyan dijital varlıklar olarak da kullanılması mümkündür. Örneğin bir tüccar, farklı bir ürünün ticaretinde kullanmak üzere sahip olduğu Buğday Token (BT), Arpa Token (AT) ya da Mısır Token (MT) varlıklarını teminat olarak gösterebilir. Aynı şekilde bireysel yatırımcılar da, söz konusu emtia tokenler aracılığıyla çiftçilere doğrudan destek sağlayabilir, kredi benzeri yapıların blokzincir üzerinde akıllı kontratlar yoluyla kurulmasına katkı sunabilir. Bu uygulama, klasik finansal araçlara alternatif olarak, merkeziyetsiz tarım finansmanı (DeFi-Agri) yapılarının gelişmesine zemin hazırlamaktadır.

6.2. TARIM ÜRÜNLERİ İÇİN BİR TOKENİZASYON ÖRNEĞİ SİSTEM TASARIMI

Bu bölümde, blokzincir teknolojisi kullanılarak tarım ürünleri tokenizasyonu tasarımı ve uygulamasına yönelik adımlar ele alınmaktadır. Projenin başarılı bir şekilde hayata geçirilmesi için yazılım mühendisliği yöntemlerine dayalı bir yaklaşım benimsenmiş olup, sistemin planlanması, analizi, tasarımı, uygulanması ve geliştirilmesi aşamaları ayrıntılı şekilde sistematik bir şekilde takip edilmektedir (Sommerville, 2016). Literatürden elde edilen bilgilerle, her bir adımın detayları, benzer çalışmalarda karşılaşılan süreçler ve bu çalışmanın özgünlükleri ortaya konmaktadır. Bu aşama, proje gereksinimlerinin teknik tasarıma dönüştüğü aşamadır. Burada, modüler tasarım yöntemine dayalı bir yaklaşım benimsenmektedir. Modüler tasarım, her bir bileşenin bağımsız olarak tasarlanıp geliştirilmesini sağlar ve sonrasında bu bileşenler entegrasyon sağlanarak bir araya getirilmektedir (Pressman ve Maxim, 2020). Tarım ürünlerinin tokenizasyonunda, blokzincir yapısı, akıllı sözleşmeler ve token mekanizmalarının tasarımı bu

aşamada yapılmaktadır (Zhang ve diğ., 2019). Bu süreçte, veritabanı yapıları, kullanıcı arayüzleri ve güvenlik önlemleri belirlenir. Ayrıca, tarım ürünlerinin dijital varlıklara dönüştürülmesi için gerekli olan tüm süreçler detaylı şekilde tasarlanır.

AGROS, tarımsal emtiaya dayalı tokenlerin tanımlanması, üretilmesi, yönetilmesi ve ticaretinin yapılmasına olanak tanıyan web tabanlı ve blokzincir ağına deploy edilmiş akıllı kontratlar ile çalışan bir platformdur. AGROS, üç ana kullanıcı rolü tarafından kullanılan üç temel panelden oluşmaktadır: Yönetici Paneli, Değirmen Paneli ve Pazar Paneli



Şekil 6.3: AGROS Üst Düzey Mimari Tasarımı

6.2.1. Sistem mimarisi

AGROS uygulaması, merkeziyetsiz bir mimari üzerine inşa edilmiştir ve web ve blokzincir teknolojisini kullanır. Sistem, kullanıcı arayüzleri (paneller), iş mantığı (akıllı kontratlar) ve veri saklama (blokzincir ve veritabanı) katmanlarından oluşur. Aşağıdaki teknolojiler kullanılarak yazılım geliştirme süreci yürütülmüştür:

- Back-end: NodeJS, JavaScript
- Type safety: TypeScript
- Veri tabanı: PostgreSQL
- Dosya depolama: AWS S3
- Web3 kütüphanesi: web3.js
- Uygulama sunucu hizmeti: AWS
- Blokzincir ağı: Polygon
- Akıllı kontrat: Solidity

6.2.2. Paneller

AGROS uygulaması üç temel panelden oluşmaktadır:

1. Yönetici paneli: Sistem yöneticileri tarafından kullanılmaktadır. Uygulamayı kullanan Blokzincir cüzdanlarını yetkiler ile birlite tanımlama ve yönetme işlemleri ve token mint/burn/transfer onay işlemleri yapılmaktadır.
2. Değirmen paneli: Yetkilendirilmiş kullanıcılar tarafından tarımsal emtia tokenlerinin basımı ve itfa işlemleri gerçekleştirilmektedir.
3. Pazar paneli: Yetkilendirilmiş kullanıcılar tarafından tokenlerin DEX ve CEX borsalarına transferi ve geri çekilmesi işlemleri yapılmaktadır.

6.2.3. Veri Akışı

AGROS uygulaması üzerindeki veri akışı, token mint/ transfer/ burn işlemlerinin yönetici paneli kullanıcılarının onayları ile, aşağıdaki ardışık düzende gerçekleşmektedir:

1. Token üretimi (Basım, Minting): Değirmen paneli üzerinden tarımsal emtia verilerine dayalı olarak token basma işlemi gerçekleştirilir.
2. Token transferi (Transfering: Pazar paneli üzerinden tokenler DEX ve CEX borsalarına transfer edilir.
3. Token ticareti (Trading): Kullanıcılar borsalarda token alım satımı yapar.
4. Token itfası (Burning): Pazar paneli üzerinden tokenler geri çekilir ve değirmen panelinde itfa edilir.

6.2.4. Akıllı Kontrat İşlemleri

AGROS uygulamasında kullanılan akıllı kontratlar, tarım emtia tokenlerinin basımı (mint) ve itfa (burn) işlemlerini yönetir. Bu işlemler, ilgili depo rezerv belgeleri ile ilişkilendirilerek sistemin şeffaflığını ve güvenilirliğini artırır.

Akıllı kontratlar, aşağıdaki işlemleri içermektedir:

- Basım (Minting): Yeni tokenlerin basılması ve depo rezerv belgeleri ile ilişkilendirilmesi.
- İtfa (Burning): Tokenlerin işlem gördükleri DEX/CEX'lerden geri transfer edilerek, emtia karşılığının fiziksel olarak depodan çıkarılması durumunda tokenlerin yok edilmesi.

Akıllı kontratlar, Solidity programlama dilinde yazılarak Polygon blokzincir ağında deploy

edilmiştir. Kripto cüzdan entegrasyonu için Ethereum blokzincir uyumlu MetaMask veya benzeri uyumlu cüzdanlar kullanılabilmektedir.

Token mint işlemi için kullanılan Depo Rezerv Belgeleri ise Dijital olarak saklanmaktadır ve blokzincir üzerinde ilgili token ile referanslanmaktadır. Token Verileri, Blokzincir üzerinde immutable (değiştirilemez) olarak saklanır.

6.2.5. Sunucu Seçimi

AGROS platformunun altyapısı için Amazon Web Services (AWS) tercih edilmiştir. Bunun başlıca sebepleri şunlardır:

- Ölçeklenebilirlik: AWS, yüksek talep dönemlerinde bile sistemin performansını optimize edecek şekilde ölçeklenebilir altyapı sunar.
- Güvenlik: AWS, veri güvenliği ve uyumluluk standartları konusunda sektör liderlerindendir.
- Yedeklilik ve erişilebilirlik: AWS'nin sunduğu yedekleme ve erişilebilirlik özellikleri, AGROS uygulamasının sürekli erişilebilir ve güvenilir olmasını sağlar.

6.2.6. Blokzincir Ağ Seçimi

AGROS platformunda yer alan akıllı kontratlar, Solidity programlama dili kullanılarak yazılmıştır ve Polygon (eski adıyla Matic) ağında çalıştırılmaktadır. Polygon blokzincir ağının tercih edilme sebepleri aşağıdaki gibidir:

- Düşük işlem ücretleri: Polygon ağı, Ethereum'a kıyasla çok daha düşük işlem ücretleri sunar, bu da kullanıcılar için maliyet avantajı sağlar.
- Yüksek hız: Polygon, yüksek işlem hızları sunarak kullanıcı deneyimini iyileştirir.
- EVM uyumluluğu: Polygon ağı, Ethereum Virtual Machine (EVM) ile uyumlu olduğundan, Ethereum üzerinde geliştirilmiş olan uygulamaların kolayca entegre edilmesine olanak tanır.

AGROS Uygulaması temelde üç panelden oluşmaktadır:

1. **Yönetim paneli:** Kullanıcı rolleri ve kullanıcıların tanımlandığı, paneller arası token transferlerinin onaylandığı, beyaz/kara listeler ile onaylı/yasaklı cüzdan adreslerinin tanımlandığı ve bir takım kritik raporların alınabildiği admin panelidir.
2. **Değirmen paneli:** Değirmen paneli, fiziksel dünyadaki bir nevi “Un Değirmeni” görevini yerine getirerek güvenli depolarda muhafaza edilen tarım ürünlerinin “Depo Rezerv

Belge"lerindeki bir takım ürün bilgilerinden "kg başına 1 Token olacak şekilde" ilgili tarım ürününe ait Tokeni üretmektedir.

3. **Pazar paneli:** DEX ve CEX kripto para borsalarına tarım ürünleri token transferlerinin yapıldığı ve gerektiği durumlarda kripto para borsalarından emtia tokenlerin AGROS uygulamasına geri çekilme işlemlerinin yapıldığı bir nevi AGROS uygulaması ile dış dünya arasında köprü görevi gören bir paneldir.

Tarım ürünleri tokenlerinin üretildiği değirmen paneli öncesi hazırlık adımları:

1. Süreç, ilk olarak tarımsal ürünlerin (buğday, arpa, mısır), satın alınması ve anlaşmalı olunan bağımsız güvenli bir depoya gelmesi ile başlar.
2. İkinci adımda, gelen tarımsal ürünlerin kalite testleri deponun bünyesinde kurulu bağımsız laboratuvar veya kalite birimi tarafından yapılır ve ürünün niteliğine bağlı olarak ilgili ürün bir kalite kategorisine konulur ve deponun ilgili kısmında uygun koşullarda depolanır.
3. İlgili tarım ürününe karşılık gelen bir "Depo Rezerv Belgesi" tekil (unique) bir ID ve ürünün özellikleri ile birlikte oluşturulur ve bu kayıtla artık ilgili tarım ürününün Tarım Ürünleri için Tokenizasyon Örneği - AGROS veri tabanında dijital bir kaydı oluşturulmuş olur.
4. Artık AGROS tarafından Tarım Ürünleri Tokeni haline getirilecek olan tarım ürünü (buğday, arpa, mısır gibi) depodadır ve "Depo Rezerv Belgesi" ile kendisine has dijital bir kimlik sahibidir.

Aşağıda AGROS uygulamasının devreye aldığı adımlar sırasıyla listelenmektedir:

1. AGROS uygulamasına ilgili tarım ürününün "Depo Rezerv Belgesi" dijital olarak ulaşır.
2. Bu belge taranır ve belgedeki veriler OCR tekniği ile dijital olarak okunur hale getirilir.
3. PDF olarak taranıp içeriği okunan "Depo Rezerv Belgesi" dosyasındaki temel bilgiler özet formda blokzincir içine yazılır. Örnek: Depo Rezerv Belgesi'ndeki "Ürün Kodu" alanı olan W-B-001-100.000 alanı bir nevi Depo Rezerv Belgesi'nin özeti gibidir ve blokzincir ağındaki akıllı kontrat içine gözle okunacak şekilde yerleştirilir. Örnekteki bu kayıt; Buğday (Wheat-W) ürününün, 1.Faturası (001) temel alınarak oluşturulan Depo Rezerv Belgesi ile 100.000 kg (100 Ton) ürünün tokenize edildiğini özetler. Böylelikle tam olarak hangi "Depo Rezerv Belgesi"nin hangi zamanda tokenize edildiği denetçiler tarafından kolaylıkla kontrol edilebilir. Artık ihracı yapılmış yani üretilmiş (mint edilmiş) 100.000 adet BT (Buğday Token), kilogram başına bir adet olarak yani tam 100.000 adet token olarak oluşturulmuştur.

4. Dördüncü adım olarak, alım-satımı yapılan bir BT (Buğday Token)'nin artık sistemden çıkması gerektiğinde, örneğin ürün yurt dışında bir müşteriye satılacaksa veya depodan çıkışı sağlanacaksa öncelikle ürün miktarı kadar tarım token imha edilmelidir. Buna teknik terminolojide "burn" ya da yakma, eski dildeki kelimesiyle "itfa" denilmektedir. Bu işlem de Değirmen Paneli vasıtasıyla yapılmaktadır.
5. Bu sürecin sonunda satışı ve itfası yapılan token karşılığı o miktarda (kg başına 1 token) tarım ürünü (buğday, arpa, mısır gibi) artık fiziki olarak da depodan çıkarılabilir.

Tarım Ürünleri için Tokenizasyon Örneği'nde işlemler için Multi-Signature (Multisig) denilen "Çoklu İmza" yapısı kullanılmaktadır. Yönetim, Değirmen ve Pazar panelleri kullanıcıları sisteme tanımlanırken kullanıcıların kendi kripto varlık cüzdan hesapları ile tanımlanmaktadır ve sisteme tanımlanan kripto varlık cüzdanları ile Tarım Ürünleri için Tokenizasyon Örneği Login - Giriş işlemi için akıllı kontratlar ile sisteme bağlanılıp, giriş yapılmaktadır. Tarım Ürünleri için Tokenizasyon Örneği'nde işlemlerin tek bir kullanıcının işlemi yapması sonrası işlemin türüne göre diğer kullanıcıların onaylarına düşerek ve diğer kullanıcılarda sisteme tanımlanan kripto varlık cüzdanları ile sisteme bağlanarak, kendi onaylarında bekleyen işlemleri onaylayarak işlemler sonuçlanmaktadır. Multisig yapısı, bir dijital varlık ya da bir işlem için birden fazla onay imzası gerektiren bir güvenlik özelliğidir. Bu özellik, bir hesaptan yapılan işlemlerde tek bir onay imzası yerine belirli bir sayıda onay imzasını şart kılan bir mekanizmayı ifade eder (Multisig, 2023). Multisig, özellikle kripto paraların saklanması veya transfer edilmesi gibi durumlarda güvenliği artırmak için yaygın olarak kullanılır. Multisig hesapları, belirli bir işlemin gerçekleşebilmesi için birden fazla kripto varlık cüzdanına ait özel anahtarın kullanılmasını gerektirir (Multisig, 2023). Bu sayede, bir kişi tarafından kontrol edilen tek bir özel anahtarın başkaları tarafından ele geçirilmesi durumunda dahi işlemler gerçekleştirilemez. Multisig, güvenlik açısından sağlam bir yapı sunmaktadır. İşlemler ancak tüm gereken onay imzalarının, sisteme kripto varlık cüzdanları ile tanımlanarak bağlanan kullanıcılar tarafından verildiğinde gerçekleşmektedir.

6.3. TARIM ÜRÜNLERİ İÇİN BİR TOKENİZASYON ÖRNEĞİ UYGULAMASI – AGROS

6.3.1. AGROS Platformu Yapısı ve İşleyişi

Tarım Ürünleri için Tokenizasyon Örneği - AGROS, Tarımsal emtiaya endeksli Tarım Ürünleri Tokenlerinin tanımlandığı, üretildiği ve yönetildiği uygulamanın adıdır. "Agriculture" kelimesinin ilk üç harfi olan "AGR" ve arkasına İngilizce "Operating System" kelimelerini ifade eden "OS" son eki eklenerek oluşturulmuş bir platform ismidir. AGROS platformunda üretilen Tarım Ürünleri Tokenleri Buğday Token için kısa kodu BT, Arpa Token için kısa kodu AT, Mısır Token için kısa kodu MT olacak şekilde üretilmektedir. Bu bölümde AGROS'un operasyonunu yürüten yetkili personellerin kullandığı ekranlar anlatılmaktadır.

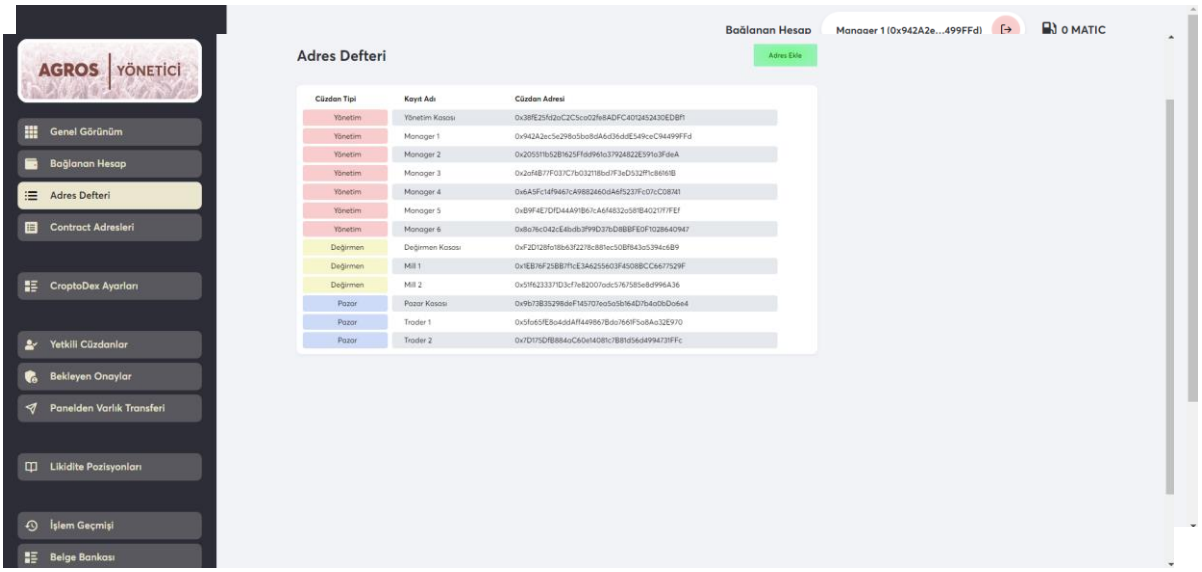
AGROS, üç tür kullanıcı rolüne sahip kullanıcılar tarafından kullanılacak başlıca üç panelden oluşmaktadır. Bunlar, "Yönetici Paneli", "Değirmen Paneli" ve "Pazar Paneli"dir.

AGROS uygulaması içinde yetkili kullanıcılar tarafından üretilecek ve kripto para borsalarına transfer edilecek olan emtia tokenleri, tokenlerin listelendiği ve ticaretinin yapıldığı kripto para borsalarına üye tüm kullanıcılar tarafından alınıp satılabilecektir. Yatırımcıların DEX ve CEX kripto para borsalarından alım satımını yapabilecekleri Buğday Token (BT), Arpa Token (AT) ve Mısır Token (MT), tokenlerin üretildiği blokzincir ağı üzerinde gerçekleştirilmektedir.

AGROS uygulaması, ilerleyen dönemde adeta blokzincirde işleyen alternatif bir tarım pazarı gibi kurgulanmıştır. AGROS uygulamasının sunmuş olduğu teknolojik altyapı kullanıcılara tarım pazarına web3 teknolojisi ile erişim imkânı sunacaktır. Merkezi bir tarım pazarından temel farkı, sistemi kullanacak kişi ve kurumların AGROS uygulamasına uyumlu bir blokzincir cüzdanı sahibi olmaları halinde ayrıca bir bankada aracı kurum hesabı açtırmadan emtiaya dayalı tüm tarım tokenlerin alım satımına başlayabilecek olmalarıdır. Bu kişiler dijital cüzdanları içinde bulunan stabil kripto paralar ve sisteme uyumlu kripto coin/tokenler vasıtasıyla saniyeler içinde işleme ve alım-satım yapmaya başlayabileceklerdir.

6.3.2. Yönetici Paneli

AGROS uygulamasının yönetici paneli, sistemde işlem yapma yetkisine sahip tüm blokzincir cüzdanlarını tanımlama hakkına sahiptir, yani diğer panellerin kullanıcılarının, kripto varlık cüzdanları ile birlikte tanımlanması yönetici paneli kullanıcıları tarafından yapılabilmektedir. Yani AGROS'da yer alan 3 panele ait kullanıcılar Yönetici panel admin kullanıcıları tarafından sisteme tanımlanabilmektedir.



Şekil 6.4: AGROS Yönetici Paneli

Diğer taraftan, değirmen paneli tarafından yaratım süreci tetiklenen tarım ürünleri tokenlerinin blokzincir ağında yaratım (mint) süreci yönetici paneli kullanıcılarının onayları ile gerçekleşmektedir.

Yönetici Paneli'nin süreç ve işlemleri aynı zamanda blokzincir ağı'nda da "Yönetici akıllı kontratı" ile yürütülmekte ve yönetilmektedir. Yani yönetici paneli işlemleri, blokzincir ağı'na deploy ve verify edilmiş yönetici akıllı kontratı ile işletilmektedir ve işlem kayıtları blokzincir ağı'nda oluşmaktadır. Aşağıda "Yönetici akıllı kontratı"nın metodları, kod örnekleri ve blokzincir ağı'nda oluşturulan yönetici işlem örnek kayıtları gösterilmektedir ve Buğday / Arpa / Mısır Tokenleri Akıllı kontratları ve İşlem kayıtları ekler bölümünde gösterilmektedir.

Aşağıdaki şekil, yönetici paneli işlemlerinin blokzincir üzerinde nasıl temsil edildiğini gösteren "Yönetici Akıllı Kontratı"nın temel metodlarını sunmaktadır. Kontrat içerisindeki metodlar; token ihracı, ürün kaydı, doğrulama (verification), kullanıcı yetkilendirme ve işlem onayı gibi işlevleri içermektedir. Bu metodlar sayesinde, geleneksel veritabanı sistemlerinde gerçekleştirilen yönetimsel işlemler, merkeziyetsiz ve değiştirilemez bir şekilde blokzincir ağına aktarılmış

olmaktadır. Böylece yöneticinin sistem üzerindeki tüm kritik işlemleri şeffaf ve denetlenebilir hale gelir (Zhang ve diğ., 2019). Aynı zamanda, yönetici akıllı kontratının blokzincir üzerindeki veri okuma (read-only) ve yazma (write functions) işlevlerini göstermektedir. authorized, mill, order, tokenList, trader gibi read-only metodlar, sistemde kayıtlı olan aktörleri ve işlem durumlarını izlemek için kullanılır. Bu fonksiyonlar, kontrat içindeki verilerin durumunu sadece görüntülemeye olanak sağlar ve değişiklik yapılmasına izin vermez. Böylece sistemin denetlenebilirliği artırılır ve kullanıcılar arası veri paylaşımı güvence altına alınır. Yazma fonksiyonları ise, blokzincir ağına işlem gönderen ve sistem durumunu değiştiren yönetici fonksiyonlarıdır. addToBlacklist, cancelMillOrder, initTrader, pauseToken, transferCommodityToken gibi fonksiyonlar; kullanıcı yetkilendirme, talep iptali, token akışı kontrolü ve sistem güncellemeleri gibi işlevleri yerine getirir. Bu yazma işlemleri de blokzincire kalıcı olarak kaydedilir ve işlem geçmişi değiştirilemez şekilde saklanır. Bu yapı, sistemin merkeziyetsizliğini ve işlem bütünlüğünü garanti altına alır.

Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da görülen metod ve kod parçaları, Ethereum uyumlu Solidity dili ile geliştirilmiş bir akıllı kontrat yapısını temsil etmektedir. Kod içerisinde yer alan fonksiyonlar, sistemde tanımlı rollerin gerçekleştireceği işlemleri blokzincire yazmak üzere hazırlanmıştır. Kod örneği, yönetici panelinde yapılan işlemlerin otomasyonunu ve zincir üstü işlem güvenliğini garanti altına alacak şekilde tasarlanmıştır. Bu yapılar, sistemin dış müdahalelere kapalı olmasını ve işlem geçmişinin silinemez şekilde tutulmasını sağlar (Buterin, 2014).



