



Gıda Güvenliği için bir Model Önerisi ve Gerçekleştirilmesi: Nesnelerin İnterneti ve İnsan etkileşimli, Öbek Zinciri Üzerinde Çalışan Gıda Üretimi Kontrolü

A Model Proposal and Implementation for Food Safety: Internet of Things and Human interactive, Blockchain- Powered Food Production Control

Selçuk YAZAR

Kırklareli Üniversitesi
Yazılım Mühendisliği Bölümü
Kırklareli/Türkiye
selcukyazar@klu.edu.tr
ORCID:0000-0001-6567-4995

Bora ASLAN

Kırklareli Üniversitesi
Yazılım Mühendisliği Bölümü
Kırklareli/Türkiye
bora.aslan@klu.edu.tr
ORCID:0000-0002-8069-8204

Deniz TAŞKIN

Trakya Üniversitesi
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Edirne, Türkiye
deniztaskin@trakya.edu.tr
ORCID: 0000-0001-7374-8165

Öz

Öbek zinciri ve buna bağlı olarak akıllı kontrat uygulamaları, finans, üretim, eğlence, sanat gibi birçok sektörde giderek artan bir ağırlıkta yer bulmaktadır. Gıda ve gıda arzı güvenliği ise, önümüzdeki on yıl içerisinde tüm dünya için kritik bir öneme sahip olacağı görülmektedir. Bu çalışmada, gıda güvenliğine yönelik olarak öbek zinciri uygulamalarının ve nesnelerin interneti uygulamalarının bir arada yer aldığı bir uygulama modeli önerilmiştir. Her ne kadar gelişen iletişim ve yazılım teknolojileriyle beraber birçok süreç otonom olarak yürüde özellikle tarımsal gıda üretiminde insan bilgisine ve öngörüsüne duyulan ihtiyaç modelin geliştirilmesinde temel bir bileşen olarak bu çalışmada yer almıştır. Özellikle işlem bedeli üzerinden ve olası doğal gereksinimler de göz önüne alınarak önerilen modelin hangi şartlarda daha iyi sonuç vereceği konusunda da öneri ve sonuçlar paylaşılmıştır.

Anahtar sözcükler: Öbek zinciri, akıllı kontrat uygulamaları, LoRaWAN ağları, gıda güvenliği, programlama

Abstract

Blockchain and accordingly smart contract applications are increasingly takes place in many sectors such as finance, production, entertainment and art. It is seen that food and food supply security will have a critical importance for the whole world in the next decade. In this study, we proposed an application model for food safety in which Blockchain applications and IoT applications are combined. Although many processes run autonomously with the developing communication and software technology, the need for human knowledge and foresight in food production, especially in agriculture, has been included in our work as a fundamental component in the development of our model. We shared our suggestions and results on the conditions under which the proposed model would yield better results, especially considering the transaction fee and possible requirements.

Keywords: Blockchain, smart contract applications, LoRaWAN networks, food safety, programming

1. Giriş

Gıda güvenliği küresel anlamda gelecekte toplumlara etkileyecek önemli bileşenlerden biri olacaktır. Özellikle

Covid-19 salgını ve sonrasında ve bununla birlikte Rusya'nın Ukrayna'yı işgali ile temel gıda gereksinimine ait riskler daha da ortaya çıktı. Gıda güvenliğinin, Gıda ve Tarım Örgütü (The Food and Agriculture Organization -FAO) 'ne göre tanımı, aslında bu konuda modern toplumun endişe duyduğu güçlükleri işaret etmektedir. Bu tanıma göre tüm insanlar, aktif ve sağlıklı bir yaşam için beslenme ihtiyaçlarını ve gıda tercihlerini karşılamak için her zaman yeterli, güvenli ve besleyici gıdaya fiziksel, sosyal ve ekonomik erişime sahip olmalıdır. Gıda güvenliğini belirleyen temel faktörler yeterli, güvenli ve besleyici gıdaya erişimin sağlanması olarak sıralanabilir. FAO 2021 raporunda [1] yetersiz beslenme ve açlık görülen insan sayısında son yıllarda artış olduğu görülmektedir. Genelde az gelişmiş ülkelerin bulunduğu bu durum Covid-19 salgınıyla bağlantılı olsa da her zaman tüm dünya nüfusunu etkileme potansiyeline sahiptir.

Gıdanın beklenildiği gibi özelliklere sahip olması hep yetiştirilmesi hem de transferi başlıklarını önemli hale getirmektedir. Bugün gıdanın üretilmesi esnasında özellikle de hassas tarım uygulamalarıyla birlikte, doğal kaynaklara duyarlı ve gıda kirleticilerinin minimum olarak kullanıldığı birçok teknoloji kullanılmaktadır. Benzer şekilde gıdanın taşınması esnasında da özelliklerini kaybetmemesi için kullanılacak yöntemlerle ilgili sürekli yeni teknikler geliştirilmektedir.

Artan nüfus baskısı nedeniyle toplumlar, özellikle artan tahıl ihtiyaçlarını diğer ülkelerden sağlamaktadırlar. Bu nedenle hem hükümetler hem de toplumlar için, tükettikleri gıdanın kendi diyetlerine ya da kendi ülkelerinde yetişenler kalitesinde olması beklentisi ön plana çıkmaktadır. Bunun için çeşitli kontrol mekanizmaları hali hazırda uygulansa da yaşanan aksaklıklar hem tüketici hem de üretici için sorun yaratmaktadır.

Bu çalışmada gıda üretiminden taşınma sürecine kadar olan zamanda gıda güvenliği ile ilgili bilgilerin sağlıklı şekilde toplanarak kayıt altına alınacağı yeni bir model önerilmiştir. Bu modelde, ortaya konan bağımsız gıda denetçisi ve IoT (Internet of Things) cihazlarının ortak etkileşimiyle öbek zinciri üzerinde kullanılacak bir akıllı kontrat uygulaması bulunmaktadır. Model önerisiyle birlikte üretim süreçlerinin sağlıklı ve inkâr edilemez şekilde hem denetçiler hem üreticiler hem de ağ geçidi cihazlarının puanlama sistemiyle kontrol edileceği bir yaklaşım sunulmuştur. Ortaya konan yaklaşımla birlikte, gıdaların yetiştirilmesi esnasında sağlanacak denetim ile israfın da önlenmesi ve üretim sürecinin izlenebilirlik ve güvenilirliğinin denetlenebilmesi beklenmektedir.

Bu makale şu şekilde düzenlenmiştir: 1. Bölüm bu araştırmanın bağlamını anlatmaktadır. 2. Bölüm araştırma için geliştirilen modele ait kullanılan teknolojiler anlatılmıştır. 3. Bölüm gıda güvenliği ve bileşenlerini içermektedir. 4. Bölüm önerilen modele ait kavram kanıtını ve geliştirilen senaryoyu göstermektedir. 5. Bölümde deney sonuçları ve sonuçlara ait bazı değerlendirmeler bulunmaktadır. 6. Bölümde ise elde edilen sonuçlara ait öneriler vardır.

2. Teknolojik Arka Plan

2.1 Öbek Zinciri ve Akıllı kontrat

Öbek zinciri teknolojisi ilk olarak 2008 yılında Bitcoin dijital para birimini açıklayan Satoshi Nakamoto takma isimli biri tarafından duyurulmuştur [2]. Temelde öbek zinciri uygulaması dağıtık ve karşılıklı olarak doğrulanabilir bir veri tabanı ve sayısal bir ana defter (Ledger) teknolojisidir. Öbek zincirinde gerçekleştirilen ana işlem, veri blokları oluşturulması ve bunların birbirine kriptografik yöntemlerle bağlanmasıdır. Zincir içerisinde oluşturulan ve saklanan bloklar ayrıca zaman damgası kullanılarak da birbirlerine bağlıdır. Her bir blok, peer-to-peer ağı üzerinde sürekli oluşturulup yayınlanır ve doğrulanır böylece adem-i merkeziyetçi ve zarar verici girişimlere karşı dayanıklı bir yapı sağlanmış olur. Bloklar bir bakımdan işlem (transaction) kümesi olarak da tanımlanabilirler. Öbek zinciri içindeki her bir blok, kendinden bir önceki bloğun hash bilgisine de sahiptir. Hash, bir girdiyi sabit uzunlukta bir çıktıya dönüştüren matematiksel işleme denir. Öbek zincirinde girdi hem o anki bloktaki işlem hem de bir önceki bloğun bilgisidir.

