



# Akıllı Tarımda LoRa Haberleşmesinin Rolü, Uygulama Alanları, Bir Mimari Önerisi ve Performans Analizi

Elvan DUMAN<sup>\*,a</sup> 

<sup>a</sup> Mehmet Akif Ersoy University Department of Software Engineering, Burdur, 15300, TÜRKİYE

## MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 21.11.2022  
Kabul: 21.12.2022

### **Anahtar Kelimeler:**

LoRa, akıllı tarım,  
nesnelerin interneti,  
kablosuz algılayıcı  
ağlar

### **\*Sorumlu Yazar:**

e-posta: eduman@  
mehmetakif.edu.tr

## ÖZET

LoRa iletişim teknolojisi, geniş kapsama alanı, düşük güç tüketimi ve açık kaynak protokol özellikleriyle birçok alanda umut vaat eden ve yenilikçi çözümler sunmaktadır. IoT ve iletişim teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte tarım alanında sürdürülebilir ve çevre dostu uygulamalarla ürün miktarı ve kalitesinde iyileştirmeler mümkün olmaktadır. Tarımda yeni trendler toprağın iyileştirilmesi, akıllı sulama sistemlerinin uygulanması, çevre kontrolünün geliştirilmesi, akıllı gübreleme tekniklerinin kullanılması ve hasat otomasyonu gibi konular üzerinde odaklanmıştır. Bu trendler, tarımı daha sürdürülebilir, verimli ve üretken hale getirme amacı taşımaktadır. Bu çalışmada LoRa haberleşme teknolojisinin özellikleri, avantajları, sınırlılıkları ve benzer teknolojilerden ayrılan yönleri araştırılmıştır. Bunun yanında tarım uygulama alanları, sunulan çözümler ve eğilimler sistematik şekilde sunulmuştur. Son olarak akıllı tarımda örnek bir uygulama mimarisi sunulmuş ve performans analizi yapılmıştır.  
DOI: 10.30855/AIS.2022.05.02.03

# The Role and Application Areas of LoRa Communication in Smart Agriculture, A Proposed Architecture, and Its Performance Analysis

## ARTICLE INFO

Received: 21.11.2022  
Accepted: 21.12.2022

### **Keywords:**

LoRa, smart  
agriculture, iot,  
wireless sensor  
networks

### **\*Corresponding**

#### **Authors**

e-mail: eduman@  
mehmetakif.edu.tr

## ABSTRACT

LoRa communication technology offers promising and innovative solutions in various fields with its features such as wide coverage and low power consumption and open-source protocols. With the development of IoT and communication technologies, it is possible to improve product quantity and quality in sustainable and environmentally friendly practices in agriculture. The new trends in agriculture have been focused on improving soil preparation, implementing smart irrigation systems, enhancing environmental control, using smart fertilization techniques, and automating cropping processes. These trends aim to make agriculture more sustainable, efficient, and productive. In this study, the features, advantages, and limitations of LoRa communication technology and its distinguishing aspects from similar technologies are investigated. In addition, agricultural application areas, offered solutions and trends are presented systematically. Finally, an exemplary application architecture in smart agriculture was presented and performance analysis was carried out.  
DOI: 10.30855/AIS.2022.05.02.03

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Temmuz 2022'de yayımlanan Birleşmiş Milletler raporunda dünya nüfusu Ekim 2022 itibarıyla 8 milyara erişeceği belirtilmekte ve 2030 yılında 8.5 milyar, 2050 yılında ise 9 milyar 700 milyona ulaşacağı tahmin