Şekil 6.5: AGROS Yönetici Akıllı Kontratı Metodları

File 1 of 14 : TransparentUpgradeableProxy.sol

```solidity
// SPDX-License-Identifier: MIT
// OpenZeppelin Contracts (last updated v4.8.3) (proxy/transparent/TransparentUpgradeableProxy.sol)

pragma solidity ^0.8.0;

import "../ERC1967/ERC1967Proxy.sol";

/**
 * @dev Interface for {TransparentUpgradeableProxy}. In order to implement transparency, {TransparentUpgradeableProxy}
 * does not implement this interface directly, and some of its functions are implemented by an internal dispatch
 * mechanism. The compiler is unaware that these functions are implemented by {TransparentUpgradeableProxy} and will not
 * include them in the ABI so this interface must be used to interact with it.
 */
interface ITransparentUpgradeableProxy is IERC1967 {
    function admin() external view returns (address);

    function implementation() external view returns (address);

    function changeAdmin(address) external;

    function upgradeTo(address) external;

    function upgradeToAndCall(address, bytes memory) external payable;
}
```

File 3 of 14 : draft-IERC1822.sol

```solidity
// SPDX-License-Identifier: MIT
// OpenZeppelin Contracts (last updated v4.5.0) (interfaces/draft-IERC1822.sol)

pragma solidity ^0.8.0;

/**
 * @dev ERC1822: Universal Upgradeable Proxy Standard (UUPS) documents a method for upgradeability through a simplified
 * proxy whose upgrades are fully controlled by the current implementation.
 */
interface IERC1822Proxiable {
    /**
     * @dev Returns the storage slot that the proxiable contract assumes is being used to store the implementation
     * address.
     *
     * IMPORTANT: A proxy pointing at a proxiable contract should not be considered proxiable itself, because this risks
     * bricking a proxy that upgrades to it, by delegating to itself until out of gas. Thus it is critical that this
     * function revert if invoked through a proxy.
     */
    function proxiableUUID() external view returns (bytes32);
}
```

File 4 of 14 : IERC1967.sol

```solidity
// SPDX-License-Identifier: MIT
// OpenZeppelin Contracts (last updated v4.8.3) (interfaces/IERC1967.sol)

pragma solidity ^0.8.0;

/**
 * @dev ERC-1967: Proxy Storage Slots. This interface contains the events defined in the ERC.
 *
 * _Available since v4.9._
 */
interface IERC1967 {
    /**
     * @dev Emitted when the implementation is upgraded.
     */
    event Upgraded(address indexed implementation);

    /**
     * @dev Emitted when the admin account has changed.
     */
    event AdminChanged(address previousAdmin, address newAdmin);

    /**
     * @dev Emitted when the beacon is changed.
     */
    event BeaconUpgraded(address indexed beacon);
```

File 12 of 14 : Address.sol

```solidity
// SPDX-License-Identifier: MIT
// OpenZeppelin Contracts (last updated v4.8.0) (utils/Address.sol)

pragma solidity ^0.8.1;

/**
 * @dev Collection of functions related to the address type
 */
library Address {
    /**
     * @dev Returns true if `account` is a contract.
     *
     * [IMPORTANT]
     * ====
     * It is unsafe to assume that an address for which this function returns
     * false is an externally-owned account (EOA) and not a contract.
     *
     * Among others, `isContract` will return false for the following
     * types of addresses:
     *
     *  - an externally-owned account
     *  - a contract in construction
     *  - an address where a contract will be created
     *  - an address where a contract lived, but was destroyed
     * ====
```

Şekil 6.6: AGROS Yönetici Akıllı Kontratı Kod Örnekleri



Şekil 6.7: AGROS Yönetici Akıllı Kontratı Örnek İşlem Kayıtları

Şekil 6.6'da görüldüğü üzere, akıllı kontrat, OpenZeppelin kütüphanesine dayalı olarak "TransparentUpgradeableProxy" mimarisiyle yapılandırılmıştır. Bu yapı, akıllı kontratların güncellenebilirliğini destekleyen, aynı adres üzerinden yeni versiyonlar yayınlamaya olanak tanıyan bir yaklaşımdır. upgradeTo, changeAdmin, implementation() gibi metodlar sayesinde kontrat mantığı değiştirilmeden kullanıcıların adresleri korunur. Bu da hem esneklik hem sürdürülebilirlik sağlar.

Şekil 6.7'de görüldüğü üzere, yönetici kontratına ait işlemlerin blokzincir ağına kaydedilmiş halini, yani "on-chain" işlem geçmişini göstermektedir. Her bir işlem, hash değerleri ile tanımlanmış, zaman damgası ile mühürlenmiş ve değiştirilemez şekilde ağda saklanmaktadır. Bu kayıtlar, ürün tokenlerinin ihracı, kullanıcı yetkilendirmesi ve ürün transfer onayları gibi

yönetimsel eylemlerin doğrulanabilir bir izini sunmaktadır. Böylece, sistem hem kullanıcılar hem de denetleyici kurumlar açısından yüksek düzeyde şeffaflık sunar (Catalini ve Gans, 2020).

Ekler bölümünde yer alan token türlerine özgü kontrat yapıları ve işlem örnekleri, tarım ürünlerinin tokenize edilerek dijital varlık haline getirildiği süreçleri teknik olarak detaylandırmaktadır. Her bir tarım ürünü için ayrı bir kontrat oluşturulmuş olup, bu kontratlar ERC-20 standardına uygun biçimde yapılandırılmıştır. Böylece her ürün, kendi işlem geçmişi ve kullanıcı etkileşimleri ile zincir üstü (on-chain) olarak izlenebilir hale gelir. Bu yapı, ürün bazlı şeffaflık ve denetlenebilirliği artırmakla birlikte, tarımsal arz zincirlerinde güveni pekiştirir (Saberi ve diğ., 2019).

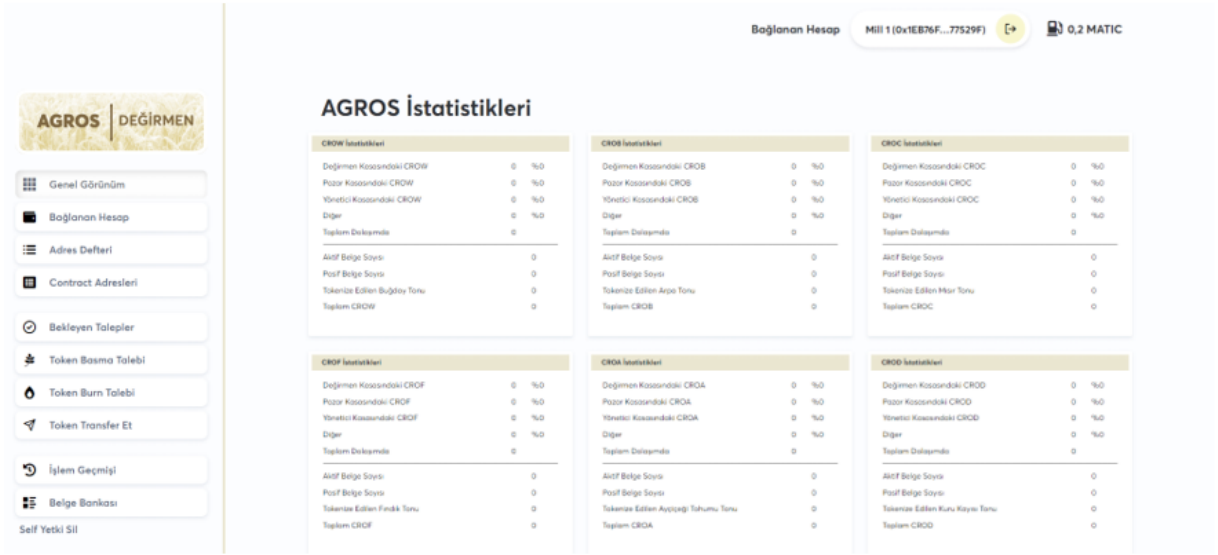
Tüm kontratlar, Solidity 0.8.x sürümüne uygun olarak derlenmiş ve OpenZeppelin kütüphaneleriyle güvenlik açıklarına karşı güçlendirilmiştir. Upgradeable proxy yapısı, özellikle uzun vadeli platformlar için güncelleme maliyetlerini azaltırken, değişikliklerin merkeziyetsiz kontrolünü sağlamaktadır (Buterin, 2014; OpenZeppelin Docs, 2023).

6.3.3. Değirmen Paneli

Bu panelde yönetim paneli tarafından yetkilendirmesi yapılmış kullanıcılar tarafından fiziksel emtiaya dayalı olan tokenlerin basılması, yani ihracı yapılmaktadır. Basılan her token mutlaka karşılığı olduğu “Depo Rezerv Belgesi” ile birebir ilişkilendirilmektedir.

AGROS değirmen panelinin genel görünüşü Şekil 6.6’da gösterilmiştir. Yönetici paneli admin kullanıcıları tarafından sisteme veri girme hakkı verilmiş değirmen kullanıcılarının Buğday Token (BT) / Arpa Token (AT) / Mısır Token (MT) mint (basım) ve burn (itfa) gibi işlemleri yapabilmesini sağlamaktadır.

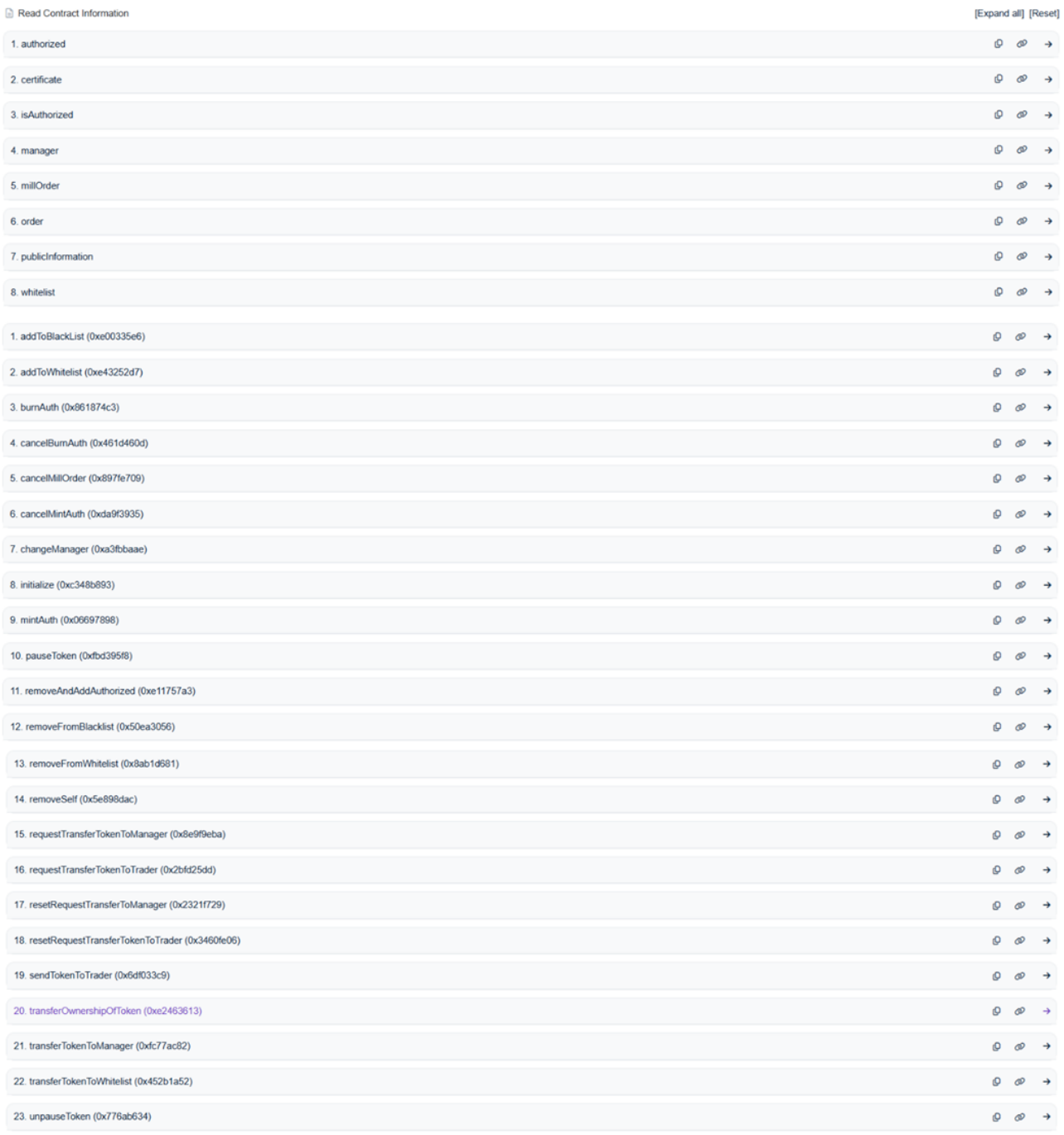
Sisteme dijital belgeleri taranan “Depo Rezerv Belge”lerine karşılık ürün (meta) buğday ise Buğday Token (BT), arpa ise Arpa Token (AT), mısır ise Mısır Token (MT) üretilir. Aşağıda görülen panel ekranından da AGROS istatistikleri izlenebilmekte ve istenilen anda sistem içinde üretilen (mint edilen) tüm tokenler topluca raporlanabilmekte ve görüntülenebilmektedir. Aşağıdaki şekil, AGROS platformunun değirmen kullanıcıları için geliştirilen istatistik arayüzünü göstermektedir. Panel üzerinden sisteme kayıtlı ürünlerin türlerine göre yapılan token işlemleri anlık olarak izlenebilmektedir. Sistemde aktif belge sayısı, toplam token arzı, işlem geçmişi ve ürün türlerine göre dağılım gibi veriler, kullanıcıların karar destek süreçlerine katkı sunmaktadır. Bu yapı, tarım ürünlerinin dijitalleştirilmesine dair süreçlerin şeffaf ve izlenebilir bir zeminde yürütüldüğünü ortaya koymaktadır.



Şekil 6.8: AGROS Değirmen Paneli

Değirmen Paneli'nin süreç ve işlemleri aynı zamanda blokzincir ağında da "Değirmen akıllı kontratı" ile yürütülmekte ve yönetilmektedir. Yani değirmen paneli işlemleri, blokzincir ağı'na deploy ve verify edilmiş değirmen akıllı kontratı ile işletilmektedir ve işlem kayıtları blokzincir ağında oluşmaktadır. Aşağıda "Değirmen akıllı kontratı"nın metodları, kod örnekleri ve blokzincir ağında oluşturulan değirmen işlem örnek kayıtları gösterilmektedir ve Buğday / Arpa / Mısır Tokenleri Akıllı kontratları ve İşlem kayıtları ekler bölümünde gösterilmektedir.

Aşağıdaki Şekil 6.9, AGROS platformunda kullanılan değirmen akıllı kontratının blokzincir üzerindeki veri okuma fonksiyonlarını temsil etmektedir. authorized, certificate, millOrder, manager ve publicInformation gibi fonksiyonlar, sistemdeki mevcut durumun (örneğin hangi kullanıcıların yetkili olduğu, hangi sertifikaların kayıtlı bulunduğu) görüntülenmesini sağlar. Bu işlevsellik, platformdaki karar vericilerin işlem geçmişine erişebilmesini ve sistem durumunu denetleyebilmesini kolaylaştırır. Aynı zamanda, AGROS sisteminin akıllı kontrat yapısı içinde yer alan değirme akıllı kontratına ait Yazma (Write) işlem fonksiyonları da listelenmektedir. mintAuth, burnAuth, cancelMintAuth, requestTransferTokenToManager, transferOwnershipOfToken gibi fonksiyonlar doğrudan token basımı, itfası, yetki değişiklikleri ve yöneticiye transfer taleplerini içeren süreçleri yürütmektedir. Her fonksiyon, sistemdeki fiziksel bir emtia ile ilişkili dijital token işlemlerini zincir üstü bir güvenlik mekanizmasıyla gerçekleştirmektedir.



Şekil 6.9: AGROS Değirmen Akıllı Kontratı Metodları

File 1 of 14 : TransparentUpgradeableProxy.sol

```sol
// SPDX-License-Identifier: MIT
// OpenZeppelin Contracts (last updated v4.8.3) (proxy/transparent/TransparentUpgradeableProxy.sol)

pragma solidity ^0.8.0;

import "../ERC1967/ERC1967Proxy.sol";

/**
 * @dev Interface for {TransparentUpgradeableProxy}. In order to implement transparency, {TransparentUpgradeableProxy}
 * does not implement this interface directly, and some of its functions are implemented by an internal dispatch
 * mechanism. The compiler is unaware that these functions are implemented by {TransparentUpgradeableProxy} and will not
 * include them in the ABI so this interface must be used to interact with it.
 */
interface ITransparentUpgradeableProxy is IERC1967 {
    function admin() external view returns (address);

    function implementation() external view returns (address);

    function changeAdmin(address) external;

    function upgradeTo(address) external;

    function upgradeToAndCall(address, bytes memory) external payable;
}

```

File 2 of 14 : Ownable.sol

```sol
// SPDX-License-Identifier: MIT
// OpenZeppelin Contracts (last updated v4.7.0) (access/Ownable.sol)

pragma solidity ^0.8.0;

import "../utils/Context.sol";

/**
 * @dev Contract module which provides a basic access control mechanism, where
 * there is an account (an owner) that can be granted exclusive access to
 * specific functions.
 *
 * By default, the owner account will be the one that deploys the contract. This
 * can later be changed with {transferOwnership}.
 *
 * This module is used through inheritance. It will make available the modifier
 * `onlyOwner`, which can be applied to your functions to restrict their use to
 * the owner.
 */
abstract contract Ownable is Context {
    address private _owner;

    event OwnershipTransferred(address indexed previousOwner, address indexed newOwner);

    /**
```

File 3 of 14 : draft-IERC1822.sol

```sol
// SPDX-License-Identifier: MIT
// OpenZeppelin Contracts (last updated v4.5.0) (interfaces/draft-IERC1822.sol)

pragma solidity ^0.8.0;

/**
 * @dev ERC1822: Universal Upgradeable Proxy Standard (UUPS) documents a method for upgradeability through a simplified
 * proxy whose upgrades are fully controlled by the current implementation.
 */
interface IERC1822Proxiable {
    /**
     * @dev Returns the storage slot that the proxiable contract assumes is being used to store the implementation
     * address.
     *
     * IMPORTANT: A proxy pointing at a proxiable contract should not be considered proxiable itself, because this risks
     * bricking a proxy that upgrades to it, by delegating to itself until out of gas. Thus it is critical that this
     * function revert if invoked through a proxy.
     */
    function proxiableUUID() external view returns (bytes32);
}
```

File 4 of 14 : IERC1967.sol

```sol
// SPDX-License-Identifier: MIT
// OpenZeppelin Contracts (last updated v4.8.3) (interfaces/IERC1967.sol)

pragma solidity ^0.8.0;

/**
 * @dev ERC-1967: Proxy Storage Slots. This interface contains the events defined in the ERC.
 *
 * _Available since v4.9._
 */
interface IERC1967 {
    /**
     * @dev Emitted when the implementation is upgraded.
     */
    event Upgraded(address indexed implementation);

    /**
     * @dev Emitted when the admin account has changed.
     */
    event AdminChanged(address previousAdmin, address newAdmin);

    /**
     * @dev Emitted when the beacon is changed.
     */
    event BeaconUpgraded(address indexed beacon);
```