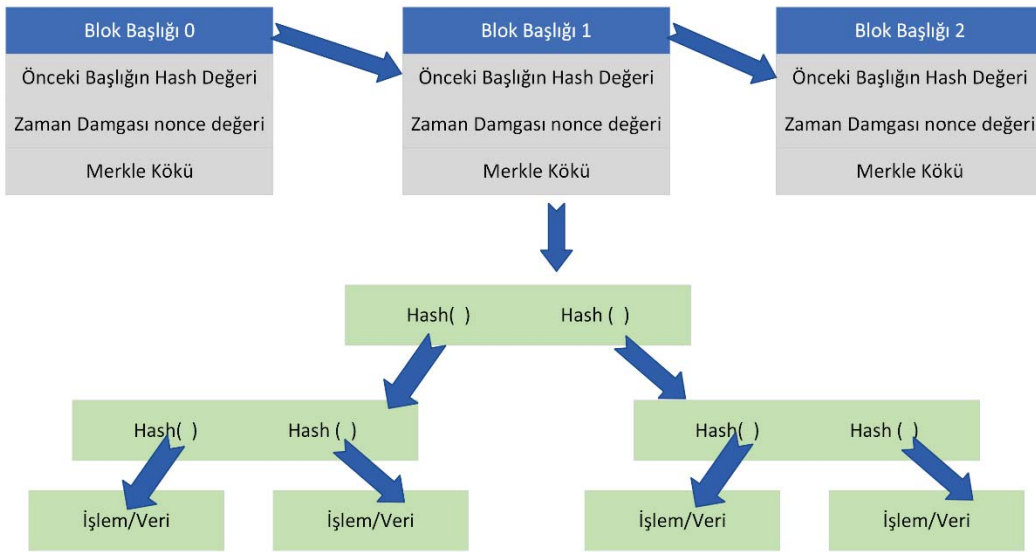
Bugün Öbek zinciri teknolojisinin ve uygulamalarının tarihsel olarak üç versiyona ayırabiliriz. Öbek zinciri 1.0 daha çok Bitcoin sanal para birimiyle ilgili olan versiyondur denebilir. 2.0 versiyonu ile daha çok günümüzde giderek artan bir ilgiyle programlanabilir finans yapısı öne çıkmaktadır. Akıllı kontrat uygulamalarıyla birlikte bu versiyonda, DApp (Merkeziyetsiz uygulamalar), DeFi (Merkeziyetsiz Finans) gibi finansal ve benzeri uygulamalar sıklıkla kullanılmaktadır. 3.0 versiyonu ise daha çok toplumsal aktivitelerin programlanabilmesi yönünde seçenekler sunmaktadır.

Öbek zincirinin merkeziyetsiz yapısına rağmen farklı türlerde uygulamaları da mevcuttur. Bunlar Herkese Açık, Konsorsiyum ve Özel olmak üzere tanımlıdır. Herkese Açık zincirlerde herhangi bir kurum veya bireysel kullanıcı açık bir Öbek zincirine katılabilir. Buradaki dijital defterler açık olduğundan ağı içindekiler blokları doğrulayabilir ve yeni blok ekleyebilirler. Bu yönüyle blok bilgileri tamamen internet üzerinde dağıtık ve kısıtlama ya da sansüre karşı oldukça dayanıklıdır. Herkese Açık zincir içindeki tüm kullanıcılar mutabakat sürecine katkı sağlarlar. Konsorsiyum tipindeki Öbek zinciri uygulamalarında çok merkezli bir yapı benimsenmiştir. Katılımcılara ait düğümler belirli koşullarla önceden belirlenir ve kimliklendirme yapılır. Böylece düğümlerin kontrol yetkileri de belirlenebilir. Özel zincirler ise Öbek zincirinin temel özelliğinin aksine zayıf bir adem-i merkeziyetçiliğe sahiptir ancak yine de dağıtık bir yapıdadır. Burada merkezi bir denetleyici ağı katılacak üyeleri ve doğrulama yapacak üyeleri kendi kuralları kapsamında belirleyebilir.

Bir Öbek zinciri oluşturulurken ilk yaratılan blok Genesis blok olarak adlandırılır. Genesis bloğunda Öbek zincirinin çalışması ve diğer blokların üretilmesine yönelik olarak temel bilgiler yer alır. Genesis blok aynı zamanda blok başlığı olarak da ifade edilir. Bu ilk blok, Merkel Ağacı, Madenci Zorluğu, hash değeri, Zaman damgası ve Nonce(Number Only Used Once) gibi değerleri içerir. Genesis bloğundaki hash bilgisi ya da modülü

ağ üzerindeki olası takas ve işlemleri belirten bir kimlik bilgisidir. Bu hash değeri ile birlikte kullanılan Nonce bileşeni işe, ağdaki işlemler için kullanılacak Herkese Açık ve Özel anahtarın parçası olduğu bir yapı oluştururlar. Nonce değeri rastgele üretilir ve genel olarak Bitcoin ağındaki zorluk derecesiyle ilgilidir. Zaman Damgası modülü, ağdaki her madencide bulunan dağıtılmış zamansal veri tabanını garanti eder. Öbek zinciri ağındaki PoW (Proof of Work) algoritması bu zaman verisini okuyarak bir mutabakat oluşturur. Merkle ağacı bileşeni ise öbek zinciri içindeki blokların kökünü ve geçmişinin bilinmesini sağlar. Bu özellik sayesinde çok sayıda veriyi, yapısını ve bilgilerini açığa çıkarmadan doğruluğunu kanıtlayan bir karakter dizisine dönüştürür. Bu sayede verilerin tamamını güvenle saklayarak erişime açar. Öbek zinciri ve Bitcoin'den önce de kullanılan bir güvenlik yöntemidir.

Genesis bloktan sonraki bloklar belirli bir süre içindeki tüm işlemleri, önceki bloğun hash değerini, nonce ve zaman damgası bilgilerini içerir. Blokların üretilmesi esnasında, yeni bloğa zaman damgası eklendikten sonra ağdaki tüm taraflar bilgileri saklar ve aynı anda doğrulanır. Ardından ortalama her 10 dakikada bir ağ kaydı oluşturmak için bu işlemler onaylanır. Öbek zincirinde kendinden önceki verilerin kurcalanmasını önleyen SHA-256 (Secured Hash Algorithm) tek yönlü algoritması kullanılır. Bilindiği gibi SHA-256 gibi hash algoritmalarında bir hash değerinden mesajın geriye doğru elde edilmesi imkânsızdır. Ayrıca girdi mesajındaki herhangi bir değişiklik otomatik olarak çıktı değerini tamamen değiştirir. Bununla birlikte farklı girdiler için aynı hash değeri elde edilemez. Bu özellikler, Öbek zinciri ağının dağıtık olmasıyla birleştiğinde ağın tamamen güvenli olduğu söylenebilir. Öbek zincirinin çalışma mantığı basitçe Şekil 1' de gösterilmiştir.



Şekil-1: Temel haliyle Öbek zinciri işleyişi ve blokların yapısı.

Bugün Öbek zinciri teknolojinin dört temel dayanak noktası vardır. Bunlar kriptografi, ana defter, akıllı kontrat ve mutabakat algoritmalarıdır. Öbek zincirinin yapısı bir blok ağacıdır ve burada bahsedilen mutabakat algoritması, ağacın kökten (genesis bloğu) yaprağa (en son blok) kadar doğrulanmış bir yolu tanımlar. Bu doğrulanmış yolun oluşması için PoW olarak adlandırılan yüksek zorluk derecesinde matematiksel veya kriptografik bir problem ile sağlanır. PoW doğrulamasının yüksek işlem gücü gerektirmesi ve özellikle Bitcoin ağında bunun için 10 dakika şartı bulunması, birçok alternatif ağ oluşturulmasına yol açmıştır. Bu ağlar daha farklı mutabakat algoritmalarıyla daha hızlı ve daha az işlem gücü gerektiren yöntemleri kullanmaktadır. PoW'ün yüksek maliyeti yanında diğer alternatif doğrulama yöntemleri PoS (Proof of Stake) ve DPOS (Delegated Proof of Stake) tir [3].

Günümüzde özellikle Ethereum ağında popüler olan akıllı kontrat uygulamaları [4], Bitcoin ve Öbek zincirinden çok önce ortaya atılmış bir fikirdir [5]. Genel tanım olarak, bir Öbek zincirinde ve benzer dağıtık bir yapıdaki sabitlenmiş bir komut dosyasını ifade eder. Öbek zinciri aği içinde bir işlem tarafından tetiklenir ve doğrulandığında önceden tanımlanmış eylemleri yürütür. Akıllı sözleşmenin içeriği ve

bileşenleri Öbek zinciri içerisinde açık ve şeffaf bir şekilde saklandığından ilgili taraflar arasında güven ilişkisinin kurulmasını sağlar. Bu güven, akıllı kontratlar ağ içinde kriptografik olarak değişmezliği doğrulanmış olduğundan dolayı da sağlanır. Akıllı kontratlar merkezi olmayan programlardır ve dağıtılmış defter kullanımının bir uzantısı olduğu söylenebilir. Üçüncü bir tarafın etkisi olmadan eşler arasındaki değer transferi veya benzeri doğrulama gerektiren uygulamalarda akıllı kontratlar oldukça tatmin edici bir çözüm sunarlar. Kontrat içinde tanımlanmış koşullar otonom olarak yürütülür ve taraflar arasındaki hizmet eylemleri kâğıt üzerinden dijital ortama aktarılmış olur. Yukarıda özetlenen yönler Öbek zinciri tabanlı akıllı kontratların temel özelliklerini anlatmaktadır. Doğal olarak akıllı kontratlarda da sorunla karşılaşmak olasıdır. Ancak Öbek zincirinin dağıtık yapısı nedeniyle ağ içindeki bir kontratta meydana gelen hatayı düzeltmek kolay değildir. Bu yüzden kontrat tasarımı ve denetimi önemli bir konudur. Her ne kadar bazı güçlükler de işerse bugün Ethereum ağlarında inanılmaz bir sayıda kontrat üretilmektedir.

Öbek zinciri teknolojisinde her ne kadar yazılım bileşenleri ve teknolojileri öne çıksa da burada bir diğer önemli bileşen

ağdaki düğümler ve bunların işlevleridir. Öbek zinciri ağın entegrasyon aşamasında ağ düğümlerinin görevleri kullanım seçenekleri farklılık göstermektedir. Öbek zinciri ağındaki en yaygın düğüm türü Madenci olarak adlandırılır. Bu düğümler, mutabakat algoritmalarını kullanarak finansal fayda elde eden hesaplama gücü yüksek bileşenlerdir. Tam düğümler ise, tüm Öbek zinciri verisini saklarlar ve sürekli olarak ağdaki işlemlerin doğruluğunu ve bütünlüğünü kontrol ederler. Doğal olarak bu düğümler de yeterli seviyede hesaplama ve depolama alanına sahip olmalıdırlar.