edilmektedir [1]. Diğer yandan 2000 yılında dünya nüfusunun %47'si şehirlerde yaşarken, 2018 yılına gelindiğinde şehirleşme oranı %55 olmuştur. 2030'a gelindiğinde ise dünyadaki insanların %60'ından fazlasının şehirlerde yaşayacağı düşünülmektedir [2]. Nüfusun, şehirleşmenin dolayısıyla gıda arzının hızlı ve kontrolsüz şekilde artması, tarım üretim yöntemlerinin gelişmesi ve endüstriyel büyümeye ihtiyacı ortaya çıkarmıştır. Modern tarımsal üretim yöntemlerinin gelişmesi ise özellikle haberleşme ve internet başta olmak üzere teknolojik gelişmelerle ilişkilidir. Nesnelerin birbiriyle haberleşmesi olarak tanımlanabilecek nesnelerin interneti (Internet of Things, IoT) kavramı 2000 yılında öne çıkmış; uç ürünler, sistemler ve servislerin entegrasyon derecesini artırmış ve bu özelliğiyle teknoloji marketlerinin ve teknolojik uygulamalarda büyük ün kazanmıştır. Günümüzde ileri jenerasyon teknoloji olarak görülmektedir. IoT ve makineler arası iletişim (machine to machine, M2M) kavramları insanlar, cihazlar ve makineler arasındaki etkileşimi köklü şekilde değiştirerek her yerde birbirine bağlı altyapılar oluşturulmasının yolunu açmıştır. Gelecek vaat eden bu paradigmalarda hem endüstri hem de müşteriler için oldukça cazip fırsatlar yaratmaktadır. 2030 yılına kadar internete bağlı nesnelerin sayısının yaklaşık 500 milyar olacağı tahmin edildiği göz önünde bulundurulursa Endüstri 4.0 evrimi için IoT ve M2M bağlanabilirliğin kritik rol oynayacağı söylenebilir [3].

IoT teknolojilerinin hızlı gelişimi ve devasa sistemlerin geliştirilmesiyle birlikte sistemlerin yeni talepleri de ortaya çıkmaya başlamıştır. Teknolojik ve fiziksel kısıtlar arasında sabit bir güç kaynağına bağımlılık ve geniş alanlarda kablosuz iletişim isteğinin ilk sıralarda geldiği söylenebilir. Kablosuz algılayıcı ağlarına (Wireless Sensor Network, WSN) bağlı nesnelere, mümkün olduğunca geniş bir alanda ve dilediği gibi hareket ederek birbirleriyle konuşmak istemektedir [4]. Nesnelerin özgürce hareket edebilmelerinin ön koşulu ise herhangi sabit bir güç kaynağına ihtiyaç duyulmamasıdır. Araştırmacılar güçlü bataryaların elde edilmesi ile enerji verimli bileşen ve iletişim yöntemlerinin geliştirilmesi konusunda çok sayıda değerli çalışma yapmıştır [5]. Ancak uzun ömürlü ve kapasiteli enerji kaynakları elde edilmesine rağmen, geliştirilen yüksek hızda sahip işlemci ve hızlı saklama birimleri gibi bileşenler de daha fazla enerjiye ihtiyaç duyduğundan bataryaların çok daha uzun ömürlü olması mümkün hale gelebilmiştir. İşte bu noktada IoT uygulamaları, geniş alanlarda kablosuz olarak haberleşebilecek düşük güçte çalışma kabiliyeti olan teknolojilere ihtiyaç duymaktadır. Bahsedilen özellikler göz önüne alındığında, Düşük Güç Geniş Alan Ağı (Long-Range Wide-Area Network, LPWAN) teknolojileri ön plana çıkmaktadır.