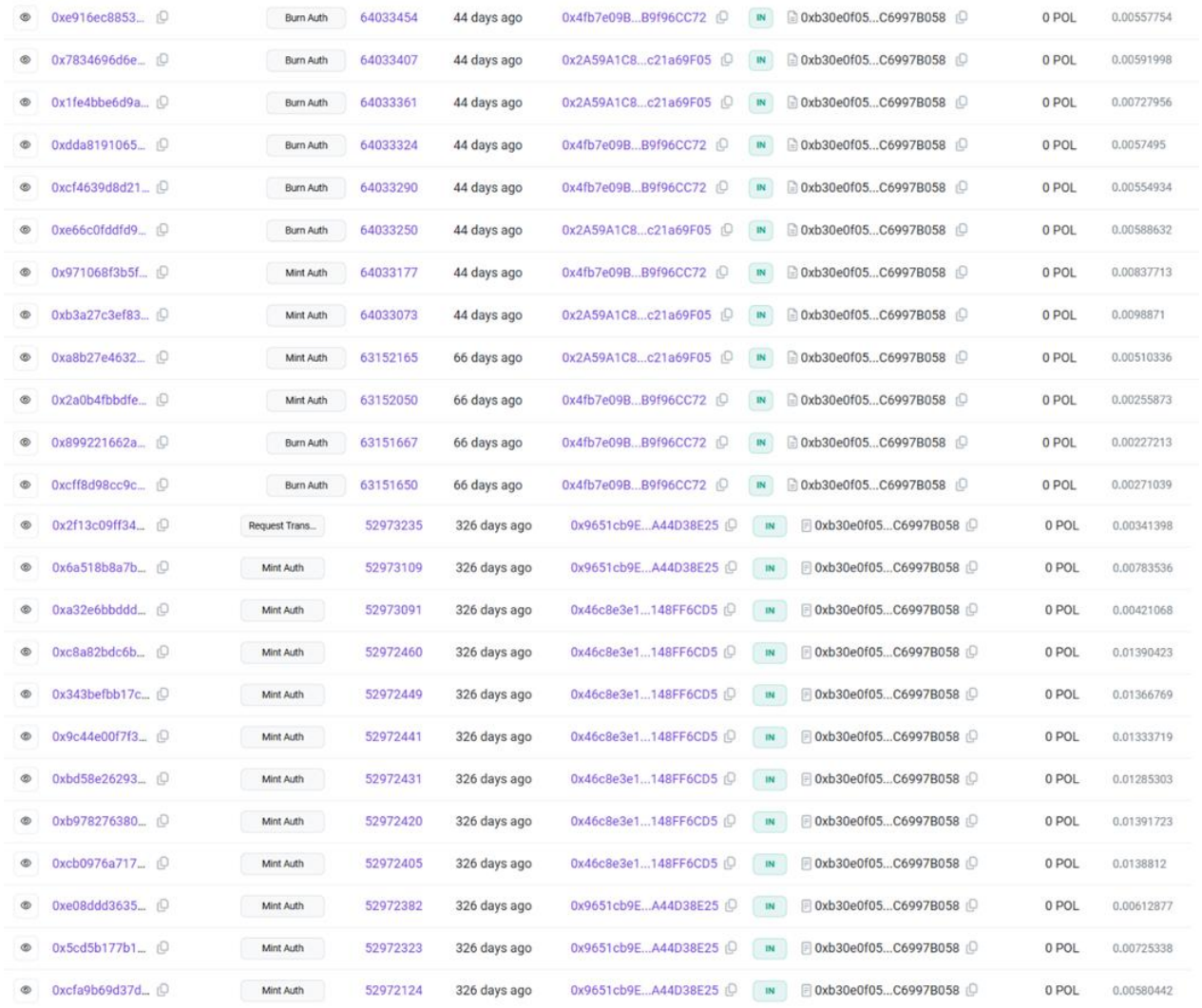
File 14 of 14 : StorageSlot.sol

```sol
// SPDX-License-Identifier: MIT
// OpenZeppelin Contracts (last updated v4.7.0) (utils/StorageSlot.sol)

pragma solidity ^0.8.0;

/**
 * @dev Library for reading and writing primitive types to specific storage slots.
 *
 * Storage slots are often used to avoid storage conflict when dealing with upgradeable contracts.
 * This library helps with reading and writing to such slots without the need for inline assembly.
 *
 * The functions in this library return Slot structs that contain a `value` member that can be used to read or write.
 *
 * Example usage to set ERC1967 implementation slot:
 * ```
 * contract ERC1967 {
 *     bytes32 internal constant _IMPLEMENTATION_SLOT = 0x360894a13ba1a3210667c828492db98dca3e2076cc3735a920a3ca505d382bbc;
 *
 *     function _getImplementation() internal view returns (address) {
 *         return StorageSlot.getAddressSlot(_IMPLEMENTATION_SLOT).value;
 *     }
 *
 *     function _setImplementation(address newImplementation) internal {
 *         require(Address.isContract(newImplementation), "ERC1967: new implementation is not a contract");
 *         StorageSlot.getAddressSlot(_IMPLEMENTATION_SLOT).value = newImplementation;
```

Şekil 6.10: AGROS Değirmen Akıllı Kontratı Kod Örnekleri



0xe916ec8853...	Burn Auth	64033454	44 days ago	0x4fb7e09B...B9f96CC72	IN	0xb30e0f05...C6997B058	0 POL	0.00557754
0x7834696d6e...	Burn Auth	64033407	44 days ago	0x2A59A1C8...c21a69F05	IN	0xb30e0f05...C6997B058	0 POL	0.00591998
0x1fe4bbe6d9a...	Burn Auth	64033361	44 days ago	0x2A59A1C8...c21a69F05	IN	0xb30e0f05...C6997B058	0 POL	0.00727956
0xdda8191065...	Burn Auth	64033324	44 days ago	0x4fb7e09B...B9f96CC72	IN	0xb30e0f05...C6997B058	0 POL	0.0057495
0xcf4639d8d21...	Burn Auth	64033290	44 days ago	0x4fb7e09B...B9f96CC72	IN	0xb30e0f05...C6997B058	0 POL	0.00554934
0xe66c0fddfd9...	Burn Auth	64033250	44 days ago	0x2A59A1C8...c21a69F05	IN	0xb30e0f05...C6997B058	0 POL	0.00588632
0x971068f3b5f...	Mint Auth	64033177	44 days ago	0x4fb7e09B...B9f96CC72	IN	0xb30e0f05...C6997B058	0 POL	0.00837713
0xb3a27c3ef83...	Mint Auth	64033073	44 days ago	0x2A59A1C8...c21a69F05	IN	0xb30e0f05...C6997B058	0 POL	0.0098871
0xa8b27e4632...	Mint Auth	63152165	66 days ago	0x2A59A1C8...c21a69F05	IN	0xb30e0f05...C6997B058	0 POL	0.00510336
0x2a0b4fbbdfe...	Mint Auth	63152050	66 days ago	0x4fb7e09B...B9f96CC72	IN	0xb30e0f05...C6997B058	0 POL	0.00255873
0x899221662a...	Burn Auth	63151667	66 days ago	0x4fb7e09B...B9f96CC72	IN	0xb30e0f05...C6997B058	0 POL	0.00227213
0xcff8d98cc9c...	Burn Auth	63151650	66 days ago	0x4fb7e09B...B9f96CC72	IN	0xb30e0f05...C6997B058	0 POL	0.00271039
0x2f13c09ff34...	Request Trans...	52973235	326 days ago	0x9651cb9E...A44D38E25	IN	0xb30e0f05...C6997B058	0 POL	0.00341398
0x6a518b8a7b...	Mint Auth	52973109	326 days ago	0x9651cb9E...A44D38E25	IN	0xb30e0f05...C6997B058	0 POL	0.00783536
0xa32e6bbddd...	Mint Auth	52973091	326 days ago	0x46c8e3e1...148FF6CD5	IN	0xb30e0f05...C6997B058	0 POL	0.00421068
0xc8a82bdc6b...	Mint Auth	52972460	326 days ago	0x46c8e3e1...148FF6CD5	IN	0xb30e0f05...C6997B058	0 POL	0.01390423
0x343befbb17c...	Mint Auth	52972449	326 days ago	0x46c8e3e1...148FF6CD5	IN	0xb30e0f05...C6997B058	0 POL	0.01366769
0x9c44e00f7f3...	Mint Auth	52972441	326 days ago	0x46c8e3e1...148FF6CD5	IN	0xb30e0f05...C6997B058	0 POL	0.01333719
0xbd58e26293...	Mint Auth	52972431	326 days ago	0x46c8e3e1...148FF6CD5	IN	0xb30e0f05...C6997B058	0 POL	0.01285303
0xb978276380...	Mint Auth	52972420	326 days ago	0x46c8e3e1...148FF6CD5	IN	0xb30e0f05...C6997B058	0 POL	0.01391723
0xcb0976a717...	Mint Auth	52972405	326 days ago	0x46c8e3e1...148FF6CD5	IN	0xb30e0f05...C6997B058	0 POL	0.0138812
0xe08ddd3635...	Mint Auth	52972382	326 days ago	0x9651cb9E...A44D38E25	IN	0xb30e0f05...C6997B058	0 POL	0.00612877
0x5cd5b177b1...	Mint Auth	52972323	326 days ago	0x9651cb9E...A44D38E25	IN	0xb30e0f05...C6997B058	0 POL	0.00725338
0xcfa9b69d37d...	Mint Auth	52972124	326 days ago	0x9651cb9E...A44D38E25	IN	0xb30e0f05...C6997B058	0 POL	0.00580442

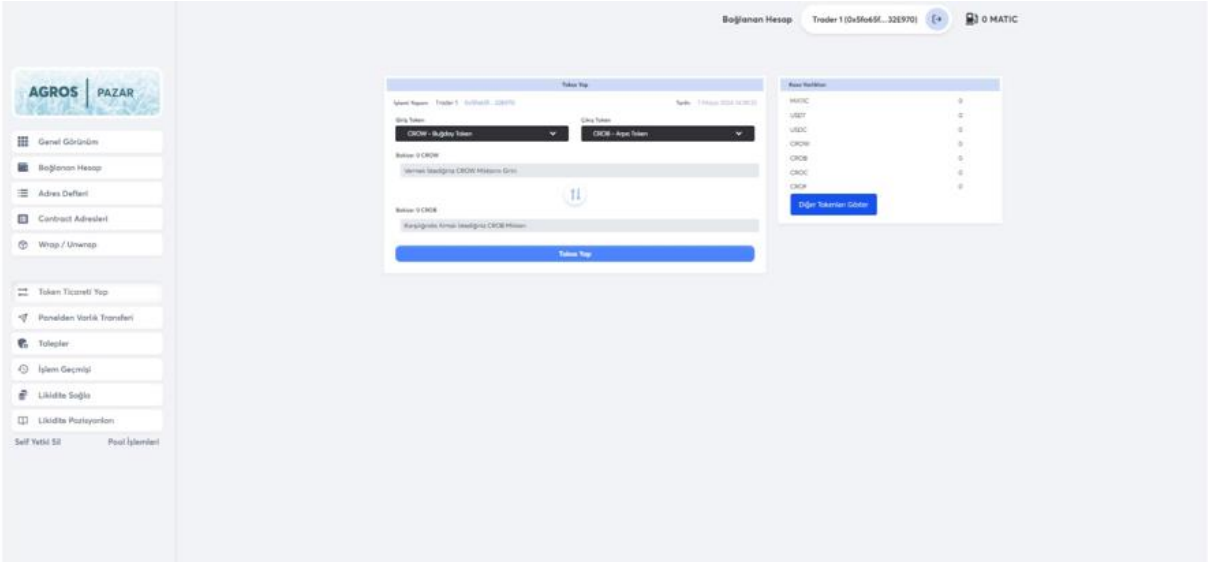
Şekil 6.11: AGROS Değirmen Akıllı Kontratı Örnek İşlem Kayıtları

Şekil 6.10'da bulunan Proxy ve Yetki Kontrol kod blokları ise (TransparentUpgradeableProxy.sol, Ownable.sol), AGROS platformunun güncellenebilirlik ve sahiplik yönetimi altyapısını ortaya koymaktadır. TransparentUpgradeableProxy.sol dosyası, kontratın gelecekte değiştirilmesine izin verirken aynı adres üzerinden kullanıcılarla etkileşim kurmayı sürdürmesini sağlar. Ownable.sol ise sistemin yönetici hesabını tanımlar ve yalnızca bu adresin kritik işlemleri gerçekleştirebilmesine olanak tanır. Bu yapı, yazılım güncellemeleri ve yönetsel kontrolün merkezi bir güvenlik altında yürütülmesine olanak tanımaktadır. Bu şekillerde yer alan proxy ve yetki kontrol dosyaları, sistemin ERC-1967 ve ERC-1822 uyumlu yapı taşları ile oluşturulduğunu göstermektedir. StorageSlot.sol içerisinde tanımlanan veri alanları, blokzincir üzerinde proxy kullanılarak yükseltilebilir kontratlar için gerekli saklama yapısını tanımlar. IERC1967 ve IERC1822, kontrat versiyonlarının güvenli ve takip edilebilir şekilde yükseltilmesini sağlar. Böylece AGROS sisteminin sürdürülebilirliği garanti altına alınmış olur.

Şekil 6.11'de yer alan işlem kayıtları, blokzincir üzerinde gerçekleştirilen Mint Auth ve Burn Auth işlemlerinin geçmişini göstermektedir. Her işlem, kullanıcı cüzdanı, ilgili fonksiyon adı (örneğin: burnAuth) ve gerçekleşme zamanı ile birlikte blok numarası üzerinde kalıcı olarak kaydedilmiştir. Bu yapı sayesinde, fiziksel emtia karşılığında oluşturulan tokenlerin yalnızca belirlenen kullanıcılar tarafından üretildiği ve yakıldığı (burn edildiği) güvenli şekilde izlenebilir hale gelmektedir. AGROS sisteminin bu yönü, tarım ürünlerinin dijital varlıklara dönüştürülmesinde merkeziyetsiz, şeffaf ve denetlenebilir bir yapı ortaya koymaktadır.

6.3.4. Pazar Paneli

Bu panelde, fiziksel tarım ürünlerine endeksli olarak üretilmiş dijital tokenlerin (örneğin Buğday Token – BT, Arpa Token – AT, Mısır Token – MT) yönetim paneli tarafından yetkilendirilmiş kullanıcılar tarafından alım-satımlarının yapılabileceği dış borsa sistemlerine (DEX veya CEX) aktarımı sağlanabilmektedir ve aynı zamanda kripto para borsalarından tokenler geri çekilebilmektedir. Transfer işlemleri, blokzincir ağı üzerinde tanımlı "transferToManager", "requestTransferTokenToTrader" ve "sendTokenToTrader" gibi metodlar aracılığıyla gerçekleştirilmekte ve her bir işlem, ağ üzerinde doğrulanabilir bir şekilde kaydedilmektedir.



Şekil 6.12: AGROS Pazar Paneli

Merkeziyetsiz Borsalar (DEX), herhangi bir merkezi otoriteye bağlı olmayan ve kullanıcıların doğrudan birbirleriyle işlem yapmasına olanak sağlayan platformlardır. DEX borsalarında, tokenlerin alım satımı tamamen kullanıcılar arasında yapılır ve işlemler akıllı kontratlar üzerinden gerçekleşir. Kullanıcılar, kripto cüzdanlarını (Örneğin Metamask gibi) DEX'e bağlar ve işlem yapmak için akıllı sözleşme tarafından belirlenen kurallara göre işlem yaparlar. Bu borsalarda

işlem yapabilmek için genellikle kriptografik imza ve doğrulama gereklidir (Swan, 2015). Merkezi Borsalar (CEX) ise, kullanıcıların alım satım işlemleri için merkezi bir platform tarafından yönetilen düzenlenmiş borsalardır. CEX borsaları, kullanıcıların tokenlerini merkezi bir cüzdanda tutar ve alım satım işlemleri bu platform üzerinden gerçekleştirilir. Kullanıcılar, hesaplarında bulunan tokenleri alıp satmak için borsanın arayüzü üzerinden işlem yaparlar. CEX borsalarında işlem yapmak için genellikle KYC (Know Your Customer) prosedürleri ve kimlik doğrulama işlemleri gereklidir. Özetle, DEX sistemleri, akıllı kontratlar aracılığıyla aracısız takas işlemleri yapılmasına olanak tanırken (Zetzsche ve diğ., 2020), CEX yapıları daha geleneksel borsa mantığıyla çalışır ve kullanıcı fonlarını kendi cüzdanlarında tutarak emir defteri üzerinden alım-satım yapılmasını sağlar (Chen ve Bellavitis, 2020). DEX örnekleri: Uniswap, PancakeSwap, Curve Finance gibi protokollerdir. Bu borsalarda token takasları kullanıcılar arasında doğrudan, akıllı kontratlar aracılığıyla yapılır. CEX örnekleri; Binance, Coinbase, Kraken gibi platformlardır. Bu yapılar emir defteri sistemine dayanır ve kullanıcıların varlıkları önce merkezi cüzdanlara aktarılır, ardından alım-satım yapılır.

AGROS uygulaması, tokenin bir DEX'e transferi, örneğin bir Uniswap benzeri protokolde takas edilebilir hale gelmesini sağlar. Bu, özellikle kırsal yatırımcılar için merkeziyetsiz erişim imkânı tanırken, kurumsal yatırımcılar için ise tokenlerin CEX ortamlarında listelenmesi güvenlik, likidite ve kullanıcı deneyimi açısından genellikle tercih edilebilmektedir. Ayrıca panel aracılığıyla, dış borsalardan bulunan tarım ürünleri tokenleri Pazar paneli cüzdanlarına tekrar geri çekilebilmekte (withdraw), bu işlemler yetkilendirilmiş Pazar paneli kullanıcıları tarafından zincir üstü (on-chain) olarak yönetilebilmektedir.

Bu yapı, AGROS uygulamasının yalnızca tarım emtiasına dayalı bir dijital varlık platformu olmasının ötesine geçerek, küresel dijital varlık piyasalarıyla entegre edilebilir, ticari olarak dolaşıma girebilir ve yatırımcı kitlesiyle etkileşime açık hale getirildiğini göstermektedir.

Tokenlerin, yönetim paneli üzerinden yetkilendirilmiş kullanıcılar tarafından DEX ve CEX borsalarına transfer edilmesi, genellikle token yönetim sistemleri ve kripto para cüzdan entegrasyonu kullanılarak yapılır. Bu süreçte, yönetim paneli üzerinden kullanıcılar belirli izinlere sahip olur ve yalnızca yetkili kullanıcılar tokenleri transfer edebilir. Tokenler, ilgili borsaya aktarılmadan önce genellikle transfer onayı gerektirir ve bu süreç, güvenliği sağlamak için multisig (çoklu imza) sistemleriyle desteklenebilir. Multisig, işlem için birden fazla onay gerektiren bir güvenlik özelliğidir ve token transferleri için ek güvenlik katmanları sağlar (Swan, 2015). Tokenlerin kripto para borsalarından geri çekilmesi işlemi ise, genellikle çekim adresi belirlenerek yapılır. Borsada bulunan tokenler, kullanıcının belirlediği cüzdan adresine transfer edilir. Bu işlem

için, borsa platformları genellikle güvenlik amacıyla iki faktörlü kimlik doğrulama (2FA) ve çekim onayı gereksinimlerini uygular. Bu yöntem, kullanıcıların hesaplarının güvenliğini sağlamaya yardımcı olur ve istenmeyen çekim işlemlerini engeller (Swan, 2015).

Merkeziyetsiz borsalar, DEX (Decentralized Exchange) olarak anılmakta ve DeFi (Decentralized Finance), merkeziyetsiz finans standartlarına göre işlem yapmaktadırlar (Swan, 2015). Tokenlerin aynı zamanda CEX'ler tarafından da yani merkezi kripto para borsaları tarafından da ticaretleri, alım- satımları yapılabilir. Emtiaya dayalı BT, AT ve MT vb. Tarım Ürünleri Tokenleri bir defa "Pazar Paneli" üzerinden piyasaya çıkartıldıklarında artık kendi hayatlarına başlamış olmaktadırlar. Bu tokenlerin kaynağı blokzincir olarak kalacak, ancak her gün başka başka kullanıcıların blokzincir cüzdanlarına transfer edilebileceklerdir. Tarım Ürünleri Tokenlerinin toplam sayısı itfa edilmedikleri müddetçe, varlığa dayalı olma özelliklerinden dolayı arkasındaki dayanak varlık yani tarımsal ürün arzı arttıkça, artacak ve sürekli olarak akıllı kontratları içinden izlenebileceklerdir. Bir token itfa (burn) edildiğinde ise artık alınıp satılabilir olmaktan çıkmış demektir. Örneğin, bir ton buğdaya karşılık gelen tokenlerin itfa edilmesi, sistem akışı içinde buğdayların depodan çıkarılıp, örneğin un olarak gıdaya dönüştürülmelerine karar verilmişse gerçekleşmektedir. Tokenlerin itfa (burn) edilmesi için "Pazar Paneli" kullanıcısı tokenlerin listelendiği kripto para borsalarından ilgili miktar tokeni "AGROS Pazar Paneli Cüzdanı"na geri çeker ve sonrasında tokenleri "Değirmen Paneli"' cüzdanına aktararak itfa işlemi "Değirmen Paneli Kullanıcısı" tarafından yapılmaktadır.

AGROS platformu tasarlanırken blokzincir felsefesine uygun bir tasarım yapılmıştır. Blokzincirin değiştirilemez "immutable" bir yapıda olması her ne kadar denetlenebilirlik ve şeffaflık açısından çarpıcı bir avantaj sunsa da olası insan kaynaklı veya makine kaynaklı hatalar için protokoller belirlenmiştir. Ayrıca tüm işlemlerin çoklu blokzincir imzalarından geçerek sağlandığı bu yapıda tüm işlemleri onaylayan veya reddeden cüzdan sahipleri görüntülenebilir. Tüm işlemler için belirlenen farklı yetki seviyelerine sahip imza yetkileri blokzincir üzerinde bulunur. Böylelikle insan kaynaklı hatalar en aza indirilir. Bir işlem geri alınamaz ve silinemez ancak iptal için tersi bir işlem yapılabilir. Örneğin, fazla üretilen BT, sonraki işlemde imha edilebilir. Tüm bu işlemler blokzincir yazılımının doğası gereği silinemez ve herkes tarafından görüntülenir. Tarım ürünleri tokenleri üretilmeden önce kontroller yapılır, Depo Rezerv Belgesi verisi dijital ve analog olarak kontrol edilir. Ayrıca aynı Depo Rezerv Belgesi karşılığında birden fazla tarım ürünleri tokenleri üretimi yazılımsal olarak engellidir.

Pazar Paneli'nin süreç ve işlemleri aynı zamanda blokzincir ağı'nda da "Pazar akıllı kontratı" ile yürütülmekte ve yönetilmektedir. Yani pazar paneli işlemleri, blokzincir ağına deploy ve verify

edilmiş yönetici akıllı kontratı ile işletilmektedir ve işlem kayıtları blokzincir ağında oluşmaktadır. Şekil 6.13, Şekil 6.14 ve Şekil 6.15'te, Pazar akıllı kontratı"nın metodları, kod örnekleri ve blokzincir ağında oluşturulan pazar paneli işlem örnek kayıtları gösterilmektedir. Şekil 6.13'te yer alan authorized, isAuthorized, greenList, addToGreenlist, removeFromGreenlist, removeSelf, addAuthorized gibi fonksiyonlar, sistem kullanıcılarının rollerini ve erişim seviyelerini yöneten yetkilendirme mekanizmalarını temsil eder. Bu işlemler sayesinde sadece belirli kullanıcılar transfer veya ticaret işlemlerini gerçekleştirebilir.

Şekil 6.14'te yer alan Akıllı kontrat Ownable.sol modülü ile yönetici rolleri sınırlandırılmış ve değiştirilebilir hale getirilmiştir (bkz. changeManager). Paneldeki fonksiyonlar arasında yer alan transferTokenToManager, transferCommodityTokenToMill, transferCommodityTokenToThirdParty, requestTransferETHToManager, requestTransferTokenToGreenlist gibi işlemler, tokenlerin sistem içinde ve dışında hareketini sağlar. Bunlar, kullanıcıların tokenleri dış DEX/CEX borsalarına transfer etmesine, trader'lar arasında gönderim yapmasına ve üçüncü taraflara aktarmasına imkân tanır. İşlemler, blokzincirde doğrulanabilir şekilde kalıcı olarak saklanır. mintNewPosition, increaseLiquidityCurrentRange, decreaseLiquidity, collectAllFees, swapExactInputSingle, swapExactInputMultihop gibi fonksiyonlar, kullanıcının Uniswap benzeri otomatik piyasa yapıcı (AMM) sistemlerde likidite sağlamasına, token takası yapmasına ve bu işlemlerden elde edilen işlem ücretlerini toplamasına olanak tanır. Bu işlemler, ERC-721 tabanlı pozisyonlar ile temsil edilir. Özellikle mintNewPosition işlemleri likidite katkısını başlatırken, collectAllFees işlemleri kullanıcıya geri ödeme sağlar.





Şekil 6.13: AGROS Pazar Akıllı Kontratı Metodları

File 1 of 14 : TransparentUpgradeableProxy.sol

```sol
// SPDX-License-Identifier: MIT
// OpenZeppelin Contracts (last updated v4.8.3) (proxy/transparent/TransparentUpgradeableProxy.sol)

pragma solidity ^0.8.0;

import "../ERC1967/ERC1967Proxy.sol";

/**
 * @dev Interface for {TransparentUpgradeableProxy}. In order to implement transparency, {TransparentUpgradeableProxy}
 * does not implement this interface directly, and some of its functions are implemented by an internal dispatch
 * mechanism. The compiler is unaware that these functions are implemented by {TransparentUpgradeableProxy} and will not
 * include them in the ABI so this interface must be used to interact with it.
 */
interface ITransparentUpgradeableProxy is IERC1967 {
    function admin() external view returns (address);

    function implementation() external view returns (address);

    function changeAdmin(address) external;

    function upgradeTo(address) external;

    function upgradeToAndCall(address, bytes memory) external payable;
}

```

File 2 of 14 : Ownable.sol

```sol
// SPDX-License-Identifier: MIT
// OpenZeppelin Contracts (last updated v4.7.0) (access/Ownable.sol)

pragma solidity ^0.8.0;

import "../utils/Context.sol";

/**
 * @dev Contract module which provides a basic access control mechanism, where
 * there is an account (an owner) that can be granted exclusive access to
 * specific functions.
 *
 * By default, the owner account will be the one that deploys the contract. This
 * can later be changed with {transferOwnership}.
 *
 * This module is used through inheritance. It will make available the modifier
 * `onlyOwner`, which can be applied to your functions to restrict their use to
 * the owner.
 */
abstract contract Ownable is Context {
    address private _owner;

    event OwnershipTransferred(address indexed previousOwner, address indexed newOwner);

    /**
```

File 3 of 14 : draft-IERC1822.sol

```sol
// SPDX-License-Identifier: MIT
// OpenZeppelin Contracts (last updated v4.5.0) (interfaces/draft-IERC1822.sol)

pragma solidity ^0.8.0;

/**
 * @dev ERC1822: Universal Upgradeable Proxy Standard (UUPS) documents a method for upgradeability through a simplified
 * proxy whose upgrades are fully controlled by the current implementation.
 */
interface IERC1822Proxiable {
    /**
     * @dev Returns the storage slot that the proxiable contract assumes is being used to store the implementation
     * address.
     *
     * IMPORTANT: A proxy pointing at a proxiable contract should not be considered proxiable itself, because this risks
     * bricking a proxy that upgrades to it, by delegating to itself until out of gas. Thus it is critical that this
     * function revert if invoked through a proxy.
     */
    function proxiableUUID() external view returns (bytes32);
}
```

File 4 of 14 : IERC1967.sol

```sol
// SPDX-License-Identifier: MIT
// OpenZeppelin Contracts (last updated v4.8.3) (interfaces/IERC1967.sol)

pragma solidity ^0.8.0;

/**
 * @dev ERC-1967: Proxy Storage Slots. This interface contains the events defined in the ERC.
 *
 * _Available since v4.9._
 */
interface IERC1967 {
    /**
     * @dev Emitted when the implementation is upgraded.
     */
    event Upgraded(address indexed implementation);

    /**
     * @dev Emitted when the admin account has changed.
     */
    event AdminChanged(address previousAdmin, address newAdmin);

    /**
     * @dev Emitted when the beacon is changed.
     */
    event BeaconUpgraded(address indexed beacon);
```

File 12 of 14 : Address.sol

```sol
// SPDX-License-Identifier: MIT
// OpenZeppelin Contracts (last updated v4.8.0) (utils/Address.sol)

pragma solidity ^0.8.1;