2.2 Düşük Güçlü Geniş Alan Ağları

Bitki yetiştirmeye dayalı gıda üretimi kırsal kesimde yapıldığı için bu alanlardaki temel teknolojik gereksinimlerde biri de iletişimdir. Bugün insan faaliyetlerinin sürdüğü çoğu yerde iletişim problemi olmamasına rağmen, gelişmekte olan ülkelerde ve bazı coğrafi nedenlerden ötürü ekim yapılan alanlarda iletişim sorunları yaşanmaktadır. IoT 'un popülerleşen uygulama alanlarından biri de tarımsal üretim ve sulamadır. IoT'in sağladığı birbirine bağlı duyarlar ve her yerde (ubiquitous) hesaplama gücüyle, özellikle bitki yetiştirmede verimin ve güvenliğin sağlanması konusunda oldukça fazla aşama kaydedilmiştir. Kablosuz iletişim ihtiyaçlarını karşılamak üzere birçok teknoloji tarımsal üretimde yardımcıdır. Hücresel haberleşme ilk akla geleni olmakla birlikte, LPWAN (Low Power Wide Area Networks) teknolojileri de çok tercih edilendir. Hücresel iletişimde güç tüketimi nispeten fazla olduğundan, kırsal alanlarda enerji ihtiyacına yönelik uygulamalar, erişim sorunları nedeniyle maliyeti arttırmaktadır. Bu da IoT paradigmasındaki düşük güç tüketimi ve düşük maliyet gereksinimleriyle uyumsuz. Ayrıca genelde algılama katmanı olarak adlandırılan, sahadaki duyarlardan elde verilerin boyutu nispeten küçük olduğu için, sadece bunları iletmeye özelleşmiş bant genişliği düşük teknolojiler daha uygulanabilir. Bugün hem uzun menzil erişimi sağlayan hem de düşük bant genişliğinde işleyen LPWAN teknolojileri mevcuttur. Bunlar Narrowband IoT [6], SigFox [7] ve LoRa olarak sıralanabilir. Bu teknolojilerin özelliklerinin karşılaştırması Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Düşük güçlü geniş alan ağları ve bazı kullanım özellikleri.

	NB-IoT	SigFox	LoRa
Menzil	15 km'den az	~13 km	11 km'den az
Bant genişliği	180 kHz	100 Hz	<500 kHz
Data Rate	<250 kilobit/s	<100 bits/s	<50 kilobit/s
Frekans Aralığı	Lisanslı LTE	Lisansız 900 MHz	430-915 MHz

Bu çalışmada saha iletişimi için LoRa teknolojisi kullanılmıştır. LoRa, önceki çalışma pratiklerine dayanarak, düşük enerji tüketimi, uzun mesafede çalışma performansı, modül maliyeti, kolay programlama ve entegrasyon başlıklarında değerlendirildiğinde bitki üretim alanlarında oldukça iyi performans göstermektedir. Bu teknoloji Semtech firması tarafından 2015 yılında duyurulmuştur [8]. LoRa modülasyonu SF7 ve SF12 arasında değişen altı adet ortogonal yayma faktörüne (Spreading Factor-SF) sahiptir.

Aynı frekans kanalında aynı zamanda birden fazla yayılma frekansında ve benzer LoRa ağ geçitleri de sekiz farklı kanalda aynı anda veri iletimi sağlayabilmektedir. Kullanılan MAC (Media Access Control) katmanı sayesinde LoRa 'da IoT'un gerektirdiği çift yönlü iletişim, uçtan uca güvenlik ve mobilite gereksinimleri sağlanabilmektedir. LoRaWAN' da veri oranı kanal başına 0.3 ile 50 kb/s arasındadır ve CSS (Chirp Spread Specturm) tekniğini kullanarak veri iletimi sağlanır. LoRa' da herhangi bir MAC katmanı kullanılabildiği gibi önerilen MAC basit yıldız topoloji prensibi üzerine çalışan LoRaWAN'dır. LoRa bu topolojide çalıştığı için, veri iletimi uzun mesafeleri kapsayabilir. LoRa iletişiminde kullanılan ve sahadaki düğümlerle haberleşme sağlayan ağ geçidi, arka planda bir bulut ortamına bağlıdır. Ağ geçidi cihazları genel olarak 50' ye yakın düğümün anlık iletişimini sağlayacak güçtedir. LoRa modülasyon tekniği dünya üzerinde izin verilen 430, 433, 868 ve 915 MHz olmak üzere farklı bölgesel ISM (Industrial, Scientific and Medical) frekanslarında iletişim sağlamaktadır.

3. Gıda ve Gıda Arzı Güvenliği

Gıda güvenliği sürecinin önemli olduğu en temel alanlardan biri bitki yetiştirme faaliyetleridir. Tohum seçiminden hasata kadar olan işlemlerde uygulanacak yöntem ve kontroller, sonuçta elde edilecek gıdanın güvenliği ve niteliğinin belirlenmesinde oldukça önemlidir. Özellikle sanayileşme ve beraberinde gelen çevre kirliliği, iklim değişikliği, dünyadaki büyük gıda üreticilerindeki gıda üretimi üzerinde olumsuz etkilerini gitgide arttırmaktadır [9-11]. Bununla birlikte artan nüfus baskısı ve ekonomik belirsizlikler gıda üretim sürecinde etik olmayan uygulamaların artmasına yol açmaktadır. Usulüne aykırı ve aşırı pestisit içeren şekilde yetiştirilmiş ürünler, gıda denetimleri sonucunda doğal olarak markete çıkmamaktadır. Ancak bunlar bir şekilde üreticiler tarafından yok edilmeyorsa, yine de tüketilmektedir. Bu da iki taraflı bir zarara neden olmaktadır. Kötü ürün yetiştirme Doğal kaynak israfına neden olmakla birlikte denetimsizlik nedeniyle doğal kaynakların da kirlenmesine neden olmaktadır.

Yukarıda sayılan süreçlerin takip edilmesi için başta belirtilen teknolojilerin birçok uygulaması akıllı tarım yaklaşımı altında uygulanmaktadır. Aslında gıda güvenliğinin başladığı yer olan bitki yetiştirme faaliyetlerinin düzenlenmesinde hassas tarım uygulamaları da önemli bir yer tutmaktadır. Uygun şartlarda üretilmiş/yetiştirilmiş, insan sağlığına uygun ve tedarik zinciri boyunca takibi yapılmış gıdalar, beklendiği gibi doğal kaynaklara zarar vermeyecek ve israf edilmedikleri için talebin karşılanmasında yeterli olacaktır. Gıda güvenliğinde uygulanan çözümler iki ana grupta toplanabilir, ilki üretim aşamasında uygulanacak izleme yöntemleri, diğeri ise taşınması ve tedarik zinciri aşamasında uygulanan izleme yöntemleri.

Tarımsal faaliyetlerin yürütüldüğü alanlardaki teknolojik ilerlemeler gıdanın çiftlikten-taşıyıcıya yaklaşımıyla izlenmesinin başlangıç noktasıdır. Bugün akıllı tarım ve sulama uygulamaları neredeyse günlük bir pratik haline gelmiştir ve dünyanın birçok yerinde uygulanmaktadır. Ancak güvenli gıda gereksinimi nedeniyle yetiştirme süreçlerinin izlenmesi ve inkâr edilemez şekilde kayıt altına alınması gerekliliği aşikârdır. Bu konuda, öbek zinciri-akıllı kontrat-IoT

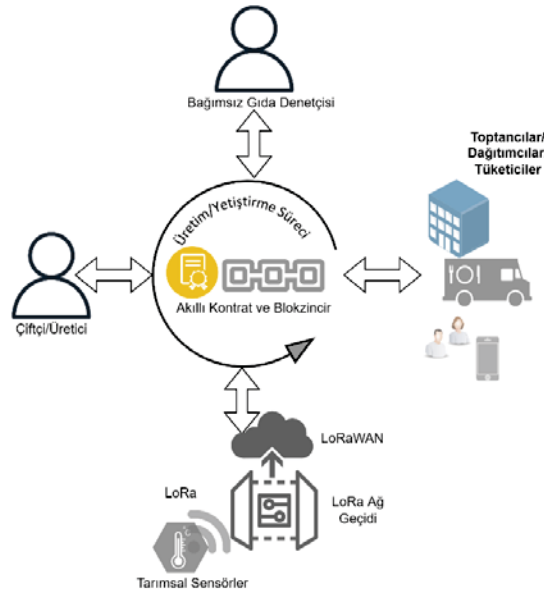
sistemlerini öneren ve tartışan birçok çalışma bulunmaktadır. Awan ve ark. [12] önerdikleri sistemle hem tarımsal gıda yetiştirme için hem de tedarik zinciri için kullanılabilir düşük enerjili bir IoT kümeleme modeli önermişlerdir. Ancak çalışma içinde Öbek zincirine yönelik önemli yaklaşımlar mevcuttur. Örneğin su kaynakları yönetimi ile ilgili çalışmada [13] IoT-temelli enerji verimli bir ağ ile IoT cihazlarının güvenilir veri kaynakları olarak kullanımı incelenmiş ve bir model önerilmiştir. Bu çalışmada önerilen ve tartışılan modele en yakın yaklaşım Pranto ve ark. [14] tarafından incelenmiştir. Çalışmada hasat öncesi ve sonrası yapılan uygulamaların takibi için bir akıllı kontrata dayalı ve IoT destekli bir sistem geliştirilmiştir.