Bu çalışma, hızlı gelişim içindeki LoRa teknolojilerinin kabiliyetlerinin ve uygulama alanlarının ortaya çıkarılması, avantaj ve kısıtlılıklarının belirlenmesi, gerçek tarım uygulamalarına dönük örnek bir modelin önerilmesi ve saha testlerinin yapılmasını içermektedir. Bu çalışma araştırmacılara, LoRa'nın farklı uygulama ve ortam türleri için uygunluğunu belirlemeye ve onu kullanırken ortaya çıkabilecek olası sorunları veya zorlukları belirlenmesinde; tarım alanında LoRa'nın nasıl kullanılabileceğini ve hangi koşullarda en etkili olduğunu kavramada yardımcı olacağı düşünülmektedir. Ayrıca önerilen modelle yapılacak çalışmalar için bir yol gösterici olacaktır. Çalışmanın ikinci kısmında LPWAN teknolojileri, LoRa ve rakipleri, birbirlerine karşı avantaj ve dezavantajları verilmiş ve tartışılmıştır. Üçüncü bölümde LoRa'nın tarım uygulama alanları ile yaygın etki yapmış ve yenilikçi uygulamaları sunulmuştur. Bölüm dördte örnek bir akıllı tarım uygulama modeli ile saha ve performans analizi sunulmuştur. Son bölümde ise LoRa iletişim teknolojisinin tarımdaki yeri özetlenmiş ve geleceğe dönük yönelimler ve uygulamalar belirtilmiştir.

## 2. LPWAN TEKNOLOJİLERİ (LPWAN TECHNOLOGIES)

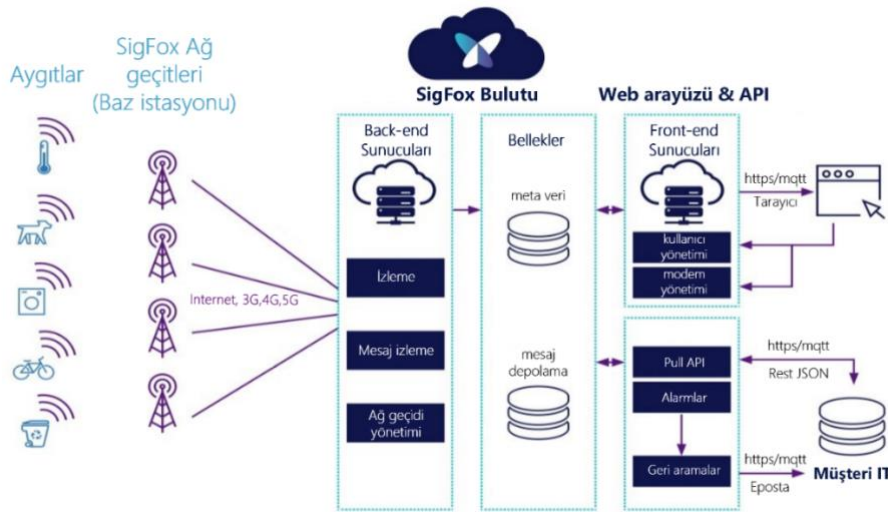
LPWAN teknolojileri daha iyi ve verimli ağ performansı için haberleşme protokol ve teknolojilerinin geliştirilmesi, her ağ düğümü için en uygun iletim gücünün hesaplanması, ağ bağlantısının minimum güç kaybıyla sağlanması, düşük veri kapasitesi ile iletim, gecikmeye karşı tolerans gibi çözümler sunmaktadır. LPWAN teknolojileri farklı ihtiyaçlara yönelik olarak geliştirilen çeşitli çözümlerle birbirinden ayrılmaktadır. Piyasadaki etkinlik ve teknolojileri dikkate alındığında hücreli iletişim altyapısı temelli düşük bant NB-IoT, üçüncü-taraf altyapı kullanan Sigfox ve üçüncü-taraf bir altyapıya ihtiyaç duymayan LoRa öne çıkmaktadır. Bu teknolojiler her ne kadar temelde LPWAN teknolojileri çatısı altında toplansa da sunduğu imkân, özellikler ve gereklilikleri ile birbirlerinden ayrılmakta dolayısıyla uygulama alanlarının farklılaşmasına neden olmaktadır.