/**
 * @dev Collection of functions related to the address type
 */
library Address {
    /**
     * @dev Returns true if `account` is a contract.
     *
     * [IMPORTANT]
     * ====
     * It is unsafe to assume that an address for which this function returns
     * false is an externally-owned account (EOA) and not a contract.
     *
     * Among others, `isContract` will return false for the following
     * types of addresses:
     *
     *  - an externally-owned account
     *  - a contract in construction
     *  - an address where a contract will be created
     *  - an address where a contract lived, but was destroyed
     * ====
```

Şekil 6.14: AGROS Pazar Akıllı Kontratı Kod Örnekleri



Şekil 6.15: AGROS Pazar Akıllı Kontratı Örnek İşlem Kayıtları

Şekil 6.14’te, Solidity dosyalarında görülen TransparentUpgradeableProxy.sol, IERC1822.sol, IERC1967.sol ve StorageSlot.sol dosyaları, AGROS akıllı kontratlarının yükseltilebilir (upgradeable) yapıda tasarlandığını göstermektedir. Bu yapı sayesinde sistem, kontratı yeniden dağıtmadan iş mantığını güncelleyebilir. upgradeTo, changeAdmin ve proxyUUID() gibi fonksiyonlar, sistemin sürdürülebilirliğini ve uzun ömürlü mimarisini desteklemektedir. Şekil 6.15’te yer alan işlem geçmişi (örneğin mintNewPosition, collectAllFees, decreaseLiquidity, requestTransferTokenToManager) işlemleri, farklı kullanıcı cüzdanlarının kontratla etkileşimini göstermektedir. Her işlemin karşısında işlem türü, blok numarası, tarih, işlem tutarı ve karşı taraf adresi yer almakta; bu da AGROS uygulamasının yüksek düzeyde izlenebilirliğe ve şeffaflığa sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Uygulama sürecinin ardından, yazılım sürekli olarak test edilmiştir ve iyileştirimiştir. Iteratif geliştirme ve sürekli iyileştirme yöntemleri uygulanarak, yazılımın güvenliği ve performansı artırılmıştır. Sistem üzerindeki potansiyel hatalar tespit edilmekte ve iyileştirmeler yapılmaktadır. Özellikle, blokzincir projelerinde, güvenlik açıklarının tespit edilip düzeltilmesi kritik bir önem taşımaktadır (Ozturk, 2022). Ayrıca, sistemin ölçeklenebilirliği ve uzun vadeli sürdürülebilirliği sağlanmaktadır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu doktora tezinde geliştirilen "Blokzincir Teknolojisi ile Tarım Ürünleri için Bir Tokenizasyon Tasarımı ve Uygulaması: Türkiye Örneği", fiziksel varlıklara dayalı tarımsal emtianın dijitalleştirilerek blokzincir üzerinde temsili, ticarileştirilmesi ve takip edilebilirliğinin sağlanmasını hedefleyen, teorik altyapısı ve yazılımsal uygulaması detaylandırılmış bir model sunmaktadır. Bu çalışma, hem blokzincir tabanlı yazılım geliştirme pratiğine hem de tarım ekonomisi ve dijital finans alanlarına çift yönlü katkı sunmaktadır. Bu çalışma, blokzincir teknolojisinin tarım sektöründe varlığa dayalı tokenizasyon uygulamaları ile bütünleşmesini Türkiye örneğinde sistematik bir biçimde ele almış hem teorik hem uygulamalı düzeyde kapsamlı bulgular sunmuştur.

Dwivedi ve diğ. (2021) tarafından ortaya konulan blokzincirin tedarik zinciri şeffaflığı ve güvenlik avantajları, bu tezde tarımsal ürünlerin izlenebilirliğine ve güvenli ticaretine yönelik geliştirilen AGROS sistemiyle somutlaştırılmıştır. Bu bağlamda, tarım ürünleri için oluşturulan tokenler aracılığıyla her aşamanın blokzincire kaydedilmesi, Luo ve diğ. (2019) ve Liu ve diğ. (2019) çalışmalarında vurgulanan “değiştirilemez kayıt” ve “akıllı sözleşme tabanlı işlem güvenliği” ilkeleriyle örtüşmektedir. Bu tez tarım odaklı uygulama ile sektörel özelleştirmeyi ve saha tabanlı bir uygulama örneğini literatüre kazandırmıştır.

Blokzincir Teknolojisi ile Tarım Ürünleri için Bir Tokenizasyon Uygulaması: Türkiye Örneği; mevcut kriptoparalar ve NFT’lerden farklı olarak, gerçek dünya varlığına dayalı fiziksel tokenlerden emtia tokenleri gerçek dünyada karşılığı olan tarımsal ürünleri (Buğday, Arpa, Mısır, Fındık vb.) Ethereum blokzincir ağında ERC-20 formatında akıllı kontratlar aracılığı ile tokenizasyonu (mint edilmesi), gerektiğinde itfa (burn) edilmesi, tanımlanan yetkilendirilmiş kripto varlık cüzdanlarına transfer edilmesi ve bu işlemler ile ilgili kapsamlı blokzincir işlem raporlarının alınması vb. süreçlerini yerine getiren bir uygulamadır.

Nayal ve diğ. (2021) çalışmasındaki tarım tedarik zinciri risk yönetiminde yapay zekâ ve dijital teknolojilerin kullanımına ilişkin bulguları, bu tezde blokzincir tabanlı finansman mekanizmalarının kriz dönemlerinde çiftçilerin sermayeye erişiminde sağladığı hız ve maliyet avantajları ile desteklenmiştir. Wamba ve diğ. (2021) belirttiği üzere, blockchain-fintech birleşimi tedarik zincirlerini dönüştürme potansiyeline sahiptir; bu tez çalışması ise bu potansiyelin tarım sektöründe nasıl somut çıktılara dönüştürülebileceğini göstermektedir.

Tez çalışmasında ele alınan araştırma problemi ve literatüre katkısı açısından, tarım sektöründe

öne çıkan temel sorunlar; finansmana erişimdeki güçlükler, ürün izlenebilirliği eksikliği, fiyat dalgalanmaları, aracı yapıların baskısı ve veri eksenli karar alma mekanizmalarının zayıflığı şeklinde özetlenebilir (OECD, 2020). Literatürde tokenizasyon kavramı, daha çok finansal varlıkların dijitalleştirilmesi üzerinden ele alınırken, bu tez tarım sektörü özelinde gerçek dünya varlıklarının tokenizasyonuna öncülük ederek önemli bir bilimsel boşluğu doldurmaktadır.
Tez kapsamında geliştirilen model, ERC-20 standardında akıllı kontratlar aracılığıyla tarımsal emtianın tokenize edilmesini, bu tokenlerin hisse ispatına dayalı bir blokzincir ağında kayıt altına alınmasını ve şeffaf bir şekilde izlenmesini sağlamıştır. Multisig yapısı, sistemdeki karar alma süreçlerini güvenli hale getirirken, modüler mimarisi sistemin genleşetilebilirliğine zemin oluşturmaktadır.

Bu çalışma ayrıca Wang ve diğ. (2019) çalışmasındaki blokzincir ağlarının performans ve ölçeklenebilirliğine yönelik değerlendirmelerini doğrular nitelikte, tarımsal ürün tokenizasyonunun karşılaşabileceği teknik zorlukları, işlem maliyetlerini ve regülasyon eksikliklerini kapsamlı biçimde tartışmıştır.

Bu çalışmada geliştirilen kavramsal tasarım, literatürde blokzincir mimarisi, konsensüs algoritmaları, tokenizasyon süreçleri ve tarımsal tedarik zinciri dijitalleşmesi üzerine yapılan çalışmaların bulgularıyla uyumlu olacak şekilde tasarlanmıştır. Modelin temel özellikleri şunlardır:

- **Ethereum Blokzincirinde İşlem Süreci:** Literatürde belirtildiği (Buterin, 2014; Wood, 2017) üzere, Ethereum ağı akıllı sözleşmelerin çalıştırılabildiği dağıtık bir defter teknolojisidir. X kişisinin Y kişisine Ethereum ağını kullanarak cüzdan üzerinden para göndermesi durumunda işlem, ağdaki tüm düğümlere (node) yayınlanır. Bu düğümler işlemleri bloklara toplar ve "Proof of Stake" (Hisse İspatı) konsensüs mekanizması ile doğrulama sürecini yürütür. PoS algoritması, literatürde de vurgulandığı gibi (King ve Nadal, 2012), enerji verimliliği ve ağ güvenliği açısından geleneksel Proof of Work'e kıyasla avantaj sağlamaktadır.
- **Dağıtık ve Değiştirilemez Kayıt Yapısı:** Bloklar zincir yapısında "pointer" referansları ile birbirine bağlanır ve ağdaki %51'den fazla doğrulayıcının mutabakatı ile blokzincire eklenir (Narayanan ve diğ., 2016). Bu yapı, literatürde tanımlanan "immutability" ilkesine uygun olarak verilerin değiştirilmesini veya silinmesini teknik olarak imkânsız kılar.
- **Hisse İspatı Konsensüs Mekanizması:** PoS algoritması, doğrulayıcıların sahip oldukları token miktarına göre blok üretme hakkı kazanmalarını sağlar. Bu durum, literatürdeki bulgularla uyumlu olarak, ağın istikrarını ve saldırılara karşı direncini artırmaktadır.

  AGROS – Agriculture Operating System: Literatürde tarım tedarik zinciri dijitalleşmesi üzerine yapılan çalışmalarda belirtildiği gibi, blokzincir tabanlı platformlar süreç şeffaflığı,

izlenebilirlik ve güven sağlar. AGROS, üç ana panelden oluşur:

1. **Yönetim Paneli:** Kullanıcı rolleri ve yetkilendirmelerin yönetildiği, kara/beyaz liste uygulamaları ile güvenlik sağlanan ve kritik raporların alınabildiği yönetim katmanı.
2. **Değirmen Paneli:** Depolardaki ürün bilgilerinden ERC-20 formatında token üretimi yapan panel. Bu panel, literatürdeki "asset-backed token" uygulamalarına (Catalini ve Gans, 2020) doğrudan bir örnek teşkil etmektedir.
3. **Pazar Paneli:** Merkezi ve merkeziyetsiz borsalar (CEX ve DEX) ile entegrasyonu sağlayan, token transferleri ve geri çekme işlemlerinin yapıldığı modül.

- **Sistem Bileşenleri:** Web tabanlı ön yüz, arka yüz, akıllı sözleşmeler, kripto cüzdan entegrasyonu ve çoklu imza yapıları literatürdeki güvenlik ve kullanıcı kimlik doğrulama önerileri ile uyumludur (Christidis ve Devetsikiotis, 2016).
- **Tarımsal Emtia Token Üretim Süreci:** Literatürde gıda tedarik zincirlerinde blokzincir kullanımı (Tian, 2016) üzerine yapılan çalışmalarda vurgulandığı gibi, üretimden tüketime kadar her aşamanın dijital olarak kaydı şeffaflığı ve güveni artırır. AGROS sürecinde bu üretim dört adımda gerçekleşmektedir:
  1. Tarımsal ürünlerin fatura karşılığı satın alınması ve güvenli depoya ulaştırılması.
  2. Ürünlerin bağımsız laboratuvar testleri ile kalite sınıflandırmasına tabi tutulması.
  3. Depo Rezerv Belgesi'nin tekil ID ve ürün özellikleri ile oluşturulması ve AGROS veri tabanına kaydedilmesi.
  4. Belgenin OCR teknolojisiyle dijitalleştirilmesi ve özet bilgilerinin blokzincire akıllı sözleşmeler aracılığıyla yazılması.

Bu tasarım, literatürdeki blokzincir tabanlı tarım projeleriyle (IBM Food Trust, 2019) kıyaslandığında hem teknik mimarisi hem de tokenizasyon süreciyle Türkiye'ye özgü hukuki, ekonomik ve operasyonel gereksinimlere göre uyarlanmış özgün bir model ortaya koymaktadır.

Tez kapsamında geliştirilen AGROS (Agriculture Operating System) uygulaması, literatürde blokzincir tabanlı tarımsal tedarik zinciri platformlarına benzer şekilde, yönetici paneli, değirmen paneli ve pazar panelinden oluşan bütüncül ve modüler bir yazılım mimarisi sunmaktadır.
Bu paneller sayesinde:

- **Fiziksel tarımsal varlıkların dijital temsili:** Depolarda muhafaza edilen tarımsal ürünler, "Depo Rezerv Belgesi" temel alınarak dijital varlıklara dönüştürülmektedir. Bu yaklaşım, literatürde **varlık destekli tokenizasyon (asset-backed tokenization)** modelleri (Catalini ve Gans, 2020) ile uyumlu olup, fiziksel emtianın blokzincir üzerinde güvenli, şeffaf ve izlenebilir bir şekilde temsil edilmesini sağlamaktadır.

- **Token transferleri ve borsa entegrasyonu:** Üretilen tokenler, kullanıcı cüzdanlarına transfer edilebilmekte ve hem merkezi (CEX) hem de merkeziyetsiz (DEX) borsalarla entegrasyon sağlanabilmektedir. Bu özellik, literatürde blokzincir tabanlı tarım projelerinin (Provenance, IBM Food Trust) global ticaretle entegrasyon potansiyeli açısından kritik bir unsur olarak tanımlanmıştır (Tian, 2016).
- **Token basımı ve itfası:** ERC-20 uyumlu tokenlerin **mint** ve **burn** işlemleri, akıllı sözleşmeler aracılığıyla blokzincir üzerinde yürütülmektedir. Bu sayede token arzının yönetimi, literatürde vurgulanan (Christidis ve Devetsikiotis, 2016) **şeffaflık** ve **değiştirilemezlik** ilkelerine uygun olarak izlenebilir hale gelmektedir.

Kullanıcı dostu arayüzler, akıllı sözleşme tabanlı yönetim yapısı, likidite ekleme ve token takas (swap) özellikleri, sistemin **değer zinciri boyunca etki alanını genişletmiştir**. Bu mimari yapı, literatürde önerilen (Saberi ve diğ., 2019) **uçtan uca izlenebilirlik ve piyasa erişimi** ilkelerini somut olarak hayata geçirmektedir.

Geliştirme sürecinde karşılaşılan başlıca sorunlar ve çözümler:

- **Belge formatlarının standardizasyonu:**
  Blokzincir ağına entegre edilecek depo rezerv belgelerinin format çeşitliliği, sistem entegrasyonu için uyum sorunları yaratmıştır. Bu problem, literatürde önerilen **belge standardizasyon protokolleri** dikkate alınarak çözümlenmiş ve veri formatları tekilleştirilmiştir.
- **Belgelerin dijitalleşmesinde veri tutarlığı sorunları:**
  Belgelerin, OCR (Optik Karakter Tanıma) teknolojisi ile dijital ortama aktarılması sırasında tutarlılık ve doğruluk sorunları yaşanmıştır. Literatürde tavsiye edilen **blokzincir destekli veri doğrulama** yöntemleri entegre edilerek bu sorun minimize edilmiştir.
- **Çok katmanlı onay mekanizmalarının yönetimi:**
  Kullanıcı yetkilendirme sürecinde, rol bazlı erişim kontrolü modeli kullanılmış ve akıllı sözleşmelerle entegre edilmiştir. Proxy tabanlı sözleşme yapıları ile sistemin ölçeklenebilirliği ve bakım kolaylığı artırılmıştır.

Bu mimari hem tarımsal tedarik zincirlerinin dijitalleşmesine hem de Türkiye'de blokzincir tabanlı varlık tokenizasyonu alanına **uyarlanabilir, ölçeklenebilir ve güvenilir** bir altyapı kazandırmaktadır.

Blokzincir Teknolojisi ile Tarım Ürünleri için Bir Tokenizasyon Tasarımı ve Uygulaması: Türkiye Örneği çalışmasının temel avantajları; **merkezi olmayan (decentralized) dağıtık yapısı**, **yüksek güvenlik**, **düşük manipülasyon riski**, **veri doğruluğu**, **değişmezlik (immutability)**, **şeffaflık**, **anonimlik**, **düşük işlem maliyeti** ve **hızlı işlem onayı** olarak sıralanabilir. Literatürde de vurgulandığı üzere (Nakamoto, 2008; Tapscott ve Tapscott, 2018) blokzincir, merkezi bir otoriteye ihtiyaç duymadan güvenli, doğrulanabilir ve izlenebilir işlem süreçleri sunması nedeniyle tarım gibi yüksek tedarik zinciri karmaşıklığına sahip sektörlerde önemli bir yenilikçi teknoloji olarak öne çıkmaktadır.

Bu sistemin sunduğu temel **değer önerileri** şunlardır:

- **7/24 tarımsal emtia ticareti** yapılabilecek açık bir dijital pazar yeri oluşturulması,
- **Küresel tarım tokeni standardı**nın geliştirilmesi,
- **Tarımsal ticaretin demokratikleşmesi** ile küçük üreticilerin de finansal piyasalara erişiminin sağlanması,
- **Vadeliler dahil olmak üzere türev işlemlerin** emtia tokenleri ile yapılabilmesi,
- **Likiditenin artırılması** ve tokenlerin hızlı el değiştirebilmesi,
- **Tarımsal ürün yatırımlarının erişilebilirliğinin artması**,
- **Yurt içi ve yurt dışı ticaretin kolaylaştırılması** amacıyla akıllı sözleşmeler üzerinden tarım ürünü alım-satım anlaşmalarının yapılabilmesi.

Literatürde *yıkıcı teknoloji (disruptive technology)* kavramı, blokzincirin mevcut geleneksel iş modellerini dönüştürücü etkisini açıklamak için uygun bir çerçeve sunmaktadır. Blokzincir mimarisi, **merkezi yapılardan dağıtık yapılara geçişi**, **akıllı sözleşmeler aracılığıyla çoklu doğrulayıcı mekanizmalarının işletilmesini** ve bu sayede **aracı kurumların ortadan kaldırılmasını** mümkün kılmaktadır (Buterin, 2014; Mougayar, 2016).

Bunun yanında, blokzincir yapısındaki her bir bloğun **dağıtık çoklu noktalarda kopyalanması** ve **değiştirilemez (tamper-proof)** yapısı, manipülasyon risklerini minimize eden **otonom bir güvenlik katmanı** oluşturmaktadır (Yli-Huumo ve diğ., 2016). Bu özellikleri sayesinde, blokzincir sadece finans sektöründe değil, gıda tedarik zincirleri, uluslararası ticaret (Saberi ve diğ., 2019) ve tarımsal lojistik gibi alanlarda da yenilikçi çözümler sunmaktadır.

Tez kapsamında geliştirilen uygulama, **Web tabanlı teknolojiler** ve **Ethereum blokzincir ağı** üzerinde çalışan **akıllı sözleşmeler** ile inşa edilmiştir. Bu mimari içinde, tarımsal ürünlerin tokenleştirilerek finansal değere dönüştürülmesi, literatürde "real-world asset tokenization" olarak tanımlanan yapının tarım sektöründeki bir örneğini oluşturmaktadır (Catalini ve Gans, 2020).

Özellikle, **Multisig (Çoklu İmza)** yapısının entegrasyonu sayesinde, sistem içinde başlatılan işlemler yalnızca çoklu onay imzaları ile finalize edilebilmekte, böylece hem **işlem güvenliği** hem de **yetkilendirme kontrolü** üst düzeye çıkarılmaktadır. Bu yaklaşım, literatürde güvenlik ve yönetişim mekanizmalarının güçlendirilmesi için önerilen en iyi uygulamalardan biri olarak kabul edilmektedir (Gervais ve Wüst, 2018).

Bu çalışmada geliştirilen uygulamanın temel amacı, **buğdaydan başlayarak tarım kökenli emtiaya dayalı tokenlerin**, blokzincir mimarisi içinde **akıllı sözleşmeler** (smart contracts) kullanılarak yeni bir **finansal varlık sınıfı** oluşturmasını sağlamaktır. Bu yaklaşım, literatürde "Real-World Asset Tokenization" (Catalini ve Gans, 2020; Chen ve Bellavitis, 2020) olarak adlandırılan yapının tarımsal emtia piyasalarına uygulanmış bir örneğini temsil etmektedir. Böylelikle blokzincir teknolojisinin sağladığı **şeffaf**, **merkeziyetsiz** ve **sınırlar ötesi değer transferi** imkanının, tarım endüstrisine entegre edilmesi hedeflenmiştir.

Tarımsal emtia, insan beslenmesinde vazgeçilmez bir gıda kaynağı olmasının ötesinde, **stratejik bir ekonomik ve politik araç** niteliği taşımaktadır. Literatürde de belirtildiği gibi, tarımsal ürünlerin üretim ve ticareti, küresel gıda güvenliği, jeopolitik dengeler ve ekonomik kalkınma açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle buğday gibi temel gıda ürünlerinin ihracatı veya ihracatının kısıtlanması, birçok durumda uluslararası ilişkilerde stratejik bir koz olarak kullanılabilmektedir.

Bu sistem kapsamında üretilen **Tarımsal Emtia Tokenleri**, küçük yatırımcıdan kurumsal yatırımcıya kadar geniş bir kullanıcı kitlesine, **düşük bariyerlerle** ve **24/7 erişim imkânı** ile tarım ürünlerine yatırım yapma olanağı sunmaktadır. Bu, geleneksel emtia borsalarının işlem saatleri ve coğrafi sınırlamalarını aşarak tarım ürünlerine erişimi demokratikleştirmektedir (Mougayar, 2016).

Tokenizasyon platformunun ölçeklenebilir yapısı sayesinde, buğday, arpa, mısır gibi dünya hububat ticaretinin %90'ından fazlasını oluşturan ürünlere ek olarak, ülkemizin küresel üretimde %70'in üzerinde paya sahip olduğu **fındık** gibi stratejik ürünler ve uzun raf ömrüne sahip **ayçiçeği tohumu, kuru kayısı, kabuklu Antep fıstığı, fasulye, pamuk, mercimek, nohut, zeytin, çeltik, soya fasulyesi, tritikale, çavdar, keten tohumu, yulaf** gibi ürünler de tokenleştirilebilecektir. Her bir ürün için blokzincir altyapısında oluşturulan **akıllı sözleşmeler**, depolarda uygun koşullarda muhafaza edilen tarımsal ürünlerin dijital izdüşümünü güvenli biçimde kayıt altına almakta ve bunları yatırım aracına dönüştürmektedir. Böylece, *Tarım Ürünleri için Bir*

Tokenizasyon Tasarımı ve Uygulaması: Türkiye Örneği çalışması **ölçeklenebilir**, **ürün çeşitliliğine açık** ve **uluslararası uyumlu** bir yapıda tasarlanmıştır.

Regülasyon açısından; kripto varlıkların yatırım araçları arasındaki yasal konumu, Türkiye'de 02 Temmuz 2024 tarihinde **6362 sayılı Sermaye Piyasası Kanunu** kapsamında yapılan güncellemeyle tanımlanmıştır. Bu düzenleme, ilk aşamada Türkiye'de faaliyet gösteren kripto varlık borsalarının lisanslanmasına odaklanmış, 19 Eylül 2024 tarihli **SPK Bülteni** ile de ek düzenlemeler getirilmiştir. Bu bağlamda, tarımsal ürünlerin tokenizasyonu, **emtia kategorisinde** değerlendirilmekte ve ilgili ticaret ile denetim süreçleri, T.C. Ticaret Bakanlığı ve T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı gibi kurumların yetki alanına girmektedir. Avrupa Birliği'nde ise **Markets in Crypto-Assets (MiCA)** düzenlemesi kapsamında, gerçek dünya varlıklarını temsil eden kripto varlıklar "**Asset-Referenced Tokens**" kategorisinde tanımlanmış ve düzenleyici çerçeveye tabi tutulmuştur (European Commission, 2023). Bu durum, geliştirilen sistemin hem ulusal hem de uluslararası piyasalarda **mevzuata uyumlu** bir şekilde çalışabilmesine olanak sağlamaktadır.

Gerçek dünya varlıklarının tokenizasyonu (Real-World Asset Tokenization, RWA), blokzincir teknolojisinin en hızlı gelişen ve farklı sektörlerde uygulanabilen alanlarından biridir (Catalini ve Gans, 2020; Schär, 2021). Ancak, oluşturulan tokenlerin güvenliği, dağıtımı ve miktar-niteliksel olarak gerçek dünyada bir temsiliyeti olup olmadığı hususlarını denetleyen hem blokzincir altyapısındaki kayıtların hem de fiziksel dünyadaki varlıkların eşleştirilmesini sağlayan bağımsız ve yasal bir gözetim mekanizması gerek Türkiye'de gerekse küresel ölçekte hâlen olgunlaşma aşamasındadır (European Commission, 2023; Deloitte, 2023).

Mevcut durumda, yatırımcı sayısı sınırlı kalan ve geniş yatırımcı tabanına erişemeyen merkezi tarımsal emtia borsalarının yapısı, tarım ürünlerinde gerçek, adil ve hakkaniyetli fiyatların oluşmasını engellemektedir. Piyasa koşullarının zorlaştığı dönemlerde, likiditeye erişimi kısıtlı olan çiftçiler ve üreticiler, ürünlerini peşin ödeme karşılığı büyük hacimlerle satın alan sınırlı sayıdaki tüccar ve sermaye sahiplerine bağımlı kalabilmekte; bu durum, fiyat farklarından yüksek rant elde edilmesine yol açabilmektedir. Blokzincir tabanlı tarımsal emtia tokenleri sayesinde yatırımcı kitlesinin genişletilmesi ve tabana yayılması, sermayeye erişimin demokratikleşmesi anlamına gelmektedir. Bu yapı, üreticilerin yalnızca yerel değil, küresel yatırımcı portföyüne erişebilmesini sağlayarak fiyat oluşumunu daha şeffaf, rekabetçi ve piyasa koşullarına uygun hale getirebilir.

Türkiye ve bölge ülkeleri (Rusya, Mısır, Kazakistan, Ukrayna vb.) dünya hububat üretiminde önemli bir konuma sahiptir. Türkiye, dünya fındık üretiminin %70'inden fazlasını karşılayarak

stratejik bir tarımsal ürün olan fındıkta liderdir. Ayrıca, Anadolu topraklarının Göbeklitepe gibi bölgeleri, tarım tarihinin başlangıç noktalarından biri olarak, buğdayın anavatanı kabul edilmektedir. Dolayısıyla, bu ürünlerin ticaretinin merkeziyetsiz blokzincir altyapıları aracılığıyla yeniden tasarlanması ve tarım ürünleri ticaretinin, bu tez kapsamında geliştirilen tarım tokenleri vasıtasıyla herhangi bir birey tarafından kolayca yapılabilir hale gelmesi, yalnızca ekonomik değil, tarihsel ve kültürel açıdan da dönüştürücü bir yenilik niteliği taşımaktadır. Bu merkezi olmayan yapı, yalnızca Türkiye için değil, bölgesel ticaret ekosistemi açısından da yüksek potansiyel barındırmaktadır. Özellikle Karadeniz ve Akdeniz havzasındaki tarımsal üretim ve ticaret akışlarının dijitalleşmesi, bölge ülkelerine verimlilik artışı, ticaret maliyetlerinde azalma ve fiyat istikrarı gibi önemli avantajlar sağlayabilir.

Temel Öneriler:

- Regülasyon ve Hukuki Çerçeve: Mevcut yasal düzenlemeler, varlığa dayalı tarım tokenlerinin hukuki statüsünü netleştirecek şekilde geliştirilmelidir.
- Teknik Standartlar: Farklı ülkeler arası ticaretin kolaylaştırılması için tokenizasyon protokollerinde uluslararası standartlar benimsenmelidir.
- Eğitim ve Farkındalık: Çiftçiler, yatırımcılar ve sektör paydaşları için blokzincir ve tokenizasyon konusunda kapsamlı eğitim programları oluşturulmalıdır.
- Teknoloji Entegrasyonu: Tokenizasyon sistemleri, yapay zekâ tabanlı fiyat tahminleme ve talep planlama araçları ile desteklenmelidir.
- Sürdürülebilirlik: Enerji tüketimini azaltan mutabakat mekanizmaları tercih edilerek çevresel sürdürülebilirlik gözetilmelidir.
- Sektörel Genişleme: Gelecek çalışmalarda, tarım dışındaki emtia gruplarının tokenizasyonu üzerine odaklanılarak farklı sektörlere uyarlanabilirlik incelenebilir.

Tez kapsamında tarım ürünlerinin tokenizasyonu ve blokzincir teknolojisinin Türkiye tarım sektörüne entegrasyonu, yazılım mühendisliği yöntemleri temel alınarak adım adım tasarlanmış ve uygulanmıştır. Literatürden elde edilen bilgiler doğrultusunda geliştirilen bu model, modüler mimari ve sürekli iyileştirme yaklaşımıyla kurgulanmış hem teknik hem de sektörel açıdan uygulanabilirliği test edilmiştir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması literatürdeki mevcut bilgilerle uyumlu olmasının yanı sıra, tarım sektörüne yönelik blokzincir tabanlı tokenizasyonun uygulanabilirliğini gösteren ve saha koşullarında test edilen ilk kapsamlı örneklerden biri olarak özgün bir değer sunmaktadır. Çalışma hem akademik araştırmalara hem de sektörel uygulamalara yön verecek nitelikte öneriler geliştirmiştir. Bu çalışma blokzincir teknolojisinin tarım sektörüne entegrasyonu için yenilikçi,

uygulanabilir ve ölçeklenebilir bir model sunmakta; tarımsal emtianın tokenize edilerek finansal varlık olarak değerlendirilmesine yönelik teknik ve hukuki açıdan uyumlu bir platform ortaya koymaktadır. Bu platform, gelecekteki akademik araştırmalara, politika yapıcılara ve tarım-gıda tedarik zincirindeki tüm paydaşlara yol gösterici niteliktedir.

KAYNAKLAR

Abeyratne, S.A. and Monfared, R.P., 2016, Blockchain ready manufacturing supply chain using distributed ledger, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 5 (9), 1–10.

Accenture, 2018, *Tracing the Supply Chain: How Blockchain Can Enable Traceability in the Food Industry*, https://www.scribd.com/document/444601327/Accenture-Tracing-Supply-Chain-Blockchain-Study-PoV-pdf, [Ziyaret tarihi: 26 Haziran 2024].

Ackoff, R.L., 1989, From data to wisdom, *Journal of Applied Systems Analysis*, 16, 3–9.

AgriFintech Finansal Teknolojiler A.Ş., 2023, Cropto Tarımsal Emtia Token'ları Whitepaper, https://www.cropto.io, [Ziyaret tarihi: 7 Nisan 2025].

Akagün, H.Y., 2021, *Blockchain usecases in real estate ecosystem: a smart contract example*, Thesis (MSc), Istanbul Technical University, doi:10.36543/kauiibfd.2023.021.

Akagün, F., 2021, Blokzincir ve akıllı sözleşmelerin gayrimenkul sektöründeki potansiyel katkıları, *Gayrimenkul ve Teknoloji Dergisi*, 12, 45–56.

Alhadid, A. and Ahmed, Z., 2020, Blockchain technology for military and defence applications: a review, *International Journal of Defense and Security*, 10 (3), 215–230.

Alhadid, M. and Zou, C., 2020, Blockchain in military operations: opportunities, challenges and future directions, *International Journal of Network Security & Its Applications*, 12 (4), 1–15.