Tedarik zinciri aşamasında gıdanın izlenmesi ve beklenen özellikleri sağladığının kontrolü için Öbek zinciri ve IoT teknolojileri sıklıkla önerilmektedir. Örneğin önemli bir gıda bileşeni olan süt ürünlerinin izlenmesi konusunda Casino ve ark. [15] tarafından Öbek zinciri yöntemiyle bir izleme altyapısı önerilmiştir. Ancak modelin pratik uygulamalarına yönelik bir girişim bulunmamaktadır. Önerdikleri model özel bir Öbek zinciri uygulaması barındırmaktadır. Bir başka izlenmesi gereken gıda türü dondurulmuş gıdalardır. Özellikle deniz ürünleri için uygun sıcaklıkta saklamak önemli bir gereksinimdir. Yine bu konuda Öbek zinciri-akıllı kontrat-IoT için modeller önerilmiştir. Örneğin Zhang ve ark. [16] çalışmalarında dondurulmuş deniz ürünleri için gıda izlenmesinde oluşacak güvenlik endişelerine yönelik bir modelin nasıl geliştirilebileceği üzerine bir sistem önermişlerdir. Balamurgan ve ark. [17] yaptığı başka bir

çalışmada ise yine gıda tedariki ve depolanması aşamalarındaki sahte gıda dağıtımı ve kullanımının önlenmesine yönelik olarak Öbek zinciri-akıllı kontrat-IoT teknolojilerini birleştiren bir çözüm geliştirmişlerdir. Yine bir başka çalışmada [18] üzüm tedarik zinciri üzerine önerilen modelin tartışması vardır. Bu çalışmaların ortak yönleri ilk bölümlerde bahsedilen teknolojilerin gıda güvenliği konusunda sağlayacakları faydalara yönelik çözüm teklifleri sunmalarıdır.

4. Modele Ait Kavram Kanıtı

Bu çalışmadaki kavram kanıtı uygulamaları için belirlenen birkaç teknolojik bileşen önceki bölümlerde özetlenmiştir. Buradaki bileşenleri kullanarak tasarlanan modelin genel çalışma prensibi Şekil 2'de gösterilmiştir. Öbek zinciri üzerinde gıda üretimi ve yetiştirme sürecinin sürekli bir döngü içerisinde son aşamaya kadar izlenerek kaydedilmesi ve geriye dönük olarak toptancılar/dağıtımıcılar gibi paydaşların gıda güvenliği konusunda bilgiye erişmesi öngörülmüştür. Literatürde tarımsal ürün yetiştirme ile başlayan gıda arzı güvenliğine ait izleme yaklaşımları büyük ölçüde benzerlik göstermektedir. Gıda üretimine etki eden faktörlerin kontrol ve denetiminin hem üreticiler hem de otonom şekilde çalışan cihazlar ve burada önerilen ürün bazında uzman olan bağımsız gıda denetçilerinin yer aldığı bir yaklaşımla sağlanmasının, gıda güvenliği konusunda sağlıklı ve güvenilir bir sonuca neden olacağı öngörülmektedir. Bu çalışmada uygulaması yapılan modelin ürettiği sonuçlar her aşamada Öbek zincirinin doğası gereği izlenebilir özellikte olacaktır.



Şekil-2: Çalışmada uygulanan modelin genel görünümü.

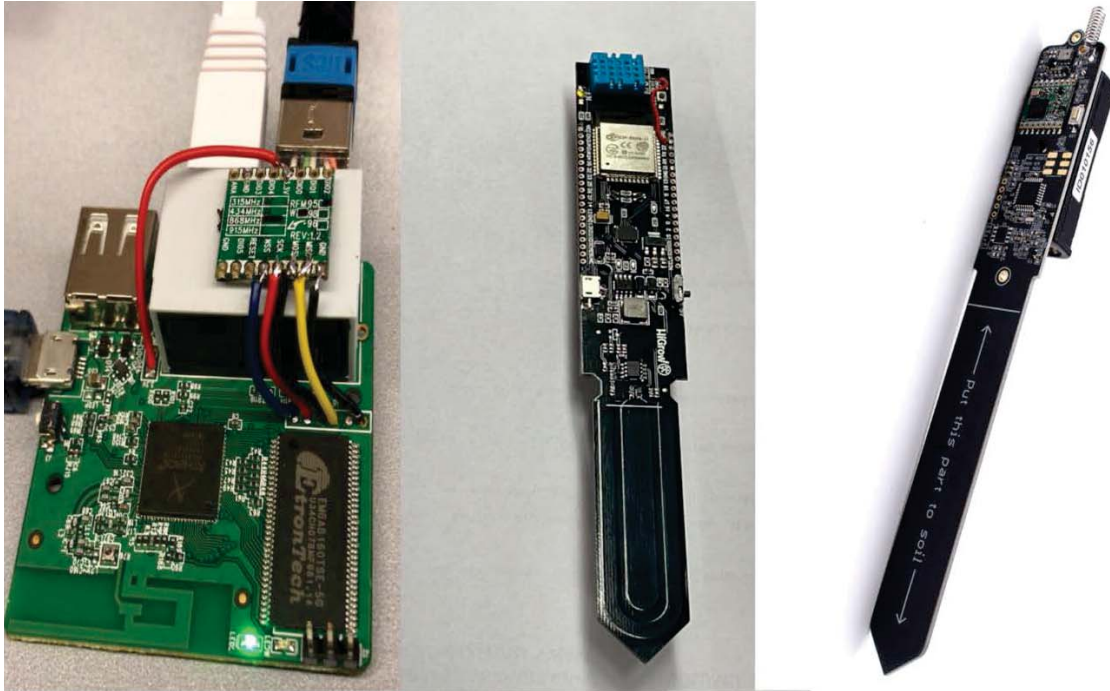
Model tasarlanırken bitki yetiştirme yapılan tarım alanlarında veri toplama gereksinimleri için LoRa iletişimi tercih edilmiştir. LoRa ağ geçitleri için yazarların önceki uygulamalarında sıklıkla tercih ettikleri özel olarak geliştirilen OpenWRT tabanlı Gl.inet platformu kullanılmıştır. Bu platformda Gl.6416 modeli 64MB bellek ve Qualcomm

Atheros 9331 işlemci bulunmaktadır. GPIO (general-purpose input/output) destekleyen bu platform ile birlikte LoRa iletişimini sağlamak için RMPF95 modülü entegre edilmiştir. Geliştirilen ağ geçidine ait prototip Şekil 2'de gösterilmiştir. OpenWRT bir Linux dağıtımı olduğu için ağ geçidi ve RMPF95[19] LoRa modülünü SPI protokolü ile haberleşmek

mümkündür. Ayrıca ağ geçidi içinde geliştirilen yazılım bileşeninde açık kaynak kodlu olan Dragino LoRa Gateway [20] yazılım bileşenleri çalışmadaki ihtiyaca göre düzenlenmiştir. Burada kullanılan ağ geçidinin en büyük özelliği akıllı kontrat testleri için kullanılabilir Ethereum istemcisinin Python arayüzü olan web3.py desteğini sağlamasıdır. Kullanılan ağ geçidi Öbek zinciri ağlarında akıllı kontrat ile işlem yapılmasını sağlayacak işlemci gücüne sahiptir.

Bu çalışmada kullanılan ağ geçidi platformu aynı zamanda BLE/Wi-Fi desteği de sağladığı için çevredeki LoRa haricinde

kullanılabilen duyargalar de birlikte çalışabilmektedir. Testler sırasında LoRa iletişimi yapabilen açık kaynak kodlu toprak nem duyargası [21] cihazlarının temel bileşenleri kullanılmıştır. Kapasite temelli nem ölçme özelliği olan bu algılayıcılarda yine aynı LoRa modülü olan RMPF95 ve ESP32 mikro denetleyicisi bulunmaktadır. Bu duyargayla birlikte testler için kullanılan bir diğer benzer duyarga modülü Wi-Fi özelliğine sahiptir. Sahadaki verileri kablosuz olarak ağ geçidine iletmektedir. Wi-Fi erişim sağlayan bileşene ek olarak kızıl ötesi sıcaklık ve ortamın sıcaklığını ölçen duyargalar da ekleyerek işlevselliği arttırılmıştır. Bu iki duyarga bileşeni de Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil-3. (a) Üretim sahalarında bulunan LoRa ağ geçidi prototipi ve (b) ,(c) saha bileşenleri.

Bu çalışmada IoT mimarisindeki algılama katmanı için minimum gereksinimdeki cihazlar yerleştirildikten sonra, bu cihazların etkileşim kuracağı akıllı kontrat geliştirilmiştir.

Bugün en yaygın kontrat geliştirme dili Solidity'dir[22]. Solidity programlama dili, yapısı itibariyle JavaScript benzeri bir sentaksa sahiptir. Statik olarak yazılan, çok biçimlilik, kalıtım ve kullanıcı tanımlı veri yapılarını destekler. Solidity kullanarak geliştirilen akıllı kontratlar nesne-yönelimli dillerdeki sınıflara benzer şekilde yapılandırılır. Kontrat yapısında olay, Fonksiyonlar ve Nitelik gibi dile has özellikler kullanılır. Solidity içinde bulunan genel programlama bileşenleri ve özellikleri Çizelge 2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2. Solidity programlama diline ait genel özellikler ve kullanım amaçları.