### 2.1. LPWAN Çeşitleri (LPWAN Types)

İlk kategori olarak lisanslı frekans bandı kullanan hücresel teknoloji tabanlı LPWAN teknolojileri olan NB-IoT, LTE-M ve GSM IoT çeşitleri bulunmaktadır. Öne çıkan özellikleri geniş kapsama alanı, servis kalitesi (quality of service, QoS), yüksek veri iletim kapasitesi, güvenlik ve enerji verimli olmalarıdır. Hücresel iletişim temelli söz konusu teknolojiler mobil operatör şirketleri tarafından kontrol edilen özelleştirilmiş ağ kullanılmaktadır. Lisanssız ISM bandı kullanılmaları, üyelik ve hücresel ağ kullanım ücretleri sebebiyle uygun maliyetli olamayabilmektedir [6]. NB-IoT, LTE iletişim protokolü temelli, uplink ve downlink için 200 kHz frekans bandını kullanmaktadır. NB-IoT uplink için frekans bölmeli çoklu erişim (Frequency-division-multiple access, FDMA) kullanılırken, downlink için ortogonal frekans bölmeli çoklu erişim (Orthogonal Frequency-Division-Multiple Access, OFDMA) ve kareleme faz kaydırmalı anahtarlama (quadrature phase shift keying, QPSK) modülasyonu kullanılmaktadır [7].

İkinci kategoride ise ultra dar band (ultra narrowband, UNB) teknolojisini kullanan Fransız Sigfox [8] ve Telensa [9] firmaları, özellikle IoT standart ve teknolojilerin uyumsuzluğunun yarattığı problemi çözmek adına ortaya çıkmıştır. Sigfox basitlik, verimlilik, entegrasyon ve çift yönlü haberleşme gibi temel hedeflerle bu kategoride belirgin şekilde öne çıkmış teknolojidir ve km mertebelerinde sınırlı güç ile haberleşmeyi, UNB teknolojisi kullanarak sağlamaktadır. Ülkelerdeki regülasyonlara göre Avrupa'da 868.0-868.2 MHz, diğer ülkelerde 902.0-928.0 MHz arasındaki bantları kullanılmaktadır. Sigfox fiziksel katmanında Gauss frekans kaydırmalı anahtarlama (Gaussian frequency shift keying, GFSK) ve ayrımsal ikili faz kaydırmalı anahtarlama (Differential binary phase shift keying, DBPSK) kullanır. Bu yolla kanallar üzerinde 100 Hz bant genişliğinde veri transferini yüksek alıcı hassasiyeti, düşük enerji tasarrufu ve düşük maliyetli anten tasarımı ile birlikte, düşük gürültü seviyelerinde sağlamaktadır [10]. 100 Hz genişliğindeki her bir iletim toplamda spektrumdaki 102 kHz bant genişliğinde gerçekleşmektedir ve maksimum 100 bps transfer etmektedir. Aygıtlar arasındaki senkronizasyon eksikliği ve frekans atlama kısıtlılığında kaynaklı problemlerin etkilerinin en aza indirilerek servis kalitesinin (Quality of Servis, QoS) artırılması adına gönderilecek mesaj çoğaltılarak 3 farklı kanaldan iki kez gönderilmektedir.

Sigfox şehir içinde 3-10 kilometre, kırsal alanda ise 30-50 kilometre bir kapsama alanında 1 milyon terminal ile ağ kurabilme özelliğiyle avantajlıdır. Öte yandan iletilen veri miktarı lisanssız spektrumunu kullanarak 100 bps hızında ve maksimum 12 baytlık yük uzunluğuyla alıcıya günlük 140 mesaj gönderimiyle sınırlandırılmıştır. Dahası alıcıdan vericiye gönderilecek mesajlar maksimum 4 bayt yük uzunluğu ve 4 mesajla sınırlandırılmıştır. Bu kısıtlılık her bir uplink mesajına karşılık onaylama için downlink mesajı alamayacağı anlamına gelmektedir [11]. Sonuç olarak özellikleri dikkate alındığında Sigfox, zaman ve frekans çeşitliliği kullanarak uplink kalitesini artırdığından sensör veri gönderimi için uygun bir çözüm sunarken downlink kısıtı sebebiyle aktuatör kullanımı için uygun görülmemektedir [12]. Şekil 1'de temel Sigfox mimarisi verilmiştir. Mimari sensör aygıtları, ağ geçidi, sunucu ve belleklerin bulunduğu sigfox bulutu, web uygulaması, arayüzler ve apileri içermektedir.