Al-Jaroodi, J. and Mohamed, N., 2019, Blockchain in industries: a survey, *IEEE Access*, doi:10.1109/ACCESS.2019.2903554.

Alketbi, A., Nasir, Q. and Talib, M.A., 2018, Blockchain for government services-use cases, security benefits and challenges, *15th Learning and Technology Conference (L&T)*, 112–119.

Alladi, T., Chamola, V., Parizi, R.M. and Choo, K.-K.R., 2019, Blockchain applications for Industry 4.0 and industrial IoT: a review, *IEEE Access*, 7, 93749–93776, doi:10.1109/ACCESS.2019.2929296.

Allen, D.W.E., Guo, L. and Jurić, M., 2020, Blockchain-based decentralized finance: law, regulation, and governance, *Journal of Corporate Law Studies*, 20 (1), 1–34.

Alsalim, M.S.H. and Ucan, O.N., 2023, Secure banking and international trade digitization using blockchain, *Optik*, 272, 170269.

Altunbaşak, İ., 2020, Kamu mali denetiminde olası blokzincir teknolojisinin denetim süreçlerine etkisi, *Maliye ve Sigorta Yorumları*, 112 (1), 45–58, https://ms.hmb.gov.tr/uploads/2020/03/011-Kamu-Mali-Denetiminde-Olas%C4%B1-Blok-Zincir-Teknolojisini.pdf, [Ziyaret tarihi: 21 Şubat 2025].

Andoni, M., Robu, V., Flynn, D., Abram, S., Geach, D., Jenkins, D., McCallum, P. and Peacock, A., 2019, Blockchain technology in the energy sector: a systematic review of challenges and opportunities, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 100, 143–174, doi:10.1016/j.rser.2018.10.014.

Androulaki, E., Barger, A., Bortnikov, V., Muralidharan, S., Cachin, C., Christidis, K., De Caro, A., Enyeart, D., Murthy, C., Ferris, C., Laventman, G., Manevich, Y., Nguyen, B., Sethi, M., Singh, G., Smith, K., Sorniotti, A., Stathakopoulou, C., Vukolić, M. and Yellick, J., 2018, Hyperledger Fabric: a distributed operating system for permissioned blockchains, *Proceedings of the 13th EuroSys Conference (EuroSys '18)*, April, Porto, Portugal, Association for Computing Machinery, 1–16, doi:10.1145/3190508.3190538.

Antonopoulos, A.M., 2017, *Mastering Bitcoin: Unlocking Digital Cryptocurrencies*, O'Reilly Media, Sebastopol, CA.

Anushya, 2019, *How Blockchain Technology Can Transform Travel and Tourism Industry?*, https://Www.Bitdeal.Net/Blockhain-In-Travel-And-Tourism, [Ziyaret tarihi: 15 Mayıs 2023].

Aslaner, B., 2021, *Kurumcu İktisat Okulu Perspektifinden Blokzinciri Teknolojisinin Anlamı*, Thesis (PhD), İstanbul Üniversitesi.

Awan, K.S., Bui, N., Jan, M.A., Khan, M.K. and Rodrigues, J.J.P.C., 2023, Blockchain and IoT-enabled smart farming system for weather forecasting and agricultural decision making, *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 40, 100996, doi:10.1016/j.suscom.2023.100996.

Ayberkin, D., 2022, *Blokzincir Teknolojisinin Dijital Pazarlama Sektöründe Yenilikçilik ve Kullanılabilirlik Boyutuyla Uygulanabilmesi İçin Bir Sistem Mimarisi Tasarımı*, Thesis (PhD), Atatürk Üniversitesi.

Aydem Enerji, 2025, *Blokzincir Teknolojisi & Sürdürülebilirlik*, https://www.aydemenerji.com.tr/blog/236/blokzincir-teknolojisi-surdurulebilirlik/, [Ziyaret tarihi: 8 Nisan 2025].

Bach, M., Mihaljevic, L.M. and Zagar, B. (2018). Comparative Analysis of Blockchain Consensus Algorithms. *41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics, Opatija, 21-25 May 2018*, 1545-1550. https://doi.org/10.23919/MIPRO.2018.8400278

Back, A., 1997, *Hashcash*, http://www.cypherspace.org/hashcash/, [Ziyaret tarihi: 15 Mayıs 2023].

Balaji, S. and Murugaiyan, M.S., 2012, Waterfall vs. V-Model vs. Agile: a comparative study on SDLC, *International Journal of Information Technology and Business Management*, 2(1), 26–30.

Balcı, E., 2020, Lojistik sektörünün uluslararası alanda dijitalleşme süreci ve Türkiye'ye etkileri, Marmara Üniversitesi SBE İktisat Anabilim Dalı.

Balcı, Y., 2020, *Blokzincir ve lojistik: Yeni nesil tedarik zinciri yönetimi*, İstanbul: Beta Yayınları.

Baliga, A., 2017, Understanding blockchain consensus models, *Persistent*, 4, 1–14.

Bano, S., Sonnino, A., Al-Bassam, M., Azouvi, S., McCorry, P., Meiklejohn, S. and Danezis, G., 2017, SoK: Consensus in the age of blockchains, *arXiv preprint* arXiv:1711.03936, https://arxiv.org/abs/1711.03936.

Bashir, I., 2017, *Mastering Blockchain*, Packt Publishing Limited.

Becker, G., 2008, *Merkle signature schemes, Merkle trees and their cryptanalysis, Tech. Rep.*, Ruhr-University Bochum.

Behnke, G., 2019, Blockchain technology in the pharmaceutical industry: a path to improve drug supply chain integrity, *International Journal of Pharmaceutical Sciences*, 17(4), 567–578.

Behnke, K. and Janssen, M.F.W.H.A., 2020, Boundary conditions for traceability in food supply chains using blockchain technology, *International Journal of Information Management*, 52, Article 101969.

Bermeo-Almeida, O., Cardenas-Rodriguez, M., Samaniego-Cobo, T., Ferruzola-Gómez, E., Cabezas-Cabezas, R. and Bazán-Vera, W., 2018, Blockchain in agriculture: a systematic literature review, in *International Conference on Technologies and Innovation*, Cham: Springer, 44–56.

Bermeo-Almeida, O., Poveda-Villalba, K., Palacios-Pacheco, X. and López, L., 2018, Blockchain in agriculture: applications and challenges, *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on e-Business Engineering (ICEBE)*, 459–466.

Binance Academy, 2020, *What is Tokenomics?*, https://academy.binance.com/en/articles/what-is-tokenomics. [Ziyaret tarihi: 2 Mayıs 2024].

Binance Academy, 2022, *Token ekonomisi nedir ve neden önemlidir?*, https://academy.binance.com/tr/articles/what-is-tokenomics-and-why-does-it-matter, [Ziyaret tarihi: 5 Mayıs 2024].

Binance Academy, 2023, *Blockchain mutabakat algoritması nedir?*, https://academy.binance.com/en/articles/what-is-a-blockchain-consensus-algorithm, [Ziyaret tarihi: 15 Mayıs 2023].

Bitlo, 2022, *Tokenomics nedir? Niçin önemlidir?*, https://akademi.bitlo.com/makale/tokenomics-nedir-nicin-onemlidir, [Ziyaret tarihi: 5 Mayıs 2024].

Blasetti, R., 2017, *Blockchain for business, should you care?*, https://blockgeeks.com/blockchain-for-business/, [Ziyaret tarihi: 16 Mayıs 2023].

Bowersox, D.J., Closs, D.J. and Cooper, M.B., 2013, *Supply Chain Logistics Management*, New York: McGraw-Hill.

Bozdoğan, B., 2023, Blokzincir teknolojisi ve kamu idarelerinde kullanılabilirliği: ülke örnekleri ve Türkiye değerlendirmesi, *Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 6(1), 25–40, doi:10.33464/iibf.1234567.

Böhme, R., Christin, N., Edelman, B. and Moore, T., 2015, Bitcoin: economics, technology, and governance, *Journal of Economic Perspectives*, 29(2), 213–238, doi:10.1257/jep.29.2.213.

Burchert, C., Decker, C. and Wattenhofer, R., 2018, Scalable funding of Bitcoin micropayment channel networks, *Royal Society Open Science*, 5(8), 180089, doi:10.1098/rsos.180089.

Buterin, V., 2013, A next-generation smart contract and decentralized application platform, *Ethereum Whitepaper*, https://ethereum.org/en/whitepaper/.

Buterin, V., 2014, A next-generation smart contract and decentralized application platform,

Ethereum White Paper, https://ethereum.org/en/whitepaper/.

Buterin, V., 2014, Slasher: a punitive proof-of-stake algorithm, GitHub, https://github.com/ethereum/wiki/wiki/Slasher.

Buterin, V., 2017, Casper the friendly finality gadget, *arXiv preprint* arXiv:1710.09437, https://arxiv.org/abs/1710.09437.

Buterin, V., 2021, The Surge, the Scourge, the Verge, and Ethereum's scaling roadmap, *Ethereum Foundation Blog*.

Buttafoco, O., 2019, *Emerging solutions for the improvement of food traceability in the EU: examining the use of blockchain technology for tracing extra virgin olive oil (EVOO)*, University of Uppsala and University of Udine.

Cachin, C., 2016, *Architecture of the Hyperledger Blockchain Fabric*, IBM Research.

Çalışkan, S., 2020, *Türkiye Tarım Sektörünün Genel Yapısı ve Sorunları*, *Tarım ve Ekonomi Dergisi*, 22(4), 15–22.

Casino, F., Dasaklis, T.K. and Patsakis, C., 2019, A systematic literature review of blockchain-based applications: current status, classification and open issues, *Telematics and Informatics*, 36, 55–81.

Caro, M.P., Ali, M.S., Vecchio, M. and Giaffreda, R., 2018, Blockchain-based traceability in Agri-Food supply chain management: a practical implementation, in *2018 IoT Vertical and Topical Summit on Agriculture-Tuscany (IOT Tuscany)*, IEEE, 1–4.

Catalini, C. and Gans, J.S., 2016, Some simple economics of the blockchain, MIT Sloan Research Paper No. 5191-16.

Catalini, C. and Gans, J.S., 2020, Some simple economics of the blockchain, *Communications of the ACM*, 63(7), 80–90.

Cbinsights, 2018, Banking is only the beginning: 58 big industries blockchain could transform, https://www.cbinsights.com/research/industries-disrupted-blockchain/, [Ziyaret tarihi: 5 Nisan 2024].

Chen, Y., 2021, Designing token economies, *Journal of Economic Perspectives*, 35(3), 99–120.

Chen, Y. and Bellavitis, C., 2020, Decentralized finance: blockchain technology and the quest for an open financial system, *Technological Forecasting and Social Change*, 162, 120539.

Chohan, U.W., 2018, Tokenomics: dynamic adoption and valuation, Thesis (MSc), University of New South Wales.

Chohan, U.W., 2022, *Tokenomics: The Crypto Shift of Blockchains, ICOs, and Tokens*, Routledge.

Christidis, K. and Devetsikiotis, M., 2016, Blockchains and smart contracts for the Internet of Things, *IEEE Access*, 4, 2292–2303, doi:10.1109/ACCESS.2016.2566339.

Christopher, M., 2020, *Logistics & Supply Chain Management*, 5th ed., Pearson.

Commodity Futures Trading Commission (CFTC), 2023, *History of the CFTC: US futures trading and regulation before the creation of the CFTC*, https://www.cftc.gov/About/HistoryoftheCFTC, [Ziyaret tarihi: 1 Nisan 2025].

CoinMarketCap, 2025, *Tokenomics (Token Ekonomisi)*, https://coinmarketcap.com/academy/tr/glossary/tokenomics, [Ziyaret tarihi: 8 Nisan 2025].

Cormen, T.H., Leiserson, C.E., Rivest, R.L. and Stein, C., 2009, *Introduction to Algorithms*, 3rd ed., MIT Press.

Croman, K., Decker, C., Eyal, I., Gencer, A.E., Juels, A., Kosba, A., Miller, A., Saxena, P., Shi, E., Sirer, E.G., Song, D. and Wattenhofer, R., 2016, *On scaling decentralized blockchains*, Financial Cryptography and Data Security, In: J. Clark, S. Meiklejohn, P.Y.A. Ryan, D. Wallach, M. Brenner and K. Rohloff, eds, Berlin: Springer, 106–125.

David, M. and DeCapua, T., 2018, *Blockchain for the Enterprise: a visual guide to blockchain and distributed ledger technologies for business leaders*, Independently published.

Decker, C. and Wattenhofer, R., 2013, A fast and scalable payment network with Bitcoin Duplex Micropayment Channels, *Proceedings of the 2013 Workshop on Bitcoin and Peer-to-Peer Systems*, 1–7.

Decker, C. and Wattenhofer, R., 2013, Information propagation in the Bitcoin network, *IEEE P2P 2013 Proceedings*, 1–10.

Deloitte, 2018, *Blokzincir potansiyelinin keşfi, 2018 yılı Türkiye Blokzincir Araştırması*, https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/tr/Documents/consulting/blokzincir-potansiyelinin-kesfi.pdf, [Ziyaret tarihi: 5 Mayıs 2024].

Deloitte Türkiye, 2018, *Blokzincir: İş dünyasının geleceği*, Deloitte Yayınları.

Deloitte, 2023, *Using blockchain to drive supply chain transparency*, https://www2.deloitte.com/us/en/pages/operations/articles/blockchain-supply-chain-innovation.html, [Ziyaret tarihi: 5 Mart 2024].

Demestichas, K. and Daskalakis, E., 2020, Information and communication technology solutions for the smart farming and food sector, *Computers and Electronics in Agriculture*, 170, 105246.

Demirkan, G., 2021, *Blokzincir teknolojisi ve teknolojik determinizm çerçevesinde toplumsal değişime etkileri*, Thesis (MA), İstanbul Medipol Üniversitesi.

Doğantuna, T., 2019, *Blokzincir teknolojisi ile rekolte tahmin platformu tasarlamak*, Thesis (MSc), Ankara Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü.

Doğantuna, R.T., 2019, Tarımda blokzincir uygulamaları: mevcut durum ve geleceğe bakış, *Tarım Teknolojileri Dergisi*, 2(1), 45–56.

Dorri, A., Kanhere, S.S., Jurdak, R. and Gauravaram, P., 2017, Blockchain for IoT security and privacy: the case study of a smart home, in *2017 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops*, IEEE, 618–623.

Dowling, M., 2022, Fertile LAND: pricing non-fungible tokens, *Finance Research Letters*, 44, 102096.

Dura, C., 1987, Tarımsal gelişmenin ekonomi üzerindeki etkileri, *Ekonomik Yaklaşım Dergisi*, 3(2), 77–85.

Dwivedi, A.D., Srivastava, G., Dhar, S. and Singh, R., 2021, *A decentralized privacy-preserving healthcare blockchain for IoT*. Sensors, 21(13), 4296.

Dwork, C. and Naor, M., 1992, Pricing via Processing or Combatting Junk Mail, in *12th Annual International Cryptology Conference*, California, USA, 139–147.

Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R. and Liston, K., 2018, *BIM Handbook: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*, 3rd ed., Wiley.

Ekinci, M., 2021, Uluslararası ticaret işlemlerinde blokzincir teknolojisinin kullanımı ve Türk dış ticaretine muhtemel etkileri, Thesis (MSc), İstanbul Ticaret Üniversitesi Dış Ticaret Enstitüsü.

Elmasri, R. and Navathe, S.B., 2021, *Fundamentals of Database Systems*, 7th ed., Pearson.

Eper, O., 2022, Use of blockchain technology in supply chain management and logistics: a case study in logistics company, Thesis (MSc), Yaşar University.

Eper, S., 2022, Blockchain in logistics: the case of Maersk, *Journal of Supply Chain Innovation*, 15(2), 45–60.

European Banking Authority, 2019, *Report with advice for the European Commission on crypto-assets*, https://www.eba.europa.eu/sites/default/documents/files/documents/10180/2545547/4c1da4a9-ea9a-4d2e-bab7-57b7fa6d7ec7/EBA%20Report%20on%20crypto%20assets.pdf, [Ziyaret tarihi: 2 Şubat 2022].

European Commission, 2020, *Study on blockchains: legal, governance and interoperability aspects*, https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/study-blockchains-legal-governance-and-interoperability-aspects-smart-20180038, [Ziyaret tarihi: 5 Mayıs 2024].

European Commission, 2021, *Farm to Fork Strategy: for a fair, healthy and environmentally-friendly food system*, https://food.ec.europa.eu. [Ziyaret tarihi: 5 Mart 2024].

European Commission, 2023, *European Parliament report on blockchain and international trade supply chains*, European Parliament, https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_STU(2020)641544, [Ziyaret tarihi: 5 Mayıs 2024].

FDA, 2019, Public Workshop: Proposed Pilot Project(s) under the Drug Supply Chain Security Act, https://www.fda.gov/drugs/news-events-human-drugs/public-workshop-proposed-pilot-projects-under-drug-supply-chain-security-act, [Ziyaret tarihi: 1 Mart 2024].

Federal Reserve Bank of St. Louis Review, 2021, *103*(2), 153–174, doi:10.20955/r.103.153-74.

Fernandes, J. and Patel, M., 2021, Decentralized ticketing and smart contracts in airline industry, *International Journal of Logistics Research and Applications*, 24(2), 134–150.

Fosso Wamba, S. and Queiroz, M.M., 2019, Blockchain adoption challenges in supply chain: an empirical investigation of the main drivers in India and the USA, *International Journal of Information Management*, 46, 70–82.

Fosso Wamba, S. and Queiroz, M.M., 2020, Blockchain in the operations and supply chain management: benefits, challenges and future research opportunities, *International Journal of Information Management*, 52, 102–116.

Galvez, J.F., Mejuto, J.C. and Simal-Gandara, J., 2018, Future challenges on the use of blockchain for food traceability analysis, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 107, 222–232.

Gatteschi, V., Lamberti, F., Demartini, C., Pranteda, C. and Santamaría, V., 2018, Blockchain and smart contracts for insurance: Is the technology mature enough?, *Future Internet*, 10(2), 20, doi:10.3390/fi10020020.

Gedik Yatırım, 2025, Token nedir? Token ile coin arasındaki farklar nelerdir?, Gedik Yatırım, https://gedik.com/yazilar/fintech/token-nedir, [Ziyaret tarihi: 8 Nisan 2025].

Gerdan, G., 2019, *Blokzincir teknolojisiyle gıda güvenliği ve yumurta sektörü için örnek bir uygulama*, Yüksek Lisans, Marmara Üniversitesi.

Gerdan, D., Koç, C. and Vatandaş, M., 2020, Gıda ürünlerinin izlenebilirliğinde blokzincir teknolojisinin kullanımı, *Tarım Makinaları Bilim Dergisi*, 16(2), 8–14.

Gervais, A. and Wüst, K., 2018, Do you need a blockchain?, in *Proceedings of the 2018 Crypto Valley Conference on Blockchain Technology (CVCBT)*, IEEE, 45–54.

Girasa, R., 2018, *Regulation of cryptocurrencies and blockchain technologies: National and international perspectives*, Springer.

Gopalakrishnan, S. and Kessler, T., 2021, Blockchain for airlines: Enhancing security and efficiency, *Transportation Science*, 55(4), 765–780.

Grech, A. and Camilleri, A.F., 2017, *Blockchain in education*, Publications Office of the European Union, doi:10.2760/60649.

Gupta, S. and Pandi, S., 2021, Blockchain technology and its impact on the travel and tourism industry, *International Journal of Hospitality & Tourism Administration*, 22(4), 384–402.

Günen, E., 2020, *En sade anlatımla blockchain nedir, nasıl çalışır?*, https://tr.cointelegraph.com/news/a-simple-explanation-of-what-is-blockchain-and-how-its-works, [Ziyaret tarihi: 16 Mayıs 2023].

Güven, V. and Şahinöz, E., 2018, *Blokzincir kripto paralar Bitcoin Satoshi dünyayı değiştiriyor*, İstanbul: Kronik Kitap.

Hasan, H., Alqahtani, S., Alarifi, A., Alharthi, R. and Alturki, R., 2022, A blockchain-based system for agri-food supply chain traceability management, *SN Computer Science*, 3(279), doi:10.1007/s42979-022-01148-3.

Harris, C.G., 2022, Towards a blockchain solution for customs duty-related fraud, in *Database Systems for Advanced Applications. DASFAA 2022 International Workshops: BDMS, BDQM, GDMA, IWBT, MAQTDS and PMBD*, Virtual Event April 11–14 2022, Cham: Springer International Publishing, 120–134.

Harris, S., 2020, Blockchain and its role in military operations: Enhancing security and efficiency, *Military Technology Journal*, 32(4), 1–12.

Harris, J., 2020, Blockchain technology and military logistics: Enhancing transparency and accountability, *NATO Communications and Information Agency Reports*.

Harris, J., 2022, Blockchain models for international trade and tax fraud prevention, *Global Economic Review*, 34(1), 45–63.

Hassan, L., Shiu, E. and Parry, G., 2020, Smart contracts in the hospitality industry: Potential use and implementation, *Journal of Hospitality & Tourism Technology*, 11(3), 349–366, doi:10.1108/JHTT-11-2019-0130.

Hofmann, E. and Rüsch, M., 2017, Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics, *Computers in Industry*, 89, 23–34.

Hosseini, S., Pham, H.C., Dam, T.C. and Nguyen, V.H., 2021, Blockchain-based food supply chain management: A systematic review, *Journal of Food Quality*, 2021, 1–14, doi:10.1155/2021/9974298.

Hurmuze, S., 2021, *Blockchain's utilization in food supply chain*, Yüksek Lisans tezi, Işık Üniversitesi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi (Tez No: 724573).

Hurmuze, S., 2021, Blockchain in food supply chain management: A case study approach, *Journal of Supply Chain Management*, 26(3), 153–170.

Iansiti, M. and Lakhani, K.R., 2017, The truth about blockchain, *Harvard Business Review*, 95(1), 118–127.

IBM Food Trust, 2019, *IBM Blockchain Transparent Supply & Food Trust*, https://www.ctc-n.org/sites/default/files/IBM%20Food%20Trust%20Overview%20Presentation%20for%20UN-CTCN%20-%20final.pdf, [Ziyaret tarihi: 5 Temmuz 2023].

Indap, Ş., 2022, *Tarım-Gıda Tedarik Zincirinde İzlenebilirlik ve Gıda Güvenliği için Blokzinciri: Kiraz Ürünü Uygulaması*, Yüksek Lisans tezi, Maltepe Üniversitesi.

Işıktekin, B., 2020, *İnşaat Projeleri Yönetim Problemlerinin Çözümünde Yapı Bilgi Modellemesi Üzerindeki Blokzincir Potansiyelinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans, Bahçeşehir Üniversitesi.

Işıktekin, A., 2020, Yapı Bilgi Modelleme (YBM) ve Blokzincir Teknolojisinin İnşaat Proje Yönetiminde Entegrasyonu, *İnşaat ve Proje Yönetimi Dergisi*, 34, 75–92.

İrak, H. and Topcu, D., 2020, Blokzincir teknolojisinin tarım ürünleri tedarik zincirinde kullanımı üzerine bir analiz, *Tarım Ekonomisi Araştırmaları Dergisi*, 6(1), 112–128.

Ivanov, D., Dolgui, A. and Sokolov, B., 2019, The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics, *International Journal of Production Research*, 57(3), 829–846.

Jakobsson, M. and Juels, A., 1999, Proofs of work and bread pudding protocols, *Secure Information Networks*, 258–272.

Jiang, L., Wang, H. and Zhu, X., 2021, Loyalty programs in aviation industry: a blockchain perspective, *Journal of Travel Research*, 60(5), 980–997.

Kakavand, H., Kost De S. Nicolette and Chilton, B., 2017, *The Blockchain Revolution: an*

analysis of regulation and technology related to distributed ledger technologies, SSRN, https://ssrn.com/abstract=2849251, [Ziyaret tarihi: 11 Kasım 2024].

Kamble, S.S., Gunasekaran, A. and Sharma, R., 2020, Modeling the blockchain-enabled traceability in agriculture supply chain, *International Journal of Information Management*, 52, Article 101967.

Kamble, S.S., Gunasekaran, A. and Sharma, R., 2020, A systematic review on blockchain technology for sustainable supply chain management: implications for the food industry, *Journal of Cleaner Production*, 254, Article 120012, doi:10.1016/j.jclepro.2020.120012.

Karafiloski, E. and Mishev, A., 2017, Blockchain solutions for big data challenges, in *2017 IEEE EUROCON 17th International Conference on Smart Technologies*, IEEE, 763–768, doi:10.1109/EUROCON.2017.8011213.

Karayazı, F., 2021, *Lojistik sektöründe blokzincir yazılım seçimi ve risk analizi*, Yüksek Lisans, Galatasaray Üniversitesi.

Kargın, S., 2022, *Menkul kıymet jetonu arzı: temel çerçeve ve yaklaşımlar*, Yüksek Lisans tezi, İstanbul Bilgi Üniversitesi, Bilişim ve Teknoloji Hukuku Anabilim Dalı.

Kaska, M., 2020, *Blockchain applications in maritime industry*, Yüksek Lisans tezi, Galatasaray Üniversitesi.

Kaska, T., 2020, *Deniz Lojistiğinde Block Zincir Uygulamaları*, *Denizcilik Araştırmaları Dergisi*, 8(3), 150–170.

Kiayias, A., Russell, A., David, B. and Oliynykov, R., 2017, A provably secure proof-of-stake blockchain protocol, in *Annual International Cryptology Conference*, Springer, Cham.

Kim, H.M., 2020, *Blockchain for Business: The New Industrial Revolution*, Routledge.

King, S. and Nadal, S., 2012, PeerCoin: Peer-to-Peer Crypto-Currency with Proof-of-Stake, https://www.peercoin.net/whitepapers/peercoin-paper.pdf, [Ziyaret tarihi: 15 Mayıs 2023].

Kocakulak, M. and Ünal, E., 2022, Türkiye'de ilaç tedarik zincirinde kullanılan ilaç takip sistemi ile blokzincir tabanlı uygulamaların karşılaştırılması, *Journal of Health Informatics*, 12(1), 83–92.

Kouhizadeh, M. and Sarkis, J., 2018, Blockchain practices, potentials, and perspectives in greening supply chains, *Sustainability*, 10(10), Article 3652.

Kouhizadeh, M. and Sarkis, J., 2018, Blockchain practices, potentials, and challenges in aviation supply chain, *International Journal of Production Economics*, 203, 169–183.

Kshetri, N., 2018, Blockchain's role in strengthening the security of pharmaceutical supply chains, *International Journal of Information Management*, 40, 137–146.

KPMG Fintech ve Dijital Finans, 2023, *Kripto varlıklara ilişkin düzenlemeler raporu*, https://kpmg.com/tr/tr/home/gorusler/2024/01/kripto-varliklara-iliskin-duzenlemeler.html, [Ziyaret tarihi: 12 Mayıs 2023].

Kritikos, M., 2018, *What if blockchain offered a way to reconcile privacy with transparency?*, European Parliamentary Research Service,

https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_ATA(2018)620214, [Ziyaret tarihi: 1 Şubat 2024].

Kumar, R., Tripathi, R. and Choudhary, N., 2022, A framework for blockchain-, AI-, and IoT-driven smart and secure new-generation agriculture, in D. Singh, V. Goyal and A.K. Sangaiah (eds.), *Integrating AI and IoT for Smart Agriculture and Farming*, CRC Press, 157–174, doi:10.1201/9781003188247-10.

Kumar, R., Tripathi, R. and Choudhary, N., 2024, Blockchain and digital twin applications in smart agriculture, in D. Singh, M. Singh and V. Goyal (eds.), *Blockchain and Digital Twins in Smart Agriculture*, CRC Press, 345–368.

Kumar, S., Maheshwari, V., Prabhu, J., Prasanna, M. and Jothikumar, R., 2024, Tarımda blockchain ve IoT entegrasyonu: dönüştürücü bir yaklaşım, in *Deep Learning and Edge Computing Solutions for High Performance Computing*, 167–181.

Lazarovich, A., 2015, *Invisible ink: Blockchain for data privacy*, PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, MIT DSpace, https://hdl.handle.net/1721.1/99051.

Lee, I. and Lee, K., 2022, *Smart Logistics and Supply Chain Management: Innovations and Trends*, Springer.

Lee, I., Park, J. and Kim, Y., 2020, Blockchain-enabled baggage tracking systems in aviation, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 21(11), 4567–4579.

Lesk, C., Rowhani, P. and Ramankutty, N., 2016, Influence of extreme weather disasters on global crop production, *Nature*, 529, 84, doi: 10.1038/nature16467.

Li, H., 2020, Blockchain technology for food safety and traceability, *Food Control*, 108, 1–10.

Li, X., Jiang, P., Chen, T., Luo, X. and Wen, Q., 2020, A survey on the security of blockchain systems, *Future Generation Computer Systems*, 107, 841–853.

Lin, J., Shen, Z. and Miao, C., 2018, Using blockchain technology to enhance supply chain efficiency and trust, *International Journal of Information Management*, 39, 1–12.