Özellik	Açıklama
Nitelikler	int, double, char, string gibi primitif veri yapıları ve enums, maps, address veri yapıları
Fonksiyonlar	Geleneksel programlamada olduğu gibi fonksiyonlar içlerindeki görevleri çalıştırır.
Değiştiriciler	Fonksiyonların kod çalıştırma akışlarını değiştirmek için kullanılırlar. Ayrıca fonksiyonları çalıştırmadan önce belirli koşulları kontrol etmek için kullanılırlar.
Olaylar	Parametre olarak aldığı argümanlara ait verileri öbek zinciri işlem günlüklerine kaydeder. Bunlar hesap denetimi kayıtlarının oluşturularak, kontrat süreçlerinin takibi için kullanılırlar.

Geliştirilen akıllı kontratla etkileşime girecek temel birkaç aktör bulunmaktadır. Bitki yetiştirme bugün geleneksel şekilde yapılırsa da, genelde hükümetlere bağlı denetleyici kurumlar ve başlangıçta tohum sağlayan firmalar üretim

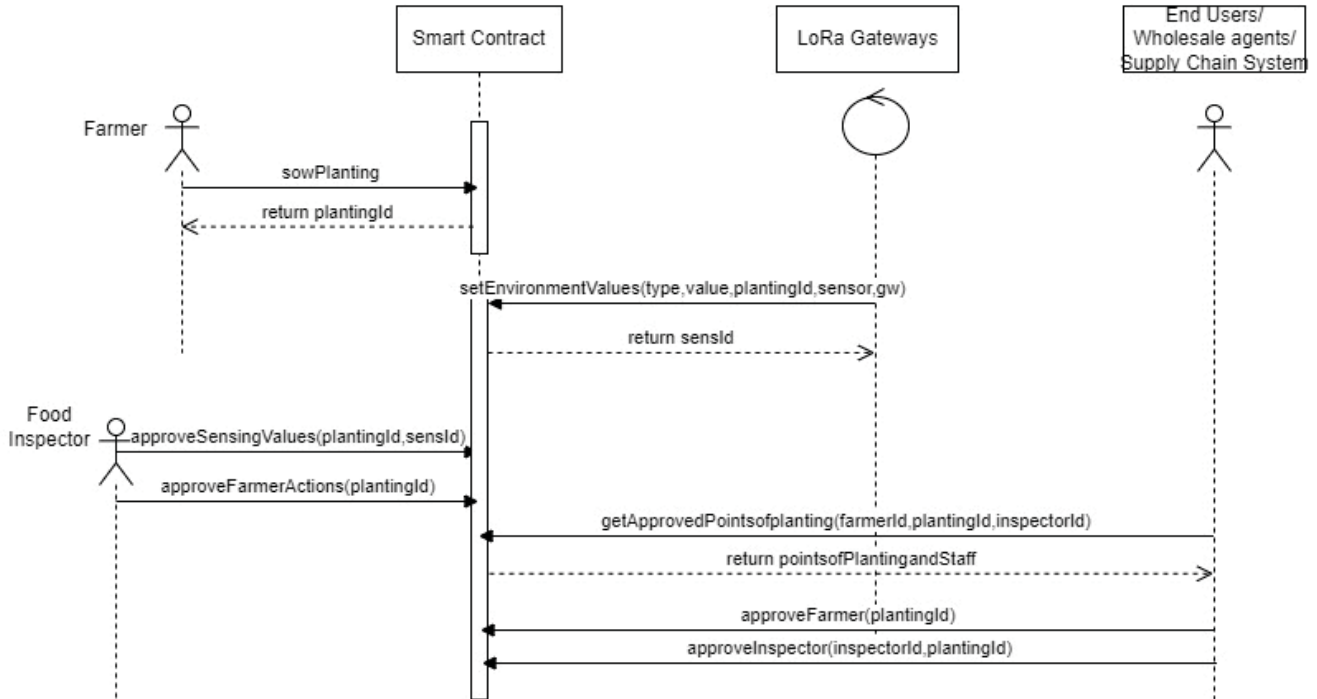
sürecine dâhildirler. Kontratlar da nesneye-yönelik temelli geliştirildikleri için bu katılımcılara ait nesnelere kontrat içinde tanımlanmıştır.

Solidity dilinin gelişmiş özellikleri klasik programlamaya benzer şekilde nesne oluşturmaya izin verdiğinden, benzer çalışmalarda kavramsal öneri olarak sunulan nesnelere *struct* yapısı kullanarak burada da oluşturulmuştur. Bu çalışmada oluşturulan nesnelere, bitki yetiştirilmede uygulanan çalışmaların genel yapısı ve gelecekteki olası kullanımları dikkate alınmıştır. Burada uygulanan yaklaşımda, çiftçiler ve gıda denetçileri gibi kullanıcıların bir Ethereum kimliği olarak tanımlanmasının yanı sıra, LoRa ağ geçitleri ve ekim yapılan tohumlar da bir Öbek zinciri hesabı olarak tanımlanmıştır. Bu özellik, gıda güvenliğinde gerekli bileşenleri ve yetiştirme kontrolünün tutarlılığını hem cihaz hem de tohum ürünü seviyesinde kontrol edebilmek için gerekli görülmüştür. Blok içindeki tüm hareketler inkâr edilemez şekilde saklandığı için bu hesaplar üzerinden kolayca takip edilecektir.

Önerilen modelde bulunan akıllı kontrattaki ilk işlem ve kontratın Ethereum ağına yüklenmesi, ürünü eken/yetiştiren kişi tarafından başlatılır. Bunun için çiftçiye ait ilgili ekim alanlarına hangi ürün ekildiyse buna bağlı olarak ana kayıt oluşturulacaktır. Burada açılan kayıt Öbek zinciri içine eşsiz bir numara ile saklanacak ve kontrat geçerli olduğu sürece erişilebilir durumda olacaktır. Çiftçilerin sahip olduğu bir veya birden fazla alanlara ekilen ürün bilgisine ait bilgi bu aşamadan sonra hem sahadaki duyargalar ve diğer model bileşeni olan denetçiler tarafından hem de diğer paydaşlar tarafından izlenebilir ve değerlendirilebilir duruma gelecektir.

Bu çalışmada uygulanan modelde, literatürdeki kavramsal modellerde ve uygulamalarda da bulunan saha duyargalarının otonom olarak verileri akıllı kontrat ile kaydettiği yöntem bulunmaktadır. Ancak sahadaki otonom verilerin yanında ek olarak bağımsız gıda denetçisi adı uygun görülen gıda arzi güvenliği konusunda bilgili kişilere ait bir kontrol mekanizması da bulunmaktadır. Önerilen modeldeki bu bileşen, bugün hala çiftçiliğin çoğunun insan faktörüne bağlı olduğu gerçeğine dayanır. Öngörülemez hava olayları, sel ve benzeri gibi doğal afetler, bununla birlikte çiftçilerin alıştıkları bazı ilaçlama ve sulama uygulamaları üretime zarar verebilmektedir. Bu bakımdan denetçiler uygun zamanda uygun işlemin yapıldığını onaylamak, doğrulamak üzere akıllı kontratta bu işlemi yaparlar. Böylelikle denetçilerin onayladığı işlemler, ürünlerin hasat zamanında, yetiştirme işleminin usulüne uygun olup olmadığının garantisini cihazların otonom olarak sağladığı değerlerin yanında belirleyici olacaktır.

Denetçilerle birlikte paralel olarak işleyen diğer süreç otonom duyargalar tarafından üretilen verilerin ağ geçidi tarafından işlenmesidir. Bölümün başında belirtildiği gibi geliştirilen ağ geçidi, akıllı kontrat istemcisi olan web3.py ara yüzünü kullanmaktadır. Web3.py, JSON RPC kullanarak tüm düğümlerle iletişim kurmak yerine Ethereum ağındaki bir düğümlerle iletişim kurulmasını sağlar ve bununla birlikte veri okunup yazılması mümkün hale gelir [23]. Gıda güvenliği modeline ait nesnelere ve fonksiyonların yapısı ve ilişkisi Şekil 4'te gösterilmiştir. Akıllı kontratın özelliği gereği sahadaki uygulamalara göre senaryo değişiklikleri olduğunda kontratın düzenlenerek yeniden ağa yüklenmesi gerekir. Bu çalışmada optimum ihtiyaçlar göz önüne alınarak bir model önerilmiştir.



Şekil-4: Modelde tasarlanan iş akışını yazılım modeline ait kullanım şekli ve senaryo öngörüsü.

Modeldeki nesnelere, ürün yetiştirme aşamasında hem çiftçiler hem ağ geçidi cihazı tarafından verileri toplanan duyargalar hem de gıda denetçilerine ait verileri içermektedir. Ayrıca ekim yapılan alanların bilgisi ve bu alanlarda tarihe bağlı olarak ekim yapılan ürüne ait bilgileri de barındırmaktadır.

Akıllı kontrat içerisinde, tohum kimliği dâhil olmak üzere, ağ geçidi üzerinde verisi işlenen duyarga cihazları da birer hesap olarak tanımlanmıştır. Bu sayede üreticilere ait cihazların da güvenilirliği Öbek zinciri üzerinde takip edilebilmektedir. Her aşamada denetçiler tarafından veya taşıma ve satış esnasında

işleyen süreçler içerisinde de bu nesnelerin güvenilirliği takip edilebilir ve onaylanabilir olacaktır.

Uygulanan modele ait hem ağ geçidindeki hem de DApp' daki algoritmanın kaba kodu Algoritma 1' de blok halinde gösterilmiştir. Bu algoritmaya ait karmaşıklığın hesaplanmasında hem sahadaki duyurga, ağ geçidi ve kullanıcıların aktör olarak sayılarının etkileri göz önüne alınmıştır. Hesaplama karmaşıklığında toplamda N adet bileşen bulunduğu değerlendirilirse genel itibarıyla karmaşıklık bazı fonksiyonlarda sabit kalmakta olduğu söylenebilir. Sadece saha duyurga verilerinin değerlendirildiği adımda sayıya bağlı olarak $O(N)$ karmaşıklığı vardır.