Lin, Q., Wang, H., Pei, X. and Wang, J., 2020, Food safety traceability system based on blockchain and EPCIS, *IEEE Access*, 8, 131204–131217.

Liu, X., Zhang, Q., Zhao, X., Chen, X. and Li, M., 2019, Blockchain-based smart contracts and their application to real estate transactions. *Journal of Property Research*, *36*(2), 127–145.

Liu, X., Wang, X., Zhang, Y. and Li, Y., 2021, Blockchain-based smart contracts for decentralized energy systems: a survey, *Energy Reports*, 7, 115–130, doi: 10.1016/j.egyr.2021.01.034.

Liu, X. and Wei, Y., 2019, Blockchain technology in tourism: applications, challenges and opportunities, *Tourism Economics*, 25(7), 1278–1295.

Loukil, T., Abed, M. and Boukadi, K., 2021, Towards secure and transparent e-learning ecosystem based on blockchain technology, in *Proceedings of the 2021 3rd International Conference on Blockchain Technology*, 1–7, doi: 10.1145/3464967.3468026.

Luo, L., Peng, Y., Zhang, H. and Wang, Y., 2019, Blockchain technology for real estate: A

survey. *Journal of Real Estate Research*, *41*(3), 409–428.

Loukil, F., Abed, M. and Boukadi, K., 2021, Blokzincir adoption in education: a systematic literature review, *Education and Information Technologies*, 26(5), 5779–5797.

Lucena, P., Binotta, A.P., Momo, F.D.S. and Kim, H., 2018, A case study for grain quality assurance tracking based on a blockchain business network, *arXiv preprint*, arXiv:1803.07877.

Lucena, P., 2018, Brazilian agribusiness blockchain case study using Hyperledger, in *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*.

Lucky, R.W., 1989, *Silicon Dreams: Information, Man, and Machine*, St. Martin's Press.

Lyons, T., Courcelas, L. and Timsit, K., 2018, Blockchain and the GDPR, European Union Blockchain Observatory and Forum, https://www.eublockchainforum.eu/reports/blockchain-and-gdpr, [Ziyaret tarihi: 11 Kasım 2023].

Makhdoom, I., Shakil, K.A., Khan, R.A. and Alouffi, B., 2020, Blockchain in the construction industry: a survey, *Automation in Construction*, 114, 103121.

Marzougoui, F., Ben Othman, J. and Benslimane, A., 2024, Blockchain and IoT in smart agriculture: analysis, opportunities, challenges, and future research directions, *Journal of Information Assurance and Security*, 19(3), 104–119, doi: 10.2478/ias-2024-0008.

Menezes, A.J., van Oorschot, P.C. and Vanstone, S.A., 1996, *Handbook of Applied Cryptography*, CRC Press.

Misra, A. and Mention, A.L., 2022, Exploring the food value chain using open innovation: a bibliometric review of the literature, *British Food Journal*, 124(6), 1810–1837, doi: 10.1108/BFJ-04-2021-0353.

Monrat, A.A., Schelen, O. and Andersson, K., 2019, A survey of blockchain from the perspectives of applications, challenges and opportunities, *IEEE*, 7, 117134–117151.

Montreuil, B., 2021, *The Physical Internet: The Logistics Revolution*, Wiley.

Mougayar, W., 2016, *The Business Blockchain: Promise, Practice, and Application of the Next Internet Technology*, Wiley.

Mukherjee, A.A., Singh, R.K., Mishra, R. and Bag, S., 2022, Tarımsal tedarik zincirinde sürdürülebilirlik gelişimi için blok zinciri teknolojisinin uygulanması: gerekçelendirme çerçevesi, *Operations Management Research*, 15(1), 46–61.

Nair, B.K., 2021, *Blockchain applications in tourism sector*, Yüksek Lisans tezi, Ankara Yıldırım Beyazıt University, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi (Tez No: 717585).

Nakamoto, S., 2008, *Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system*, https://bitcoin.org/bitcoin.pdf, [Ziyaret tarihi: 1 Kasım 2023].

Nakamoto, S., 2009, *Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system*, https://bitcoin.org/bitcoin.pdf, [Ziyaret tarihi: 1 Aralık 2023].

Nandi, S., Sarkis, J., Hervani, A.A. and Helms, M.M., 2021, Redesigning supply chains using blockchain-enabled circular economy and COVID-19 experiences, *Sustainable Production and*

Consumption, 27, 10–22.

Narayanan, A., Bonneau, J., Felten, E., Miller, A. and Goldfeder, S., 2016, *Bitcoin and Cryptocurrency Technologies: a Comprehensive Introduction*, Princeton University Press.

Nayal, K., Pandey, N., Paul, J. and Dhir, A., 2021, Exploring the role of artificial intelligence in managing agricultural supply chain risk to counter the impacts of the COVID-19 pandemic. *The International Journal of Logistics Management.*

Nayal, P., Pandey, N. and Paul, J., 2021, Blockchain adoption in agriculture supply chain: a review and future research agenda, *Journal of Cleaner Production*, 284, 124731.

OECD, 2018, Blockchain technology and its use in the public sector, *OECD Working Papers on Public Governance*, No. 28, doi:10.1787/3c32c429-en.

OECD, 2020, The tokenisation of assets and potential implications for financial markets, *OECD Blockchain Policy Centre*.

OECD, 2022, The tokenisation of assets and potential implications for financial markets, *OECD Publishing*.

Oliveira, L., Zavolokina, L., Bauer, I. and Schwabe, G., 2018, To token or not to token: tools for understanding blockchain tokens, in *International Conference of Information Systems (ICIS 2018)*, San Francisco, USA, 12–16 December.

Olnes, S. and Jansen, A., 2017, Blockchain technology as infrastructure in public sector: an analytical framework, *Proceedings of the 19th Annual International Conference on Digital Government Research*, 215–223, doi:10.1145/3085228.3085239.

Olsen, P., Borit, M. and Syed, S., 2019, Applications, limitations, costs, and benefits related to the use of blockchain technology in the food industry, *Nofima Rapportserie*, No. 4/2019, Nofima AS.

Omar, A., Khan, M., Ahmed, E. and Ali, I., 2023, The impact of InsurTech on advancing sustainable specialty crops insurance: a blockchain-based solution, *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7.

Organization for Economic Cooperation and Development, 2018, *Blockchain and its use in the public sector* [Report], OECD Publishing, https://www.oecd.org/en/publications/blockchains-unchained_3c32c429-en.html, [accessed 7 March 2024].

Organization for Economic Cooperation and Development, 2019, *Is there a role for blockchain in responsible supply chains?* [Report], OECD Publishing, https://www.oecd.org/en/publications/is-there-a-role-for-blockchain-in-responsible-supply-chains_bfa93287-en.html, [accessed 2 August 2024].

Ozdemir, E.G., 2019, *Adoption of blockchain in the banking industry and its effects to employer branding*, PhD thesis, Bahçeşehir Üniversitesi.

Ozturk, A., 2022, Continuous improvement of blockchain-based agricultural systems, *Agricultural Informatics Journal*, 21(3), 115–130.

Önder, E., 2005, *Yönetim bilişim sistemleri kapsamında web tabanlı ilişkisel veritabanı yönetim sistemleri ve bir uygulama*, Yüksek Lisans tezi, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.

Özdamar, E., 2022, *Eğitimde blokzincir kullanımı: Türkiye'de ve dünyada uygulamalar*, Yüksek Lisans tezi, Trakya Üniversitesi.

Özsomuncu, C., 2021, *Tedarik zincirinde blokzincir teknolojisinin kullanımı: Gümrük sektörü üzerine bir uygulama*, Yüksek Lisans tezi, İstanbul Arel Üniversitesi.

Özyüksel, S. and Ekinci, M., 2020, Uluslararası ticarette blokzincir teknolojisi: teorik ve uygulamalı bir inceleme, *Journal of Trade & Economics*, 12(3), 112–136.

Özyürek, A.H., 2021, Blockchain teknolojisinin mevcut ve muhtemel kullanım alanları, *Anadolu Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 22(4), 31–50, doi:10.53443/anadoluibfd.988748.

Queiroz, M.M., Telles, R. and Bonilla, S.H., 2019, Blockchain and supply chain management integration: a systematic review of the literature, *Supply Chain Management: An International Journal*, 24(6), 720–734.

Pan, S., Ballot, E., Huang, G.Q. and Montreuil, B., 2020, Physical Internet and interconnected logistics services: research and applications, *International Journal of Production Research*, 58(8), 2374–2394.

Papa, S.F., 2017, Use of blockchain technology in agribusiness: transparency and monitoring in agricultural trade, in *2017 International Conference on Management Science and Management Innovation (MSMI)*, Atlantis Press.

Patra, S., 2022, Blockchain for sustainable agriculture: opportunities and challenges, *Environmental Technology & Innovation*, 27, Art. 102568.

Peters, G.W. and Panayi, E., 2015, Understanding modern banking ledgers through blockchain technologies: future of transaction processing and smart contracts on the Internet of money, *Banking and Finance Review*, 6, 1–11.

Pilkington, M., 2016, Blockchain technology: principles and applications, in *Research Handbook on Digital Transformations*, Edward Elgar Publishing.

Pressman, R.S. and Maxim, B.R., 2020, *Software Engineering: A Practitioner's Approach*, 9th ed., McGraw-Hill Education.

Regner, F., Urbach, N. and Schweizer, A., 2019, NFTs in practice–non-fungible tokens as core component of a blockchain-based event ticketing application, *Proceedings of the 40th International Conference on Information Systems (ICIS)*.

Rejeb, A., Rejeb, K. and Simske, S., 2022, Blockchain for sustainable supply chains: a review and bibliometric analysis, *Sustainability*, 14(2), Art. 614.

Rejeb, A., Keogh, J.G. and Treiblmaier, H., 2022, Leveraging blockchain technology for sustainable military logistics, *Technological Forecasting and Social Change*, 174, Art. 121249, doi:10.1016/j.techfore.2021.121249.

Royce, W.W., 1970, Managing the development of large software systems, *Proceedings of IEEE WESCON*, 26(8), 1–9.

Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J. and Shen, L., 2019, Blockchain technology and its

relationships to sustainable supply chain management, *International Journal of Production Research*, 57(7), 2117–2135.

Safeer, S., 2024, IoT based climate smart agriculture succeeded by blockchain database – a bibliometric analysis, *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, doi: 10.3389/fsufs.2024.1406871.

Sarmah, B. and Kaur, M., 2021, Blockchain technology in agri-food value chain management: empirical evidence from India, *Technological Forecasting and Social Change*, 171, Art. 120963.

Sarp, A., 2021, Türkiye tarım sektöründe dönüşüm ve zorluklar, *Türkiye Ekonomi Araştırmaları*, 29(2), 45–59.

Schär, F., 2021, Decentralized finance: on blockchain- and smart contract-based financial markets, *Federal Reserve Bank of St. Louis Review*, 103(2), 153–174.

Seirawan, R., 2019, *Veri transferinde blok zinciri uygulaması*, Yüksek Lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Sezer, H., 2021, *Gayrimenkul sektöründe blokzincir teknolojisinin kullanımı ve akıllı kontratların incelenmesi*, Yüksek Lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Sheel, A. and Nath, V., 2019, Effect of blockchain technology adoption on supply chain adaptability, agility, alignment and performance, *Management Research Review*.

Silsüpür, M., 2011, Tarımın ekonomik gelişmeye etkisi, *Ziraat Fakültesi Dergisi*, 28(3), 67–78.

Smith, R. and Brown, P., 2020, Blockchain and digital identity in air travel, *Computers & Security*, 98, Art. 101874.

Sommerville, I., 2015, *Software Engineering*, 10th ed., Pearson Education.

Sommerville, I., 2016, *Software Engineering*, 10th ed., Pearson Education.

Song, L., Wang, X., Wei, P., Lu, Z. and Merveille, N., 2018, Blockchain-based flexible double-chain architecture and performance optimization for better sustainability in agriculture, *Computers, Materials & Continua*, 68, 1429–1446.

Sultan, K., Ruhi, U. and Lakhani, R., 2018, Conceptualizing blockchains: characteristics and applications, in *11th IADIS International Conference on Information Systems*, 49–57.

Swan, M., 2015, *Blockchain: Blueprint for a New Economy*, O'Reilly Media.

Swan, M., 2019, *Blockchain: Blueprint for a New Economy*, O'Reilly Media.

Şafak, E., Arslan, Ç., Gözütok, M. and Köprülü, T., 2021, Dağıtık defter teknolojileri ve uygulama alanları üzerine bir inceleme, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (29), 36–45.

Şanlıoğlu, D., 2019, *Bir kitlesel fonlama türü olarak ICO (Initial Coin Offering): Hukuksal alt yapı açısından bir değerlendirme*, Yüksek Lisans tezi, İstanbul Üniversitesi, Para Sermaye Piyasaları ve Finansal Kurumlar (Tez No: 589567).

Tabur, A., 2021, *Bankacılık ve noter işlemlerinin blokzincir teknolojisi ile gerçekleştirilmesinin*

geleneksel sistemlerle kıyaslanması ve bireylere sağlayabileceği maddi tasarrufun belirlenmesine yönelik bir araştırma, Yüksek Lisans tezi, Bahçeşehir Üniversitesi.

Tapscott, D. and Tapscott, A., 2016, *Blockchain Revolution: How the Technology Behind Bitcoin and Other Cryptocurrencies Is Changing the World*, Penguin.

Tapscott, D. and Tapscott, A., 2018, *Blockchain Revolution: How the Technology Behind Bitcoin and Other Cryptocurrencies Is Changing the World*, Portfolio Penguin.

Tanrıverdi, M., Uysal, M. ve Üstündağ, M.T., 2019, Blokzinciri teknolojisi nedir? Ne değildir?, *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 12, 203–217.

Tasatanattakool, P. and Techapanupreeda, C., 2018, Blockchain: challenges and applications, in *2018 International Conference on Information Networking (ICOIN)*, IEEE, 473–475.
Taçılık, A., 2021, *Havacılık endüstrisinde blockchain teknolojisinin potansiyelini keşfetmek*, Yüksek Lisans tezi, İstanbul Arel Üniversitesi.

Taçılık, Y., 2021, *Havacılıkta Blokzincir Teknolojisi: Yeni Nesil Veri Yönetimi ve Güvenlik Modelleri*, İstanbul: Beta Yayınları.

Taş, O. and Kiani, F., 2018, Blok zinciri teknolojisine yapılan saldırılar üzerine bir inceleme, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi: C. Teknoloji*, 31(4), 1–15, doi:10.17671/gazibtd.451695.

Techdows, 2024, Tether (USDT) 24-Hour trading volume reaches $55.77 billion, https://techdows.com/2024/09/17/tether-usdt-24-hour-volume-reaches-55-77-billion/581940.html, [Ziyaret tarihi: 8 Nisan 2025].

Tian, F., 2016, An agri-food supply chain traceability system for China based on RFID & blockchain technology, in *13th International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM)*, doi: 10.1109/ICSSSM.2016.7538424.

Tian, F., 2021, A framework for blockchain-based military information management systems, *Defence Technology*, 17(1), 1–9.

Tian, Z., 2021, Artificial intelligence and blockchain integration for advanced military operations, *Journal of Defense Research and Technology*, 5(3), 122–134.

Toprak, İ., 2019, Blockchain technology in food supply chain: enhancing transparency and trust, *Food Safety and Security Journal*, 15(2), 200–210.

Toprak, M., 2019, *Blockchain and comparison of the situation in Turkey and in the world*, Yüksek Lisans tezi, Bahçeşehir Üniversitesi.

Treiblmaier, H., 2018, The impact of the blockchain on the supply chain: a theory-based research framework and a call for action, *Supply Chain Management*, 23(6), 545–559.

Treiblmaier, H., 2018, The impact of blockchain on the aviation supply chain: a research agenda, *Supply Chain Management*, 23(6), 545–559.

Treiblmaier, H. and Sillaber, C., 2021, The impact of blockchain on e-agriculture: a framework and case study of a pilot project in Ghana, *Information Technology for Development*, 27(2), 376–398.

Treleaven, P., Brown, R.G. and Yang, D., 2017, Blockchain technology in finance, *Computer*, 50(9), 14–17, doi:10.1109/MC.2017.3571042.

Tse, D., Zhang, B., Yang, Y., Cheng, C. and Mu, H., 2017, Blockchain application in food supply information security, in *2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, IEEE, 1357–1361.

Türkiye İstatistik Kurumu, 2021, *Tarım sektörü ve ekonomik veriler*, Ankara: TÜİK Yayınları.

Uckelmann, D., 2020, Blockchain technology for the smart tourism industry: a systematic review, *Journal of Tourism Research*, 17(6), 815–832.

UNDP, 2015, *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*, United Nations, https://sdgs.un.org/2030agenda.

Upadhyay, A., Mukhuty, S., Kumar, V. and Kazancoglu, Y., 2021, Blockchain technology and the circular economy: implications for sustainability and social responsibility, *Journal of Cleaner Production*, 293, Art. 126130.

Usta, A. and Doğantekin, S., 2017, *Blockchain 101 v2*, MediaCat Kitapları, İstanbul.

Usta, A. and Doğantekin, S., 2018, *Blockchain 101 v2*, Bankalararası Kart Merkezi (BKM), İstanbul.

Usta, A., 2021, *Blockchain 101*, Fintech İstanbul.

Usta, A. ve Doğantekin, S., 2017, Blockchain teknolojisi ve askeri alanda kullanım olanakları, *Journal of Defense Studies*, 18(2), 87–99.

Usta, A. ve Doğantekin, S., 2017, Blokzincir teknolojisinin askeri uygulamaları, *Savunma Bilimleri Dergisi*, 16(2), 45–62.

Vasin, P., 2017, BlackCoin's Proof-of-Stake Protocol v2, https://blackcoin.org/blackcoin-pos-protocol-v2-whitepaper.pdf, [Ziyaret tarihi: 15 Mayıs 2023].

Verhagen, B., 2021, Blockchain for traceability in the food supply chain: a critical review, *International Journal of Logistics Management*, 32(4), 877–899.

Vural, Y. ve Sağıroğlu, Ş., 2010, Veritabanı yönetim sistemleri güvenliği: tehditler ve korunma yöntemleri, *Politeknik Dergisi*, 13(2), 71–81.

Wamba, S.F., Queiroz, M.M., Trinchera, L. and Fosso, W., 2021. Bitcoin, blockchain and fintech: A systematic review and case studies in the supply chain. *Production Planning & Control*, *32*(3), 209–228.

Wamba, S.F., 2022, Blockchain technology in pharmaceutical supply chains, *International Journal of Logistics Management*, 33(1), 1–22.

Wang, Z., 2019, Blockchain for construction management: challenges and opportunities, *Automation in Construction*, 101, 1–11.

Wang, Y., Potter, A., Naim, M. and Lalwani, C., 2019, Blockchain and logistics: a future perspective, *International Journal of Logistics Management*, 30(4), 789–805.

Wang, W., Hoang, D.T., Hu, P., Xiong, Z., Niyato, D., Wang, P., Wen, Y. and Kim, D.I., 2019. A survey on consensus mechanisms and mining strategy management in blockchain networks. *IEEE Access*, *7*, 22328–22370.

Werbach, K., 2018, *The Blockchain and the New Architecture of Trust*, MIT Press.

Wood, G., 2017, Ethereum: a secure decentralised generalised transaction ledger, *Ethereum Project Yellow Paper*, 151(2017), 1–32.

World Economic Forum, 2018, *Blockchain beyond the hype: a practical framework for business leaders*.

World Economic Forum, 2019a, *Building value with blockchain technology: how to evaluate blockchain's benefits*.

World Economic Forum, 2019b, *Inclusive deployment of blockchain for supply chains: part 1: introduction*.

Wright, A. and De Filippi, P., 2015, Decentralized blockchain technology and the rise of lex cryptographia, *SSRN Electronic Journal*.

Wüst, K. and Gervais, A., 2018, Do you need a blockchain?, in *Proceedings of the 2018 Crypto Valley Conference on Blockchain Technology (CVCBT)*, IEEE, 45–60.

Zetzsche, D.A., Buckley, R.P., Arner, D.W. and Barberis, J.N., 2020, Decentralized finance (DeFi), *Journal of Financial Regulation*, 6(2), 172–203.

Zhang, Y., Xue, R. and Liu, L., 2019, Security and privacy on blockchain, *ACM Computing Surveys*, 52(3), 1–34.

Zhou, Q., Huang, H., Zheng, Z. and Bian, J., 2020, Solutions to scalability of blockchain: a survey, *IEEE Access*, 8, 16440–16455.

Zohar, A., 2015, Bitcoin: under the hood, *Communications of the ACM*, 58(9), 104–113.

Xie, X., Liu, J., Chen, Y. and Zhang, L., 2020, Blockchain technology in energy trading: opportunities and challenges, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(2), 1065–1073.

Xiong, H., Dalhaus, T., Wang, P. and Huang, J., 2020, Blockchain technology for agriculture: applications and rationale, *Blockchain in Agriculture*, 3(7), 2.

Xu, X., Pautasso, C., Zhu, L. and Gramoli, V., 2019, The blockchain as a software connector, *Journal of Systems and Software*, 151, 21–42.

Yaşa, A.A., 2022, Kamu sektöründe blok zincir teknolojisi kullanımı: Türkiye'de mevcut durum analizi, *Yaşar Üniversitesi E-Dergisi*, 17(66), 615–633, doi:10.19168/jyasar.1065406.

Yaga, D., Mell, P., Roby, N. and Scarfone, K., 2018, Blockchain technology overview, *NIST Internal Report 8202*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg.

Yermack, D., 2017, Corporate governance and blockchains, *Review of Finance*, 21(1), 7–31.

Yıldız, A., 2021, Blokzincir teknolojisi ile merkezi ve dağıtık veri tabanının karşılaştırılması, *International Journal of Informatics Technologies*, 3(1), 25–40.

Yıldız, B. ve Doğan, H., 2022, Blokzincir teknolojisinin eğitim yönetimi ve politika yapımı süreçlerindeki potansiyeli, *Eğitim Bilimleri Araştırmaları Dergisi*, 11(3), 78–95.

Yıldızbaşı, A. ve Üstünyer, P., 2019, Tarımsal gıda tedarik zincirinde blokzincir tasarımı: Türkiye'de hal yasası örneği, *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 21(21), 458–465, doi:10.24011/barofd.584025.

Yıldızbaşı, A. and Üstünyer, P., 2019, Blockchain design in agricultural food supply chain: example of marketplace law in Turkey, *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 21(21), 458–465, doi:10.24011/barofd.584025.

Türkmen, S.Y. ve Erözel Durbilmez, S., 2019, Blockchain teknolojisi ve Türkiye finans sektöründeki durumu, *Finans, Ekonomi ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 4(1), 30–45, doi:10.29106/fesa.509254.

Yli-Huumo, J., Ko, D., Choi, S., Park, S. and Smolander, K., 2016, Where is current research on blockchain technology? A systematic review, *PLOS ONE*, 11(10), e0163477.

Yoncacı, S., 2022, Blokzincir ile enerji ticareti ve akıllı sözleşmeler, Yüksek Lisans tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı.

Zeleny, M., 1987, Management support systems: towards integrated knowledge management, *Human Systems Management*, 7(1), 59–70.

OpenZeppelin, 2023, *Contracts v4.8 Documentation*, https://docs.openzeppelin.com/contracts/4.x/.

Zeren, S., 2021, Blockchain technology in the tourism sector: smart contracts and their implementation in hotel-customer relations, *Journal of Tourism Innovation*, 12(2), 78–93.

Zeren, S.K., 2020, Finansal ödemeler sisteminde blok zincir uygulamaları: turizm sektöründe akıllı kontratlar dizaynı, Yüksek Lisans tezi, Trakya Üniversitesi.

Zeren, S.K. and Demirel, E., 2020, Turizm endüstrisinde yeni trend: blockchain startup projeleri, *Journal of Tourism Intelligence and Smartness*, 3(2), 169–188.

Zetzsche, D.A., Buckley, R.P., Arner, D.W. and Barberis, J.N., 2019, Regulating LIBRA: the transformative potential of Facebook's cryptocurrency and possible regulatory responses, *University of New South Wales Law Journal*, 42(2), 456–492.

Zetzsche, D.A., Buckley, R.P. and Arner, D.W., 2020, Decentralized finance (DeFi), *Journal of Financial Regulation*, 6(2), 172–203.

Zhao, J.L., Fan, S. and Yan, J., 2016, Overview of business innovations and research opportunities in blockchain and introduction to the special issue, *Financial Innovation*, 2(1), Art. 1.

Zhao, X., Fan, Z. and Ding, Y., 2019, Decentralized energy trading with blockchain in power systems, *Energy and Buildings*, 188, 93–105.

Zhang, Y., Kasahara, S., Shen, Y., Jiang, X. and Wan, J., 2019, Smart contract-based access control for the Internet of Things, *IEEE Internet of Things Journal*, 6(2), 1594–1605.

Zhang, H., Gao, M., Sun, Y., Wang, J. and Li, H., 2020, Blockchain technology for the construction industry: applications, challenges, and opportunities, *Automation in Construction*, 113, 103120.

Zhang, H. and Lee, S.J., 2020, Blockchain applications in the food industry: opportunities and challenges, *Food Control*, 121, 107–116.

Zhang, Y., Wang, K., Sun, Y. and Cao, X., 2020, Blockchain-based energy trading system for smart grid, *Energy*, 200, 117–125.

Zhang, C. and Xue, Y., 2020, An overview of blockchain technology: architecture, consensus, and future trends, in *Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Big Data*, IEEE, 1173–1180.

Zhang, R. and Lee, J.H., 2021, Analysis of the main consensus protocols of blockchain, *ICT Express*, 7(1), 1–7.

Zhang, X., Li, M. and Chen, Y., 2022, Digital identity and blockchain in the airline industry, *Journal of Digital Transformation*, 5(3), 120–138.

Zhang, Y., 2023, Blockchain-based smart contracts for sustainable agricultural supply chains: a systematic review, *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 38, Art. 100925.

Zheng, Z., Xie, S., Dai, H.N., Chen, X. and Wang, H., 2018, Blockchain challenges and opportunities: a survey, *International Journal of Web and Grid Services*, 14(4), 352–375.

Zheng, Z., Xie, S., Chen, X., Dai, H. and Wang, H., 2017, An overview of blockchain technology: architecture, consensus, and future trends, in *6th IEEE International Congress on Big Data*, IEEE, 557–564.

Zheng, Z., Xie, S., Dai, H., Chen, X. and Wang, H., 2018, An overview of blockchain technology: architecture, consensus, and future trends, *Proceedings of the IEEE*, 106(5), 1044–1077.

Zohar, A., 2015, Bitcoin: under the hood, *Communications of the ACM*, 58(9), 104–113.

Zohdi, M., Ahmad, R., Rahim, F.A. and Khalid, N.S., 2020, Blockchain and real estate: applications and impacts, *International Journal of Applied Blockchain*, 7(1), 33–48.

EKLER

EK: Akıllı Kontrat Kodları ve İşlem Geçmişleri

BT Buğday Token –
AT Arpa Token –
MT Mısır Token –

Buğday Token İşlem Geçmişi – Wheat Token Transactions Log -
Arpa Token İşlem Geçmişi - Barley Token Transactions Log -
Mısır Token İşlem Geçmişi – Corn Token Transactions Log -

Contract Name: CommodityToken
Compiler Version v0.8.9+commit.e5eed63a
Contract Source Code (Solidity Standard Json-Input format)
44 Files