Algoritma-1: Modele ait algoritmaların kaba kod ile ifadesi.

pseudocode for Gateway:

function ListenSensorValues

sensorMACID, sensorID, sensorDATA = LoRaPayloadParser()

check sensorMACID \in MAClist, if not ret. False

check sensorID \in sensorlist, if not ret. False

sensorType = getType(sensorID)

contractFunction(sensorType, sensorDATA, plantingID, sensorID, GWID)

end function

pseudocode for SmartContract methods:

function sowPlanting

farmerID, landID = getDetailsFromAddress(farmerAddress)

int plantingID =

sowFunction(farmerID, seedID, timestamp, landID, location, area)

end function

function approveSensingValues

int plantingID = getFarmerPlantings(FarmerAddress)

int[] sensors = getFarmerGatewaySensors(FarmerAddress, plantingID)

for sensor in sensors

contractSensorApprove(sensor, plantingID)

end for

end function

function approveFarmerActions

farmerID = getDetailsFromAddress(farmerAddress)

int plantingID = getFarmerPlantings(FarmerAddress)

contractFarmerActionApprove(farmerID, plantingID, action)

end function

function approveFarmer

farmerID = getDetailsFromAddress(farmerAddress)

contractFarmerApprove(farmerID)

end function

function approveInspector

inspectorID = getDetailsFromAddress(inspectorAddress)

contractInspectorApprove(inspectorID)

end function

function getApprovedPointsForPlanting

int plantingID = getFarmerPlantings(FarmerAddress)

getcontractPointsPlanting(plantingID)

end function

5. Modele Ait Deney Sonuçları

Bu bölümde, çalışma esnasında elde edilen sonuçlar ve bunlara bağlı güçlükler birkaç başlıkta paylaşılmıştır. İlk aşamada geliştirilen modele ait akıllı kontrat uygulaması Remix IDE [24] ortamında test edilmiştir. Remix ortamı, Ethereum test ağlarında kullanıcılara bir cüzdan tanımlayarak Solidity ile kontratların test edilmesine imkân tanımaktadır. Test ağlarına yüklenen kontratlar, bu sayede gerçek bir bedel ödenmeden deneme imkânına sahip olmaktadır. Normal şartlarda geliştirilen kontratların Ethereum ağına yüklenmesi için byte başına bir bedel ödenmesi gerekmektedir. Bu değer bugün yaklaşık 200 gas/byte değerindedir. Derlenmiş kontratın boyutu ne kadar büyürse, yükleme bedeli o kadar artmaktadır. Gas olarak adlandırılan değer, Ethereum ağına işlemleri yürütmek için gerekli hesaplama sürecinin miktarını ölçmek için kullanılır [25]. Ethereum sanal makinası içerisinde Her Ethereum işleminin yürütülmesi için hesaplama kaynakları gerektirdiğinden, her işlem bir ücret gerektirir. Gas fiyatları, kendisi bir ETH birimi olan Gwei cinsinden belirtilir ve her Gwei, 0.000000001 ETH'ye eşittir. Daha düşük Gas ödemesi uzun bekleme süresine sebep olur. Fazla ödenmesi ise işlemlerin daha hızlı gerçekleştirilmesi ile sonuçlanır. Remix ortamında test edilen bazı fonksiyonlara ait bedeller ve Gas değerleri Şekil 5 'te gösterilmiştir. Bu değerler, oluşturulan fonksiyonların boyutuna bağlı olarak Öbek zincirinde tüketeceği işlem gücüyle ilintilidir.


```

[vm] from: 0x5B3...eddC4 to: foodSafety.sow(uint256,uint256,uint256,string,uint32) 0xd91...39138 value: 0 wei data: 0xb31...00000 logs: 0
hash: 0xee7...592ca

status true Transaction mined and execution succeed
transaction hash 0xee711bf6b3c3ff30bf3728d877b07f94212f13cbbd20e57bf1290891ebdb592ca
from 0x5B380a6a701c568545dCfcB03FcB875f56beddC4
to foodSafety.sow(uint256,uint256,uint256,string,uint32) 0xd9145cCE520386f254917e481e844e9943f39138
gas 232519 gas
transaction cost 202190 gas
execution cost 202190 gas

CALL [call] from: 0x5B380a6a701c568545dCfcB03FcB875f56beddC4 to: foodSafety.getplantingDetails(address) data: 0x508...eddC4
from 0x5B380a6a701c568545dCfcB03FcB875f56beddC4
to foodSafety.getplantingDetails(address) 0xf8e81D47203A594245E36C48e151709F0C19f8e8
execution cost 32940 gas (Cost only applies when called by a contract)
input 0x508...eddC4

```

Şekil-5: Akıllı kontrat içerisinde yer alan bazı temel fonksiyonların Ethereum test ağındaki işlem değerleri.

Ethereum ağındaki bu fiyat yaklaşımı nedeniyle bazı Gas bedeli olmayan uygulamalar ve ağlar geliştirilmiştir. Ancak bunların bugün güvenlik vs. nedenlerle pek tercih edildikleri söylenemez. Özellikle bazı uygulamalar da yüküklükten kaldırılmıştır. Bu durumla beraber 2022 Yılı başlarında akıllı kontrat uygulamalarını destekleyen ağlardan Avalance [26] Öbek zinciri ağı en uygun işlem ücretine sahip gözükmektedir. Avalance ağı 1 saniyenin altındaki işlem süresi nedeniyle oldukça fazla tercih edilmektedir. Avalance ağındaki C-Chain alt ağı Ethereum sanal makinasının kendileri tarafından geliştirilmiş bir örneğidir. Ethereum için en iyi alternatif olduğu yönünde uluslararası medyada bazı haberler çıkmıştır [27]. Günümüz itibarıyla, en uygun işlem ücreti Avalance ağındadır. Ancak bu tartışma bile akıllı kontrat uygulamalarının yaygınlaşması için mali külfetin caydırıcı bir

özellik olamaması gerektiğini göstermektedir. Güvenilir ve düşük bedel gerektiren ağlar gelecekte bu tip uygulamalar için tercih edilen nedenlerden biri olacaktır. Gıda arzı gibi kritik konularda, maddi kayıp ya da belirsizlik konusu bu durumda uygulayıcılar için caydırıcı olabilir. Önerilen modele ait kontrat Avalance C-Chain ağında çalıştırıldığında yaklaşık üç kat daha ucuz bir bedel ile işlenmiştir. Avalance ağında her Gwei 25 AVAX değerindedir. Piyasa fiyatları dikkate alındığında bu ücret daha uygun bir karşılığa denk gelmektedir. Örnek bir işleme ait sonuçlar Şekil 6'da gösterilmiştir. 2022 yılı itibarıyla hesaplandığında en uygun bedeller Avax üzerinde sağlanmaktadır. Ethereum ağında ETH bedeli oldukça yüksek sevide olup, üretim maliyetlerinin yanında bu bedel de ekstra bir girdi oluşturacaktır.

Transaction		Transaction	
Nonce	1	Nonce	1
Amount	-0 ETH	Amount	-0 AVAX
Gas Limit (Units)	202190	Gas Limit (Units)	202190
Gas Used (Units)	202190	Gas Used (Units)	202190
Base Fee (GWEI)	0.000000007	Base Fee (GWEI)	25
Priority Fee (GWEI)	2.5	Priority Fee (GWEI)	2.5
Total Gas Fee	0.000505 ETH	Total Gas Fee	0.00556 AVAX
Max Fee Per Gas	0.000000003 ETH	Max Fee Per Gas	0.000000053 AVAX
Total	0.00050548 ETH	Total	0.00556022 AVAX

Şekil-6: Ethereum ve Avax ağlarında hazırlanan akıllı kontrata ait Gas ve işlem ücretleri

Akıllı kontrat uygulamalarında yaşanabilecek güçlüklerden bir diğeri, geliştirilen iş modeli akışının bazı sebeplerle değişmesi, ek ihtiyaçların belirmesi neticesinde kontratta değişiklik olursa yeniden ağa yüklenmeleri gerekliliğidir. Hem kontratın yüklenmesi hem de işlem başına bir bedel alınması bu tip uygulamalarda, zaten yüksek olan gıda üretim maliyetleri için bir soru işareti oluşturabilir.