```
pragma solidity ^0.8.9;
import "@openzeppelin/contracts/token/ERC20/ERC20.sol";
import "@openzeppelin/contracts/access/Ownable.sol";
import "@openzeppelin/contracts/token/ERC20/extensions/ERC20Burnable.sol";
import "@openzeppelin/contracts/security/Pausable.sol";

//Certificate will be the Owner of this contract.
contract CommodityToken is ERC20, ERC20Burnable, Pausable, Ownable {
    constructor(
        string memory _name,
        string memory symbol
    ) ERC20(_name, symbol) {}

    mapping(address => bool) public blacklist;

    function pause() public onlyOwner {
        _pause();
    }

    function unpause() public onlyOwner {
        _unpause();
    }

    function _beforeTokenTransfer(
        address from,
        address to,
        uint256 amount
    ) internal override whenNotPaused {
        super._beforeTokenTransfer(from, to, amount);
    }

    modifier notBlacklisted(address to) {
        require(!blacklist[msg.sender], "You are blacklisted");
        require(!blacklist[to], "to address is blacklisted");
        _;
```

```
    }

    function mint(address to, uint256 amount) public onlyOwner {
        _mint(to, amount);
    }

    function transfer(
        address to,
        uint256 amount
    ) public override notBlacklisted(to) returns (bool) {
        return super.transfer(to, amount);
    }

    function transferFrom(
        address from,
        address to,
        uint256 amount
    ) public override notBlacklisted(to) returns (bool) {
        require(!blacklist[from], "From address is blacklisted");
        return super.transferFrom(from, to, amount);
    }

    function addToBlacklist(address addr) external onlyOwner {
        require(!blacklist[addr], "Already blacklisted!");
        blacklist[addr] = true;
    }

    function removeFromBlacklist(address addr) external onlyOwner {
        require(blacklist[addr], "Address given is not blacklisted!");
        blacklist[addr] = false;
    }
}


pragma solidity ^0.8.9;

import "./CommodityToken.sol";
import "./Mill.sol";
import "./Trader.sol";
import "@openzeppelin/contracts/token/ERC20/ERC20.sol";
import "@openzeppelin/contracts/token/ERC20/utils/SafeERC20.sol";
import "@openzeppelin/contracts/security/ReentrancyGuard.sol";
import "@openzeppelin/contracts-upgradeable/security/ReentrancyGuardUpgradeable.sol";
import "@openzeppelin/contracts-upgradeable/proxy/utils/Initializable.sol";

contract Manager is ReentrancyGuardUpgradeable {
    using SafeERC20 for IERC20;
    address[] public tokenList;
    address payable public trader;
    address public mill;
    address[6] public authorized;
    mapping(address => bool) public isCommodityToken;
    mapping(address => uint8) public authorizedIndexes; //indicates the index+1 so it doesnt' have
problem with all zeros so authorizedIndexes[address] = index at order+1.
```

```
    mapping(bytes32 => bool[6]) public order; //every element of array indicates the authorized personnel with same index

    event Received(address sender, uint256 value);

    event CommodityContractInit(address commodityContract);
    event MillContractInit(address millContrat);
    event TraderContractInit(address trader);

    event SetSingleToken(
        bytes32 hash,
        address token,
        uint256 index,
        bool isRequest
    );

    event PushSingleToken(bytes32 hash, address token, bool isRequest);

    event SetMill(bytes32 hash, address mill, bool isRequest);

    event ManagerContractChange(bytes32 hash, address manager, bool isRequest);

    event SetTrader(bytes32 hash, address trader, bool isRequest);



    event AddToPeopleGreenlist(bytes32 hash, address added, bool isRequest);

    event RemoveFromPeopleGreenlist(
        bytes32 hash,
        address removed,
        bool isRequest
    );

    event SetTokenGreenlist(
        bytes32 hash,
        address added,
        uint256 limit,
        bool isRequest
    );

    event TransferToken(
        bytes32 hash,
        address to,
        uint256 amount,
        uint256 index,
        bool isRequest
    );

    event SendTokenToTrader(bytes32 hash, uint256 amount, uint256 index);

    event PauseToken(bytes32 hash, uint256 index, bool isRequest);
```

```
event UnpauseToken(bytes32 hash, uint256 index, bool isRequest);

event SetGreenListForTrader(address greenListedAddress, uint256 amount);

event RemoveOrder(bytes32 hash, address sender);

event TransferAnyTokenFromTraderToGreenList(
    bytes32 orderhash,
    address toAddress,
    uint256 amount,
    address tokenAddress
);
event TransferCommodityTokenToThirdPartyFromTrader(
    bytes32 orderhash,
    address toAddress,
    uint256 amount,
    uint256 index
);

event TransferCommodityTokenToMillFromTrader(
    bytes32 orderhash,
    uint256 amount,
    uint256 index
);

event TransferTokenToManagerFromMill(
    bytes32 orderhash,
    uint256 amount,
    uint256 index
);

event TransferTokenToManagerFromTrader(
    bytes32 orderhash,
    uint256 _amount,
    address _tokenAddr
);

event TransferETHToGreenlist(
    bytes32 orderhash,
    address toAddress,
    uint256 amount
);

event TransferETHToManager(bytes32 orderhash, uint256 amount);

event CancelTraderOrder(bytes32 orderhash);

event CancelMillOrder(bytes32 orderhash);

receive() external payable {
    emit Received(msg.sender, msg.value);
}

fallback() external payable {
```

```
        emit Received(msg.sender, msg.value);
    }

    //even if authorized personal changes new assigned address still holds on predecessor's orders
as we check indexes.
    modifier onlyAuthorized() {
        require(authorizedIndexes[msg.sender] != 0, "Not authorized");
        _;
    }

    function initialize(address[6] memory _authorized) public initializer {
        for (uint8 i = 0; i < _authorized.length; i++) {
            address singleAuthorized = _authorized[i];
            require(singleAuthorized != address(0), "Can't be zero address");
            require(
                authorizedIndexes[singleAuthorized] == 0,
                "Already registered as an owner!"
            );
            authorizedIndexes[singleAuthorized] = i + 1;
            authorized[i] = (singleAuthorized);
        }
    }

    function initTokenArray(
        address[] memory _addrArray
    ) external onlyAuthorized {
        require(tokenList.length == 0, "You can only init once!");
        tokenList = _addrArray;
        for (uint8 i = 0; i < _addrArray.length; i++) {
            isCommodityToken[_addrArray[i]] = true;
        }
    }

    function initMill(address _addr) external onlyAuthorized {
        require(mill == address(0), "You can only init once!");
        mill = _addr;
        emit MillContractInit(_addr);
    }

    function initTrader(address payable _addr) external onlyAuthorized {
        require(trader == address(0), "You can only init once!");
        trader = _addr;
        emit TraderContractInit(_addr);
    }

    function _isExecuteReady(
        bytes32 _orderhash,
        uint8 authorizedIndex,
        uint8 requiredConfirmationNumber
    ) internal returns (bool) {
        order[_orderhash][authorizedIndex - 1] = true;
        uint8 confirmation = 0;
        for (uint8 i = 0; i < order[_orderhash].length; i++) {
            if (order[_orderhash][i]) {
```

```
            confirmation++;
        }
    }
    if (confirmation == requiredConfirmationNumber) {
        for (uint8 i = 0; i < order[_orderhash].length; i++) {
            order[_orderhash][i] = false;
        }
        return true;
    }
    return false;
}

function changeManagerContract(address _addr) external onlyAuthorized {
    bytes32 orderhash = keccak256(
        abi.encodePacked("changeManagerContract", _addr)
    );

    emit ManagerContractChange(orderhash, _addr, true);

    if (_isExecuteReady(orderhash, authorizedIndexes[msg.sender], 6)) {
        _changeManagerContract(_addr);
        emit ManagerContractChange(orderhash, _addr, false);
    }
}

function _changeManagerContract(address _addr) internal {
    Mill(mill).changeManager(_addr);
    Trader(trader).changeManager(_addr);
}

function removeAndAddAuthorized(
    address _remove,
    address _add
) external onlyAuthorized {
    require(
        authorizedIndexes[_remove] != 0,
        "Address to get removed is not in the authorized list!"
    );
    require(
        authorizedIndexes[_add] == 0,
        "Address to get added is already authorized!"
    );
    bytes32 orderhash = keccak256(
        abi.encodePacked("removeAndAddAuthorized", _remove, _add)
    );

    emit RemoveAndAddAuthorized(orderhash, _remove, _add, true);

    if (_isExecuteReady(orderhash, authorizedIndexes[msg.sender], 4)) {
        _removeAndAddAuthorized(_remove, _add);
        emit RemoveAndAddAuthorized(orderhash, _remove, _add, false);
    }
}
```

```
function _removeAndAddAuthorized(address _remove, address _add) internal {
    authorizedIndexes[_add] = authorizedIndexes[_remove];
    authorizedIndexes[_remove] = 0;
}


function transferCommodityToken(
    address _to,
    uint256 _amount,
    uint256 _index
) external onlyAuthorized {
    bytes32 orderhash = keccak256(
        abi.encodePacked(
            "transferCommodityToken",
            _to,
            _amount,
            tokenList[_index]
        )
    );

    emit TransferToken(orderhash, _to, _amount, _index, true);

    if (_isExecuteReady(orderhash, authorizedIndexes[msg.sender], 3)) {
        _transferCommodityToken(_to, _amount, tokenList[_index]);
        emit TransferToken(orderhash, _to, _amount, _index, false);
    }
}

function _transferCommodityToken(
    address _to,
    uint256 _amount,
    address _tokenAddress
) internal {
    CommodityToken(_tokenAddress).transfer(_to, _amount);
}

function sendTokenToTraderFromMill(
    uint256 _amount,
    uint256 _index
) external onlyAuthorized {
    bytes32 orderhash = keccak256(
        abi.encodePacked("TransferTokenToTrader", _amount, _index)
    );
    Mill(mill).sendTokenToTrader(_amount, _index);
    emit SendTokenToTrader(orderhash, _amount, _index);
}

function _sendAnyTokenToThirdParty(
    uint256 _amount,
    address _tokenAddr,
    address _addr
) internal {
    IERC20(_tokenAddr).safeTransfer(_addr, _amount);
}
```

```
function sendETHToThirdParty(
    address _addr,
    uint256 _amount
) external onlyAuthorized nonReentrant {
    bytes32 orderhash = keccak256(
        abi.encodePacked("sendETHToThirdParty", _addr, _amount)
    );

    emit SendETHToThirdParty(orderhash, _addr, _amount, true);

    if (_isExecuteReady(orderhash, authorizedIndexes[msg.sender], 3)) {
        _sendETHToThirdParty(_addr, _amount);
        emit SendETHToThirdParty(orderhash, _addr, _amount, false);
    }
}

function _sendETHToThirdParty(address _addr, uint256 _amount) internal {
    payable(_addr).transfer(_amount);
}

function pauseToken(uint256 _index) external onlyAuthorized {
    bytes32 orderhash = keccak256(abi.encodePacked("pauseToken", _index));

    require(
        CommodityToken(tokenList[_index]).paused() == false,
        "Token already paused"
    );

    emit PauseToken(orderhash, _index, true);

    if (_isExecuteReady(orderhash, authorizedIndexes[msg.sender], 4)) {
        _pauseToken(_index);
        emit PauseToken(orderhash, _index, false);
    }
}

Trader(trader).TransferTokenToGreenlist(_amount, _to, _tokenAddr);
    emit TransferAnyTokenFromTraderToGreenList(
        orderhash,
        _to,
        _amount,
        _tokenAddr
    );
}

function transferCommodityTokenToThirdPartyFromTrader(
    address _to,
    uint256 _amount,
    uint256 _index
) external onlyAuthorized {
    bytes32 orderhash = keccak256(
        abi.encodePacked(
            "transferCommodityTokenToThirdParty",
```

```
            _to,
            _amount,
            _index
        )
    );
    Trader(trader).transferCommodityTokenToThirdParty(_amount, _to, _index);
    emit TransferCommodityTokenToThirdPartyFromTrader(
        orderhash,
        _to,
        _amount,
        _index
    );
}

function transferCommodityTokenToMillFromTrader(
    uint256 _amount,
    uint256 _index
) external onlyAuthorized {
    bytes32 orderhash = keccak256(
        abi.encodePacked("transferCommodityTokenToMill", _amount, _index)
    );
    Trader(trader).transferCommodityTokenToMill(_amount, _index);
    emit TransferCommodityTokenToMillFromTrader(orderhash, _amount, _index);
}

function transferTokenToManagerFromMill(
    uint256 _amount,
    uint256 _index
) external onlyAuthorized {
    bytes32 orderhash = keccak256(
        abi.encodePacked("transferTokenToManager", _amount, _index)
    );
    Mill(mill).transferTokenToManager(_amount, _index);
    emit TransferTokenToManagerFromMill(orderhash, _amount, _index);
}

function transferTokenToManagerFromTrader(
    uint256 _amount,
    address _tokenAddr
) external onlyAuthorized {
    bytes32 orderhash = keccak256(
        abi.encodePacked("transferTokenToManager", _amount, _tokenAddr)
    );
    Trader(trader).transferTokenToManager(_amount, _tokenAddr);
    emit TransferTokenToManagerFromTrader(orderhash, _amount, _tokenAddr);
}

}


pragma solidity ^0.8.9;
import "./CommodityToken.sol";
import "./Manager.sol";
import "@openzeppelin/contracts-upgradeable/proxy/utils/Initializable.sol";
```

```
contract Mill is Initializable {
    address payable public manager;

    //Instead of handling it as true or false we are holding the amount so we can have easier and observable mapping at contract level.
    mapping(bytes32 => uint256) public certificate; //Holds amount & if not zero it means it exists & how much amount of commodity its holding.
    mapping(bytes32 => string) public publicInformation;
    mapping(address => bool) public isAuthorized; //to Check if caller is one of the authorized
    mapping(bytes32 => bool) public order;
    mapping(address => bool) public whitelist;
    mapping(bytes32 => bool) public millOrder;
    address[2] public authorized;

    event MintCertificateAndTokenRequested(
        bytes32 certificateDetailsHash,
        uint256 amount,
        uint256 index,
        string publicInformation
    );
    event BurnCertificateAndTokenRequested(
        bytes32 certificateDetailsHash,
        uint256 amount,
        uint256 index,
        string publicInformation
    );
    event MintCertificateAndToken(
        bytes32 certificateDetailsHash,
        uint256 amount,
        uint256 index,
        string publicInformation
    );
    event MintCertificateAndTokenCanceled(
        bytes32 certificateDetailsHash,
        uint256 amount,
        uint256 index,
        string publicInformation
    );

    event RemoveSelf(address removed, address added);

    event MillOrderCanceled(bytes32 orderhash);

    modifier onlyAuthorized() {
        require(isAuthorized[msg.sender], "Not an authorized user!");
        _;
    }
    modifier onlyManager() {
        require(msg.sender == address(manager), "Not a manager");
        _;
    }

    function initialize(
```

```
    address[2] memory _authorized,
    address _manager
) public initializer {
    for (uint8 i = 0; i < _authorized.length; i++) {
        address singleAuthorized = _authorized[i];
        require(singleAuthorized != address(0), "Can't be zero address");
        require(
            !isAuthorized[singleAuthorized],
            "Already registered as an owner!"
        );
        authorized[i] = (singleAuthorized);
        isAuthorized[singleAuthorized] = true;
    }
    manager = payable(_manager);
}

function transferOwnershipOfToken(
    address _addr,
    uint256 _index
) external onlyManager {
    CommodityToken(Manager(manager).tokenList(_index)).transferOwnership(
        _addr
    );
}

function requestTransferTokenToTrader(
    uint256 _amount,
    uint256 _index
) public onlyAuthorized {
    bytes32 orderHash = keccak256(
        abi.encodePacked("TransferTokenToTrader", _amount, _index)
    );
    millOrder[orderHash] = true;
    emit TransferTokenToTraderRequested(
        orderHash,
        msg.sender,
        _amount,
        _index
    );
}

function resetRequestTransferTokenToTrader(
    uint256 _amount,
    uint256 _index
) public onlyAuthorized {
    bytes32 orderHash = keccak256(
        abi.encodePacked("TransferTokenToTrader", _amount, _index)
    );
    millOrder[orderHash] = false;
    emit ResetRequestTransferTokenToTrader(
        orderHash,
        msg.sender,
        _amount,
        _index
```

```
        );
    }

    function sendTokenToTrader(
        uint256 _amount,
        uint256 _index
    ) external onlyManager {
        bytes32 orderHash = keccak256(
            abi.encodePacked("TransferTokenToTrader", _amount, _index)
        );
        require(millOrder[orderHash], "This order is not requested!");
        millOrder[orderHash] = false;
        CommodityToken(Manager(manager).tokenList(_index)).transfer(
            Manager(manager).trader(),
            _amount
        );
        emit TransferTokenToTrader(orderHash, msg.sender, _amount, _index);
    }
}


pragma solidity ^0.8.9;
import "./CommodityToken.sol";
import "./Manager.sol";
import "@openzeppelin/contracts/token/ERC20/ERC20.sol";
import "@openzeppelin/contracts/token/ERC20/utils/SafeERC20.sol";
import "@uniswap/v3-periphery/contracts/interfaces/ISwapRouter.sol";
import "@uniswap/v3-periphery/contracts/libraries/TransferHelper.sol";
import "@uniswap/v3-periphery/contracts/interfaces/INonfungiblePositionManager.sol";
import "@uniswap/v3-core/contracts/interfaces/IERC20Minimal.sol";
import "@uniswap/v3-core/contracts/interfaces/IUniswapV3Pool.sol";

import "@openzeppelin/contracts/security/ReentrancyGuard.sol";
import "@openzeppelin/contracts-
upgradeable/token/ERC721/IERC721ReceiverUpgradeable.sol";
import "@uniswap/v3-core/contracts/libraries/TickMath.sol";
import "@openzeppelin/contracts-upgradeable/proxy/utils/Initializable.sol";
import "@openzeppelin/contracts-upgradeable/security/ReentrancyGuardUpgradeable.sol";

interface wmaticInterface {
    function withdraw(uint wad) external;

    function deposit() external payable;
}

contract Trader is ReentrancyGuardUpgradeable, IERC721ReceiverUpgradeable {
    using SafeERC20 for IERC20;
    ISwapRouter public swapRouter;
    address public nonfungiblePositionManager;
    address public wmaticAddress;
    address payable public manager;
    address payable[] public greenList; //Greenlist is for contracts that might be customized for
Later Interaction with AMMs of different DEXs
    address[2] public authorized;
```

```
    mapping(address => bool) public isAuthorized;
    mapping(address => uint256) greenListIndex; //Holds index + 1 as we need to hold 0 index
too.
    mapping(address => uint256) public tokenGreenList; //Token addresses that can be traded;
    mapping(address => bool) peopleGreenList; //People who can trade on the greenList
    mapping(bytes32 => bool) public traderOrder;

    event TransferTokenToGreenList(
        bytes32 orderhash,
        uint256 amount,
        address tokenAddr,
        address to
    );
    event TransferTokenToGreenListRequested(
        bytes32 orderhash,
        uint256 amount,
        address tokenAddr,
        address to
    );
    event ResetTransferTokenToGreenListRequested(
        bytes32 orderhash,
        uint256 amount,
        address tokenAddr,
        address to
    );

    function initialize(
        address[2] memory _authorized,
        address _manager,
        address _wrapContract
    ) public initializer {
        for (uint8 i = 0; i < _authorized.length; i++) {
            address singleAuthorized = _authorized[i];
            require(singleAuthorized != address(0), "Can't be zero address");
            require(
                !isAuthorized[singleAuthorized],
                "Already registered as an owner!"
            );
            authorized[i] = (singleAuthorized);
            isAuthorized[singleAuthorized] = true;
        }
        manager = payable(_manager);
        swapRouter = ISwapRouter(0xE592427A0AEce92De3Edee1F18E0157C05861564);
        nonfungiblePositionManager = 0xC36442b4a4522E871399CD717aBDD847Ab11FE88;
        wmaticAddress = _wrapContract;
    }

      function swapExactOutputSingle(
        address token1,
        address token2,
        uint256 amountOut,
        uint256 amountInMaximum,
        uint24 poolFee
    ) external onlyAuthorized returns (uint256 amountIn) {
```

```
    require(
        tokenGreenList[token1] > amountIn ||
            Manager(manager).isCommodityToken(token1),
        "Input Token approval amount is too low!"
    );
    require(
        tokenGreenList[token2] > 0 ||
            Manager(manager).isCommodityToken(token2),
        "Out Token is not approved!"
    );
    TransferHelper.safeApprove(
        token1,
        address(swapRouter),
        amountInMaximum
    );

function collectAllFees(
    uint256 tokenId
) external onlyAuthorized returns (uint256 amount0, uint256 amount1) {
    INonfungiblePositionManager.CollectParams
        memory params = INonfungiblePositionManager.CollectParams({
            tokenId: tokenId,
            recipient: address(this),
            amount0Max: type(uint128).max,
            amount1Max: type(uint128).max
        });

    (amount0, amount1) = INonfungiblePositionManager(
        nonfungiblePositionManager
    ).collect(params);
}

function increaseLiquidityCurrentRange(
    uint256 tokenId,
    uint256 amountAdd0,
    uint256 amountAdd1,
    uint256 amountMin0,
    uint256 amountMin1
)
    external
    onlyAuthorized
    returns (uint128 liquidity, uint256 amount0, uint256 amount1)
{
    (
        ,
        ,
        address token0,
        address token1,
    ) = INonfungiblePositionManager(nonfungiblePositionManager).positions(
            tokenId
        );

    TransferHelper.safeApprove(
        token0,
```

```
        address(nonfungiblePositionManager),
        amountAdd0
    );
    TransferHelper.safeApprove(
        token1,
        address(nonfungiblePositionManager),
        amountAdd1
    );

    INonfungiblePositionManager.IncreaseLiquidityParams
        memory params = INonfungiblePositionManager
            .IncreaseLiquidityParams({
                tokenId: tokenId,
                amount0Desired: amountAdd0,
                amount1Desired: amountAdd1,
                amount0Min: amountMin0,
                amount1Min: amountMin1,
                deadline: block.timestamp
            });

    (liquidity, amount0, amount1) = INonfungiblePositionManager(
        nonfungiblePositionManager
    ).increaseLiquidity(params);
}

function decreaseLiquidity(
    uint256 tokenId,
    uint128 liquidityToRemove,
    uint256 amount0Min,
    uint256 amount1Min
) external onlyAuthorized returns (uint256 amount0, uint256 amount1) {
    INonfungiblePositionManager.DecreaseLiquidityParams
        memory params = INonfungiblePositionManager
            .DecreaseLiquidityParams({
                tokenId: tokenId,
                liquidity: liquidityToRemove,
                amount0Min: amount0Min,
                amount1Min: amount1Min,
                deadline: block.timestamp
            });

    (amount0, amount1) = INonfungiblePositionManager(
        nonfungiblePositionManager
    ).decreaseLiquidity(params);
}

function packParameters(
    address[] memory addressesArray,
    uint24[] memory uintArray
) public pure returns (bytes memory) {
    // Calculate the total size needed for the resulting byte array
    uint256 totalSize = addressesArray.length * 20 + uintArray.length * 3;
    bytes memory packedData = new bytes(totalSize);
    uint256 offset;
```

```
        // Pack the arrays dynamically
        for (uint256 i = 0; i < addressesArray.length; i++) {
            bytes20 addrBytes = bytes20(addressesArray[i]);
            for (uint256 j = 0; j < 20; j++) {
                packedData[offset] = addrBytes[j];
                offset++;
            }
        }

        for (uint256 i = 0; i < uintArray.length; i++) {
            bytes3 uintBytes = bytes3(uintArray[i]);
            for (uint256 j = 0; j < 3; j++) {
                packedData[offset] = uintBytes[j];
                offset++;
            }
        }

        return packedData;
    }

    function swapExactInputMultihop(
        uint256 amountIn,
        address[] calldata route,
        uint24[] calldata poolFee
    ) external onlyAuthorized returns (uint256 amountOut) {
        // Ref https://docs.uniswap.org/contracts/v3/guides/swaps/multihop-swaps

        // Approve the router to spend the token.
        TransferHelper.safeApprove(route[0], address(swapRouter), amountIn);

        // Multiple pool swaps are encoded through bytes called a `path`. A path is a sequence of token addresses and poolFees that define the pools used in the swaps.
        // The format for pool encoding is (tokenIn, fee, tokenOut/tokenIn, fee, tokenOut) where tokenIn/tokenOut parameter is the shared token across the pools.
        // Since we are swapping DAI to USDC and then USDC to WETH9 the path encoding is (DAI, 0.3%, USDC, 0.3%, WETH9).

        bytes memory pathCoded = packParameters(route, poolFee);
        ISwapRouter.ExactInputParams memory params = ISwapRouter
            .ExactInputParams({
                path: pathCoded,
                recipient: msg.sender,
                deadline: block.timestamp,
                amountIn: amountIn,
                amountOutMinimum: 0
            });

        // Executes the swap.
        amountOut = swapRouter.exactInput(params);
    }

    function wrapMatic(uint256 _amount) public payable onlyAuthorized {
        wmaticInterface(wmaticAddress).deposit{value: _amount}();
```

```
    }

    function unwrapMatic(uint256 _amount) public onlyAuthorized {
        wmaticInterface(wmaticAddress).withdraw(_amount);
    }
}



pragma solidity ^0.8.9;
import "@openzeppelin/contracts/token/ERC20/ERC20.sol";
import "@openzeppelin/contracts/access/Ownable.sol";
import "@openzeppelin/contracts/token/ERC20/extensions/ERC20Burnable.sol";
import "@openzeppelin/contracts/security/Pausable.sol";

contract WheatToken is ERC20, ERC20Burnable, Pausable, Ownable {
    constructor() ERC20("WheatToken", "ABT") {}

    mapping(address => bool) public blacklist;

    function pause() public onlyOwner {
        _pause();
    }

    function unpause() public onlyOwner {
        _unpause();
    }

    function _beforeTokenTransfer(
        address from,
        address to,
        uint256 amount
    ) internal override whenNotPaused {
        super._beforeTokenTransfer(from, to, amount);
    }

    modifier notBlacklisted(address to) {
        require(!blacklist[msg.sender], "You are blacklisted");
        require(!blacklist[to], "to address is blacklisted");
        _;
    }

    function mint(address to, uint256 amount) public onlyOwner {
        _mint(to, amount);
    }

    function transfer(address to, uint256 amount)
        public
        override
        notBlacklisted(to)
        returns (bool)
    {
        return super.transfer(to, amount);
    }
```

```
    function transferFrom(
        address from,
        address to,
        uint256 amount
    ) public override notBlacklisted(to) returns (bool) {
        require(!blacklist[from], "From address is blacklisted");
        return super.transferFrom(from, to, amount);
    }

    function addToBlacklist(address addr) external onlyOwner {
        require(!blacklist[addr], "Already blacklisted!");
        blacklist[addr] = true;
    }

    function removeFromBlacklist(address addr) external onlyOwner {
        require(blacklist[addr], "Address given is not blacklisted!");
        blacklist[addr] = false;
    }
}
```

```
pragma solidity ^0.8.9;
import "@openzeppelin/contracts/token/ERC20/ERC20.sol";
import "@openzeppelin/contracts/access/Ownable.sol";
import "@openzeppelin/contracts/token/ERC20/extensions/ERC20Burnable.sol";
import "@openzeppelin/contracts/security/Pausable.sol";


contract BarleyToken is ERC20, ERC20Burnable, Pausable, Ownable {
    constructor() ERC20("BarleyToken", "AAT") {}

    mapping(address => bool) public blacklist;

    function pause() public onlyOwner {
        _pause();
    }

    function unpause() public onlyOwner {
        _unpause();
    }

    function _beforeTokenTransfer(
        address from,
        address to,
        uint256 amount
    ) internal override whenNotPaused {
        super._beforeTokenTransfer(from, to, amount);
    }

    modifier notBlacklisted(address to) {
        require(!blacklist[msg.sender], "You are blacklisted");
```

```
        require(!blacklist[to], "to address is blacklisted");
        _;
    }

    function mint(address to, uint256 amount) public onlyOwner {
        _mint(to, amount);
    }

    function transfer(address to, uint256 amount)
        public
        override
        notBlacklisted(to)
        returns (bool)
    {
        return super.transfer(to, amount);
    }

    function transferFrom(
        address from,
        address to,
        uint256 amount
    ) public override notBlacklisted(to) returns (bool) {
        require(!blacklist[from], "From address is blacklisted");
        return super.transferFrom(from, to, amount);
    }

    function addToBlacklist(address addr) external onlyOwner {
        require(!blacklist[addr], "Already blacklisted!");
        blacklist[addr] = true;
    }

    function removeFromBlacklist(address addr) external onlyOwner {
        require(blacklist[addr], "Address given is not blacklisted!");
        blacklist[addr] = false;
    }
}



pragma solidity ^0.8.9;
import "@openzeppelin/contracts/token/ERC20/ERC20.sol";
import "@openzeppelin/contracts/access/Ownable.sol";
import "@openzeppelin/contracts/token/ERC20/extensions/ERC20Burnable.sol";
import "@openzeppelin/contracts/security/Pausable.sol";


contract CornToken is ERC20, ERC20Burnable, Pausable, Ownable {
    constructor() ERC20("CornToken", "AMT") {}

    mapping(address => bool) public blacklist;

    function pause() public onlyOwner {
        _pause();
    }
```

```
    function unpause() public onlyOwner {
        _unpause();
    }

    function _beforeTokenTransfer(
        address from,
        address to,
        uint256 amount
    ) internal override whenNotPaused {
        super._beforeTokenTransfer(from, to, amount);
    }

    modifier notBlacklisted(address to) {
        require(!blacklist[msg.sender], "You are blacklisted");
        require(!blacklist[to], "to address is blacklisted");
        _;
    }

    function mint(address to, uint256 amount) public onlyOwner {
        _mint(to, amount);
    }

    function transfer(address to, uint256 amount)
        public
        override
        notBlacklisted(to)
        returns (bool)
    {
        return super.transfer(to, amount);
    }

    function transferFrom(
        address from,
        address to,
        uint256 amount
    ) public override notBlacklisted(to) returns (bool) {
        require(!blacklist[from], "From address is blacklisted");
        return super.transferFrom(from, to, amount);
    }

    function addToBlacklist(address addr) external onlyOwner {
        require(!blacklist[addr], "Already blacklisted!");
        blacklist[addr] = true;
    }

    function removeFromBlacklist(address addr) external onlyOwner {
        require(blacklist[addr], "Address given is not blacklisted!");
        blacklist[addr] = false;
    }
}
```

//Wheat Token Transactions Log

0x5cb26ac89a...	Swap	54463980	288 days ago	0xE6ff7aA2...5f37f2a67		0xf081470f...409DcdD67	18.610712526836936536
0xa071603107...	Swap	54463841	288 days ago	0xf081470f...409DcdD67		0xD9d7ab6c...E1c7b7199	19.117347614412139007
0xa071603107...	Swap	54463841	288 days ago	0xE6ff7aA2...5f37f2a67		0xf081470f...409DcdD67	19.117347614412139008
0x7b07995ce4...	Transfer	54297410	292 days ago	0x25F5B457...8Cb6834aC		0x573496Df...b67b6f7Df	27,000
0x105f26afbdf...	Transfer	54296580	292 days ago	0x573496Df...b67b6f7Df		0x25F5B457...8Cb6834aC	27,000
0xf35f3ba612f...	Transfer	54296477	292 days ago	0x25F5B457...8Cb6834aC		0x573496Df...b67b6f7Df	1,366
0x2113fc32724...	Transfer	54295644	292 days ago	0x573496Df...b67b6f7Df		0x25F5B457...8Cb6834aC	1,350
0x0a3e5713ee...	Mint Auth	54289770	292 days ago	Null: 0x000...000		0xb30e0f05...C6997B058	23,000
0x1506c0b49d...	Burn Auth	54288701	292 days ago	0xb30e0f05...C6997B058		Null: 0x000...000	50,000
0x1666ad9092...	Transfer Com...	54288540	292 days ago	0x1F886a39...55533ab06		0xb30e0f05...C6997B058	50,000
0x3803497ec2...	Transfer	54223669	294 days ago	0x573496Df...b67b6f7Df		0x25F5B457...8Cb6834aC	16
0x81bdd22aac...	Transfer	52619201	335 days ago	0x59ACC2B5...9B6F7Ce87		0x573496Df...b67b6f7Df	17,000
0xc634fa37fa2...	Transfer	52617401	335 days ago	0xeD6976d2...e14965557		0x59ACC2B5...9B6F7Ce87	17,000
0x249646094e...	Transfer	52395233	341 days ago	0x25F5B457...8Cb6834aC		0x573496Df...b67b6f7Df	85,000
0x767ac8e9d6...	Transfer Toke...	48582912	438 days ago	0xb30e0f05...C6997B058		0x1F886a39...55533ab06	1,000
0xf9f9e26772f...	Mint Auth	48582790	438 days ago	Null: 0x000...000		0xb30e0f05...C6997B058	1,000
0x5abca2cd75f...	Burn Auth	48484725	441 days ago	0xb30e0f05...C6997B058		Null: 0x000...000	50,000
0xfe48f67d884...	Burn Auth	48483850	441 days ago	0xb30e0f05...C6997B058		Null: 0x000...000	50,000
0xdec9255f558...	Burn Auth	48483224	441 days ago	0xb30e0f05...C6997B058		Null: 0x000...000	50,000
0xdc592ef19dd...	Mint Auth	48482788	441 days ago	Null: 0x000...000		0xb30e0f05...C6997B058	50,000
0xe5db2b749f2...	Mint Auth	48482772	441 days ago	Null: 0x000...000		0xb30e0f05...C6997B058	50,000
0x77f7d79d616...	Mint Auth	48482761	441 days ago	Null: 0x000...000		0xb30e0f05...C6997B058	50,000
0x9c8eab62dd...	Execute	48446124	442 days ago	0xE4DE7659...BB9cF5839		0xE6ff7aA2...5f37f2a67	17,124.736661374915637626
0x9c8eab62dd...	Execute	48446124	442 days ago	0xE4DE7659...BB9cF5839		0x27EAb40d...939A71e65	16,042.614047607481057495
0x66e60b4a97...	Transfer Com...	48445841	442 days ago	0x1F886a39...55533ab06		0xE4DE7659...BB9cF5839	49,877
0xb0b57bc347...	Transfer Toke...	48445689	442 days ago	0xb30e0f05...C6997B058		0x1F886a39...55533ab06	49,877
0x3ef43e837f0...	Transfer Com...	48445544	442 days ago	0x1F886a39...55533ab06		0xE4DE7659...BB9cF5839	123

//Barley Token Transactions Log

0xee4cb1447b...	Transfer	64748695	26 days ago	0x51C30f44...25920E21B	0xE00A2a3F...73bB6CAdA	10
0x54a0fb72a6e...	Burn Auth	62857555	73 days ago	0xb30e0f05...C6997B058	Null: 0x000...000	10
0x6660de1b27...	Mint Auth	62857362	73 days ago	Null: 0x000...000	0xb30e0f05...C6997B058	10
0x11479f5025b...	Transfer Com...	62783385	75 days ago	0x1F886a39...55533ab06	0x2E3A5Ea8...2a6aE224c	99,990
0xb012f3008db...	Transfer Com...	62782402	75 days ago	0x1F886a39...55533ab06	0x2E3A5Ea8...2a6aE224c	10
0x03e734d02a...	Burn Auth	60657341	128 days ago	0xb30e0f05...C6997B058	Null: 0x000...000	1
0x2e67a7f2a05...	Transfer Com...	60657135	128 days ago	0x1F886a39...55533ab06	0xb30e0f05...C6997B058	1
0xfa116914576...	Transfer Toke...	60623723	129 days ago	0xb30e0f05...C6997B058	0x1F886a39...55533ab06	1
0x8af4716f881...	Mint Auth	60623555	129 days ago	Null: 0x000...000	0xb30e0f05...C6997B058	1
0xe02bc232eaf...	Transfer	57995134	195 days ago	0xb8ED08AF...1E1B86F60	0xEa6b52b6...cab1F3784	0.02
0x6838f4647ab...	Transfer	57995110	195 days ago	0xb8ED08AF...1E1B86F60	0x205511b5...591a3FdeA	0.01
0x98d7c3cc45...	Transfer	57995072	195 days ago	0xb8ED08AF...1E1B86F60	0x1EB76F25...C6677529F	0.01
0x13fc0ca66f8...	Transfer	57995066	195 days ago	0xb8ED08AF...1E1B86F60	0x51f62333...e8d996A36	0.01
0x2f9a2b5b74d...	Transfer	51614522	361 days ago	0x2E3A5Ea8...2a6aE224c	0x1F886a39...55533ab06	100,000
0x5a225bf0f84...	Transfer Com...	49379282	418 days ago	0x1F886a39...55533ab06	0x2E3A5Ea8...2a6aE224c	100,000
0xa9f4bc7756b...	Transfer Toke...	49378642	418 days ago	0xb30e0f05...C6997B058	0x1F886a39...55533ab06	100,000
0x03320b52af8...	Mint Auth	49378283	418 days ago	Null: 0x000...000	0xb30e0f05...C6997B058	100,000
0x5e2de90d52...	Execute	48758575	434 days ago	0x6aC22116...19ae0274f	0xE4DE7659...BB9cF5839	20.653821332647727342
0x2b2b8033ad...	Execute	48758526	434 days ago	0x6aC22116...19ae0274f	0xE4DE7659...BB9cF5839	4.141985806649176898
0x47c87ce5ba...	Mint	48757496	434 days ago	0x51C30f44...25920E21B	0x6aC22116...19ae0274f	500.999632802061658768
0xc8c919e37cf...	Transfer Com...	48754721	434 days ago	0x1F886a39...55533ab06	0x51C30f44...25920E21B	1,000
0xb7fcb069ded...	Burn	48741531	434 days ago	0xE4DE7659...BB9cF5839	Null: 0x000...000	139,801.206

//Corn Token Transactions Log

Transaction Hash	Method	Block	Age	From	To	Amount
0xdbf6649555c...	Transfer Toke...	48593347	438 days ago	0xb30e0f05...C6997B058	0x1F886a39...55533ab06	100,000
0xccbc6d3ff57...	Burn Auth	48593311	438 days ago	0xb30e0f05...C6997B058	Null: 0x000...000	5,000
0x5c2e1b82d7...	Mint Auth	48593266	438 days ago	Null: 0x000...000	0xb30e0f05...C6997B058	5,000
0xb2b8fe6e684...	Mint Auth	48593218	438 days ago	Null: 0x000...000	0xb30e0f05...C6997B058	5,000
0x55fbe677ce5...	Mint Auth	48593203	438 days ago	Null: 0x000...000	0xb30e0f05...C6997B058	30,000
0x2f4993d3f97...	Mint Auth	48593186	438 days ago	Null: 0x000...000	0xb30e0f05...C6997B058	20,000
0x8501351b54...	Mint Auth	48593145	438 days ago	Null: 0x000...000	0xb30e0f05...C6997B058	40,000
0x64d3798c83...	Mint Auth	48592960	438 days ago	Null: 0x000...000	0xb30e0f05...C6997B058	5,000
0x46dfd836449...	Transfer Com...	48589593	438 days ago	0x1F886a39...55533ab06	0x2E3A5Ea8...2a6aE224c	1,000
0xebce46ead4...	Transfer Toke...	48582944	438 days ago	0xb30e0f05...C6997B058	0x1F886a39...55533ab06	1,000
0xbe57c81fd5c...	Mint Auth	48582816	438 days ago	Null: 0x000...000	0xb30e0f05...C6997B058	1,000
0x674c852ebb...	Burn Auth	48483903	441 days ago	0xb30e0f05...C6997B058	Null: 0x000...000	50,000
0x7c2da5a9d3...	Burn Auth	48483884	441 days ago	0xb30e0f05...C6997B058	Null: 0x000...000	50,000
0xeda908556d...	Mint Auth	48482896	441 days ago	Null: 0x000...000	0xb30e0f05...C6997B058	50,000
0x463179c1fd0...	Mint Auth	48482878	441 days ago	Null: 0x000...000	0xb30e0f05...C6997B058	50,000
0xeed97a3b4f2...	Execute	48447040	442 days ago	0xE4DE7659...BB9cF5839	0x8B533831...141DB3d08	18,871.24454317309576845
0xeed97a3b4f2...	Execute	48447040	442 days ago	0xE4DE7659...BB9cF5839	0xcC5b6546...0aaDEd3D7	22,156.018003871273212732
0x6e6171408b...	Transfer Com...	48446769	442 days ago	0x1F886a39...55533ab06	0xE4DE7659...BB9cF5839	50,000
0xaf87bde4798...	Transfer Toke...	48446662	442 days ago	0xb30e0f05...C6997B058	0x1F886a39...55533ab06	50,000
0x7614570b3d...	Mint Auth	48446577	442 days ago	Null: 0x000...000	0xb30e0f05...C6997B058	50,000

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Demir Murat Aksoy
Doğum Yeri	
Doğum Tarihi	
Uyruğu	☑ T.C. ❒ Diğer:
E-Posta Adresi	
Web Adresi	

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	Bilgisayar Mühendisliği

Yüksek Lisans	
Üniversite	The University of Sheffield, UK
Enstitü Adı	Management
Anabilim Dalı	Management
Programı	Master of Business Administration

Doktora	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Enformatik Anabilim Dalı
Programı	Enformatik Programı

Makale ve Bildiriler

The Journal of Applied Engineering and Agriculture

(Uygulamalı Mühendislik ve Tarım Dergisi)

July 2025

Tokenization of Real World Assets:
An Agricultural Token System Implementation
Based on Blockchain Architecture

DEMİR MURAT AKSOY[1], Prof. Dr. ZÜMRÜT ECEVİT SATI[2]
1. Enformatik Bölümü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye. Email: demir.aksoy@outlook.com
2. İşletme Bölümü, Siyasal Bilgiler Fakültesi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Turkey. Email: zsati@istanbul.edu.tr