Bu çalışmada sahadaki duyarılardan alınan veriler doğrudan ağ geçidi üzerinde çalışan uygulama ile birlikte özel bir platform olmadan test edilmiştir. Burada ağ geçitleri aldığı verileri Öbek zincirine akıllı kontrat ile yazılma aşamasında ağ geçitlerinin önemini ortaya çıkarmaktadır. Bu bakımdan test sonuçlarında değinilmesi gereken diğer güçlük ağ geçitleri cihazlarının güvenliği ve güvenilirliğidir. Normal şartlarda

LoRaWAN ağlarında üç tip son düğüm cihaz tipi bulunmaktadır. Bu düğümlerin A, B, C Class olarak adlandırılan bu çalışma şekilleri, ağın ihtiyaçlarına göre belirlenmektedir. A Class cihazlar basitçe bir LoRaWAN ağına katılmak için basit işlevleri yerine getirmektedir. A sınıfı iletişimde cihazın ürettiği her bir uplink bilgisine karşılık, iletişim ağındaki olası downlink mesajlarını yakalamak için iki adet downlink iletim penceresi kullanılır. B sınıfı cihazlar ise daha fazla downlink penceresi verisini almak için planlanmış zamana aralıklarında daha fazla iletişim penceresi açarlar. Bununla birlikte bir LoRaWAN ağında B sınıfı son düğüm cihazlar varsa ağ geçitleri bu cihazların durumunu öğrenebilmek için senkronize olarak daha fazla iletişim penceresi açacaktır. Bu özellikleriyle B sınıfı cihazlar A sınıfı cihazlara göre daha fazla güç tüketirler. C sınıfı cihazlar ise sürekli olarak bir iletişim penceresi açık tutarlar. Zaman içinde artan ihtiyaçlar göz önünde bulundurularak LoRaWAN ağlarında çakışmaları önlemek için A sınıfı uç cihazlarla kurulmuş ağlarda time-slotted ALOHA (Additive Links On-line Hawaii Area) protokolü uygulaması devreye alınmıştır. LoRa iletişiminin temelinde yer alan ALOHA yaklaşımına alternatif bu yöntem, normal şartlara göre üç kat daha az iletişim kaybı sağlamaktadır. Cihazların bu özellikler çevre duyarılardan gelen verilerin otonom olarak Öbek zincirine işlenmesindeki aksaklığı gidermesi açısından faydalıdır. Bu çalışmada geliştirilen ağ geçidi cihazı A sınıfı olarak çalışmaktadır. Ancak kablosuz iletişimin aksama olasılığı duyarğa verilerinin sağlıklı şekilde alınması problemini ortaya çıkarmaktadır. Ortam değişkenlerinin (Nem, Su, Gübre, Hava Kalitesi vs.) zamanında ve doğru işlenmesi aksadığında, bu durumun bu izleme sürecini otomatik olarak yönetmenin zorluğunu ortaya koymaktadır.

Ayrıca ağ geçidi cihazlarında, Öbek zinciri ağında değerli olabilecek veya ele geçirilmesi sorun yaratacak hassas bilgilerin bulunmaması gerekmektedir. Çünkü kontrata ulaşım veya SWARM [28], Infura[29] gibi platformlara ait kimlik bilgileri ele geçirilirse, kötü amaçlarla kullanılabilir. Her ne kadar ağ geçidi cihazları kontrat verisi yazabilme kabiliyetine sahip olarak tasarlanırsa bile güvenlik kaygıları bu işlemin pek sürdürülebilir olmadığını göstermektedir. Sahada bulunan cihazlara koyca zarar görebilir veya ele geçirilebilirler. Buna

alternatif çözüm ağ geçitlerinin yine klasik bir yaklaşımla sahadan aldıkları verileri Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) protokolü veya eşdeğeriyle bir merkezi sunucuya iletmeleri ve burada Öbek zinciri üzerine bu verilerin işlenmesidir. Böylelikle kritik bilgiler daha kolay korunacaktır.

Şüphesiz gelecekte açık alandaki bu tip tarımsal uygulamalarda kullanılacak daha gelişmiş güvenliğe ve güvenilirliğe sahip yöntemler geliştikçe, kullanım alanı merkezi sunuculardan tabana yayılabilir. Bu bakımdan buradaki modelde önerilen bağımsız gıda denetçisini mevcut süreçte yaşanabilecek bu tip aksaklıklara bir çözüm olarak görülebilir. Hem saha cihazlarının eksiklerini denetlemek hem üreticinin faaliyetlerini izlemek açısından oluşabilecek aksaklıkların kaldırılması yönünde tamamlayıcı bir faktör olacaktır. Gıda denetçilerinin faaliyetleri hem çiftçiler, hem büyük toptancılar ve bir aşamadan son tüketici tarafından verilen onayla puanlandırılacağı için, puana göre kazanılacak maddi değer ve tercih edilme, denetim işinin daha doğru yapılmasını sağlayabilir. Puanı fazla olan denetçiler, daha çok tercih edilir. Denetçiler tercih edildikçe kazançları artar, bu yaklaşım diğer denetçilerin de gıda arzında kontrol ve izleme prosedürlerinde pozitif bir rekabetine yol açabilir. Bu sonuçlarla birlikte, modelde bulunan özellikleri, literatürde bulunan benzer önerilerle karşılaştırma değerleri Çizelge 3'te gösterilmiştir.

Çizelge 3'te gıda üretim güvenliğinde olması beklenen teknolojik gereksinimi ve önerilen bileşenler esas alınarak karşılaştırma yapılmıştır. Genel olarak saha veya ortam ölçümlerine dayanan sistemlerde bir ağ geçidi bulunması zorunluğu bulunmaktadır. Bazı ticarileşmiş uygulamaların alt yapı olarak tercih edilmesi ürün ve servis bağımlılığını gerektireceğinden özel olarak geliştirilecek ağ geçidi ve duyarğa bileşenleri bu sistemlerin genişlemesini sağlayacaktır. Bu da daha ölçeklendirilebilir bir uygulama alt yapısına imkân sağlamaktadır. Bunun yanında akıllı kontrat desteği veren Ethereum, Avax gibi ağların dışında Çizelge 3'te karşılaştırılan tüm çalışmaların Binance Smart Chain, Rinkeby, ve Matic Öbek zinciri ağlarında uygulanması mümkündür. Bahsi geçen ağlarda kullanılan mutabakat protokolleri farklılık gösterecektir.

Çizelge 3. Çalışma için geliştirilen model ve diğer benzer çalışmaların karşılaştırılması.

Yayın	Gıda güvenliği çözümü	Ağ Geçidi Tipi	Akıllı kontrat ağı	Sistemin Toplam Gas Bedeli	İtibar/Puanlama Sistemi ve Bileşenleri
Pranto ve ark.[14]	Ürün yetiştirme ve son tüketiciye kadar akıllı kontrat ile takip ve kayıt.	Belirtilmemiş	Ethereum	1.352.546	Yok
Amarillo ve ark. [30]	Gıda zinciri izleme üzerine güvenli duyarğa sistemi. FPGA kullanarak öbek zinciri üzerinde madencilik işlemi.	Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee	Ethereum	Belirtilmemiş	Yok
Lin ve ark. [31]	Ürün yetiştirme sürecinden itibaren	LoRaWAN	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	Yok

	son tüketiciye ve kurumsal kaynak planlamaya kadar blok zincir uygulaması				
Shadid ve ark. [32]	Ürün yetiştirme son tüketiciye kadar sürecin takip edilmesi için akıllı kontrat uygulaması	Belirtilmemiş	Ethereum	6.793.130	Hakem ve Üretici için var. Ağ geçidi ve duyargalar için yok
Çalışmada önerilen model	Ürün yetiştirme son tüketiciye kadar sürecin takip edilmesi için akıllı kontrat uygulaması	LoRaWAN Ağ geçidi	Ethereum, Avax	4.984.944	Denetçiler ve Üretici için var. Ağ geçidi ve duyargalar için var.

Özellikle karşılaştırma kriterleri açısından maliyet ve kullanım kolaylığı değerlendirildiğinde Pincheira ve ark. [34] tarımsal izlenebilirlik çalışması, bu çalışmada önerilen model açısından önemli bir fırsat sunmaktadır. Kripto varlık fiyatlarının aşağı yukarı aynı olduğu dönemde, çeşitli mikro denetleyicilerle birlikte Ethereum ve Sawtooth [35] protokolleri, düğüm sayısı, aktör sayısı gibi başlıklarla karşılaştırılmıştır. [34]'e göre burada önerilen model, maliyet açısından ortalama bir değere sahiptir. Ancak burada kullanılan platformun OpenWRT Linux işletim sistemine sahip olması, özellikle denetleme ve programlama açısından diğer Arduino, STM32 ve ESP32 gibi platformlara nazaran oldukça fazla üstünlüğü vardır. Bu tip sistemlerde, gereksinimler göz önüne alınarak yapılacak yazılım geliştirmelerinde zaman da bir maliyet olacağından, işletim sistemi üzerinde farklı programlama dilleri kullanabilme esnekliğinin oldukça etkili bir tasarruf sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Öte yandan Çizelge 3'te gösterildiği gibi akıllı kontratın Öbek zincirine yüklenmesi ve işlemlerin yapılması belli bir bedelle olmaktadır. Bu çalışmada önerilen modele en yakın çalışma ile Gas maliyetleri açısından makul seviyede fark vardır. Ancak Shadid ve ark. [32] çalışmasında kontrat kodları detayları yer almadığından önerilen modelde yapılacak optimizasyonlar belirsiz kalmıştır. Yine burada saha ihtiyaçlarının ve gıda güvenliği ile ilgili gerek kamu ve gerek tüketicilerin taleplerine göre iyileştirmeler yapılabilir.

6. Sonuç Üzerine Öneriler

Bu çalışmada uygulanan modelin genel olarak gıda güvenliği dışındaki alanlarda da uygulanabilir olduğu düşünülmektedir. Akıllı kontrat uygulamalarının potansiyeli göz önüne alındığında, birçok fırsata açık olduğu görülebilir. Özellikle sahadan ya da ortamdaki duyargalar yardımıyla veri toplama uygulamalarında benzer bir denetim yaklaşımının kullanılabilmesi bir diğer alan Elektronik Sağlık Kayıtlarının toplanmasıdır. Özellikle hastanelerde hastalardan veri toplayan tıbbi cihazlar ve bunlarla birlikte hastaların üzerinde taşıdıkları vücut duyargalarından alınan veriler benzer bir yaklaşımla saklanabilmektedir. Bu verilerin de yine benzer bir şekilde hekim denetiminden geçmektedir. Tanı ve tedavi aşamasında da modelde önerildiği şekilde bir denetim ve düzenleme gereksinimi bulunmaktadır. Bunlarla birlikte bir tedarik zincirine bağlı olarak ve sonunda kalite kontrol ihtiyacı

duyulan tüm sahaya dayalı üretim süreçlerinde burada önerilen model etkili olabilecektir.

Ancak bugün dünya çapında etkin olan öbek zinciri ağlarındaki fiyat dengesizlikleri bu tip uygulamalarda özel bir öbek zinciri ağının daha uygun olacağını düşündürmektedir. Yürütülen işlemlerin boyutları arttıkça ortaya çıkan Gas bedeli gibi unsurlar, buna benzer uygulamaların gerçek dünyada, üreticileri bunlardan kaçınmaya itebilir. Ayrıca kritik zamanlarda gıda arzının hükümet kontrolünde yürütülmesi gerekliliği söz konusu olduğunda özel bir öbek zinciri ağına ihtiyaç daha fazla önem kazanacaktır. Bugün akıllı kontrat hizmeti sunmasa da kontrat geliştirme potansiyeli olan IOTA ağı Arapsaçı (Tangle) mimarisiyle Öbek zincirine bir alternatif oluşturmaktadır. Bu sistem 2022 yılı başında Avrupa birliği komisyonu tarafından gelecekteki öbek zinciri uygulamaları için destek almaya başlamıştır. Bu yönüyle diğer spekülasyona açık kripto varlık borsalarından da etkilenmeyecek özel bir Öbek zinciri ağı olma yolunda ilerlemektedir. Ayrıca IOTA sahadaki cihazların yönetimi için de güçlü bir yaklaşım getirmektedir [33].

Bu modelde gelişmesi öngörülen diğer bir konu puanlama ya da oylama sisteminin daha geliştirilmesi gerektiğidir. Öbek zinciri ağlarında iş ispatı (PoW) ve hisse ispatı (PoS) algoritmalarının yanında bugün halen gelişmekte olan oy ispatı algoritmalarının gerekliliği önem arz etmektedir. Öbek zinciri teknolojisinin beklentileri arasında toplumsal dönüşüm de olduğundan oy ispatı (PoV-proof of Vote) sistemlerinin /algoritmalarının bu modelde bahsedilen toplumsal etkileri olan eylemlerde duyulacağı ihtiyaç açıktır. Ancak PoV algoritmaları halen geliştirilme aşamasındadır.

Yukarıdaki başlıklar ışığında, akıllı kontratların işlenmesi ve Öbek zinciri ağındaki işlem bedellerinin gıda üretim ve tedarik maliyetlerindeki etkileri az olacağı ağlarda önerilen modelin uygulanması daha verimli olacaktır. Ayrıca modelin, üreticiler, denetçiler ve cihazlara ait puanlama sisteminin oy ispatı algoritmalarıyla gerçekleştirilmesi, kontrat iş akışındaki değişikliklerden bu bileşenlere ait verilerin en az şekilde etkilenmesini sağlayacaktır.

Kaynakça

- [1] İnternet: FAO, World Food and Agriculture – Statistical Yearbook, 2, www.fao.org/documents/card/en/c/cb4477en, 12.04.2022.
- [2] Nakamoto S., "Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system," Decentralized Business Review, p. 21260, 2008.
- [3] Kardaş S., "Öbek zinciri teknolojisi: uzlaşma protokolleri," Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 10(2), 481-496, 2019.
- [4] İnternet : V. Buterin, "A NEXT GENERATION SMART CONTRACT & DECENTRALIZED APPLICATION PLATFORM", <https://ethereum.org/en/whitepaper/>, 12.02.2022.
- [5] İnternet : N. Szabo. "Smart Contracts." www.fon.hum.uva.nl/rob/Courses/InformationInSpeech/CDROM/Literature/LOTwinterschool2006/szabo.best.vwh.net/smart.contracts.html, 13.02.2022.
- [6] İnternet : "NB-IoT 3GPP Released." www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1785-nb-iot_complete, 04.03.2022
- [7] İnternet : "SigFox.", www.sigfox.com, 04.03.2022.
- [8] İnternet : "LoRa® Product Family." Semtech. www.semtech.com/wireless-rf/loral.html, 04.03.2022.
- [9] Misiou O. and Koutsoumanis K., "Climate change and its implications for food safety and spoilage," Trends in Food Science & Technology, 2021.
- [10] Buscaroli E. Ve ark., "Reviewing chemical and biological risks in urban agriculture: A comprehensive framework for a food safety assessment of city region food systems," Food Control, 126, 2021.
- [11] Donets M. M. Ve ark., "Flounders as indicators of environmental contamination by persistent organic pollutants and health risk," Marine Pollution Bulletin, 164, 111977, 2021.
- [12] Awan S. ve ark., "IoT with BlockChain: A Futuristic Approach in Agriculture and Food Supply Chain," Wireless Communications and Mobile Computing, 2021, 5580179, 2021.
- [13] Vecchio M. M., Giuffreda R., ve Kanhere S. S., "Cost-effective IoT devices as trustworthy data sources for a blockchain-based water management system in precision agriculture," Computers and Electronics in Agriculture, 180, 105889, 2021.
- [14] Pranto T. H., A. Noman A., Mahmud A., ve Haque A. B., "Blockchain and smart contract for IoT enabled smart agriculture," (in eng), PeerJ Comput Sci, 7, e407-e407, 2021.
- [15] Casino F. Ve ark., "Blockchain-based food supply chain traceability: a case study in the dairy sector," International Journal of Production Research, 59(19), 5758-5770, 2021.
- [16] Zhang Y., Liu Y., Jiong Z., Zhang X., Li B., ve Chen E., "Development and assessment of blockchain-IoT-based traceability system for frozen aquatic product," Journal of Food Process Engineering, 44(5), e13669, 2021.
- [17] Balamurugan S., Ayyasamy A., ve Joseph K. S., "IoT-Blockchain driven traceability techniques for improved safety measures in food supply chain," International Journal of Information Technology, 14(2), 1087-1098, 2022.
- [18] Saurabh S. ve Dey K., "Blockchain technology adoption, architecture, and sustainable agri-food supply chains," Journal of Cleaner Production, 284, 24731, 2021.
- [19] İnternet : "RFM95W LoRa Module." HopeRF. www.hoperf.com/modules/lora/RFM95.html, 17.04.2022.
- [20] İnternet : "LG02/OLG02 LoRa Gateway User Manual." Dragino. www.dragino.com/downloads/downloads/LoRa_Gateway/LG02-OLG02_LoRa_Gateway_User_Manual_v1.6.1.pdf, 17.04.2022.
- [21] İnternet : "Lora Soil Moisture Sensor V3." Makerfabs. <https://github.com/Makerfabs/Lora-Soil-Moisture-Sensor/tree/master/V3>, 21.04.2022.
- [22] Dannen C., Solidity programming, in Introducing Ethereum and Solidity, Springer, 2017.
- [23] İnternet : G. McCubbin. "Intro to Web3. Py - Ethereum For Python Developers (Dapp University)." www.dappuniversity.com/articles/web3-py-intro, 01.04.2022.
- [24] Latif R. M. A., Hussain K., Jhanjhi N. Z., Nayyar A., ve Rizwan O., "A remix IDE: smart contract-based framework for the healthcare sector by using Blockchain technology," Multimedia Tools and Applications, 1-24, 2020.
- [25] Faqir-Rhazoui Y., Ariza-Garzón M.-J., Arroyo J., ve Hassan S., "Effect of the Gas Price Surges on User Activity in the DAOs of the Ethereum Blockchain", CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Yokohama, Japan, 2021.
- [26] İnternet : K. Sekniqi, D. Laine, Stephen Buttolph, and E. G. Sirer, "Avalanche Platform, Whitepaper", https://assets.website-files.com/5d80307810123f5ffbb34d6e/6008d7bbf8b10d1eb01e7e16_Avalanche%20Platform%20Whitepaper.pdf, 12.04.2022.
- [27] İnternet: T. Locke, "Avalanche's token is up 33% in the last week—here's what to know about the 'Ethereum competitor'", <https://www.cnbc.com/2021/11/23/what-to-know-about-ethereum-competitor-avalanche-as-avax-rallies.html>, 21.04.2022.
- [28] İnternet : "Swarm, distributed storage platform and content distribution service." <https://ethersphere.github.io/swarm-home/>, 17.04.2022.
- [29] İnternet : " Infura Blockchain Development Suite." <https://infura.io/>, 03.05.2022.
- [30] Gonzalez-Amarillo C., Cardenas-Garcia C., Mendoza-Moreno M., Ramirez-Gonzalez G., ve Corrales J. C., "Blockchain-IoT sensor (BloTS): A solution to IoT-ecosystems security issues," Sensors, 21(13), 4388, 2021.
- [31] Lin J., Shen Z., Zhang A., ve Chai Y., "Blockchain and IoT based Food Traceability for Smart Agriculture", 3rd International Conference on Crowd Science and Engineering, Singapore, 2018.
- [32] Shahid A., Almogren A., Javaid N., Al-Zahrani F. A., Zuair M., ve Alam M., "Blockchain-Based Agri-Food Supply Chain: A Complete Solution," IEEE Access, 8, 69230-69243, 2020.
- [33] Carelli A., Palmieri A., Vilei A., Castanier F., ve Vesco A., "Enabling Secure Data Exchange through the IOTA Tangle for IoT Constrained Devices," Sensors, 22(4), 2022.
- [34] Pincheira M, Vecchio M, Giuffreda R. Characterization and Costs of Integrating Blockchain and IoT for Agri-Food Traceability Systems. Systems. 2022; 10(3):57.
- [35] İnternet : "Hyperledger Sawtooth, Hyperledger Foundation " <https://www.hyperledger.org/use/sawtooth>.