Şekil 1. Sigfox mimarisi (Sigfox architecture)

Üçüncü kategorideki açık kaynak teknolojisine sahip LoRa ise Semtech tarafından 2014’de patentlenmiş, ilk iki kategorinin aksine özel ağ ve kolay bir şekilde global ağ platformu kurulmasına imkân veren modülasyon teknolojisidir [13]. Ülkelerdeki regülasyonlara göre Avrupa’da 868 MHz, Birleşik Devletler’de 915 MHz ve bazı bölgelerde 433 MHz lisanssız bandında çalışan bir teknolojidir. Sigfox’un GFSK ve DBPSK modülasyonlarının aksine LoRa cıvıltı yayılma spektrumu (chirp spread spectrum, CSS) modülasyonu temelli bir fiziksel katmandır. CSS modülasyonun tasarımı sayesinde düşük güç tüketimi ve düşük hızda onlarca kilometrelik geniş alan veri iletimini mümkün kılmasıyla LoRa, LPWAN teknolojileri içerisinde avantajlı bir konuma gelmektedir. LoRa mimarisinin diğer önemli avantajı 10 ve 12 yayılma faktöründe sinyal gürültü oranı (Signal-to-Noise Ratio, SNR) sırasıyla -20 dB ile -15 dB iken alıcı hassasiyeti sırasıyla -134 dBm ve -129 dBm olmaktadır. Bluetooth ve Wi-Fi için benzer SNR değerlerinde ancak -40 dBm ve -80 dBm alıcı hassasiyetine ulaşılabilir. LoRa ile çarpışma olmadan eş zamanlı olarak taşıyıcı frekansı (carrier frequency, CF), yayılma faktörü (spreading factor, SF), bant genişliği (bandwidth, BW) ve kodlama hızı (coding rate, CR) gibi iletim parametrelerini göz önünde tutarak başarılıdır. LoRa CSS ile 250 bps ile 5.5 kbps arasında, FSK ile 50 kbps veri hızı ile transfer gerçekleştirebilir. SF 7 ile 14 arasında bir değer alırken veri hızı (Data rate, DR) ile arasında ters orantı bulunmaktadır. Yüksek SF değeri veri hızını düşürmektedir. Tablo 1’de en yaygın bilinen LPWAN teknolojileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Teknolojilerin standartlaşmaları, frekans, bant genişliği, iletim yöntemi, veri hızı, kapsama alanı, sınırlılıkları, gecikme ve maliyet gibi konularda bilgiler içermektedir.

Tablo 1. LPWAN teknolojilerinin özellik karşılaştırması (*Comparison of LPWAN Technologies*)

Özellik	LPWAN TEKNOLOJİLERİ		
	LoRa	Sigfox	NB-IoT
<b>Sahiplik</b>	Semtech	Sigfox	3 GPP
<b>Standart</b>	LoRa Alliance	SigFox ve ETSI LTN	3 GPP
<b>Frekans</b>	Lisanssız ISM	Lisanssız ISM	Lisanslı LTE
<b>Bant genişliği</b>	125, 250, 500 kHz	100, 600 Hz	180 kHz
<b>Modülasyon</b>	CSS, FSK	DBPSK, GFSK	QPSK
<b>İletim</b>	Yarı-Çift	Sınırlı yarı-çift	Yarı-Çift
<b>Veri hızı gönderim- alm</b>	0.3–37.5 kbps	100,600 bps -600 bps	64 kbps-25 kbps
<b>Günlük Mesaj Sayısı</b>	Limitsiz	140 UL / 4 DL	Limitsiz
<b>Kapsama Kırsal</b>	45 km	30-50 km	10 km
<b>Kapsama Şehir</b>	5 km	3-10 km	1.5 km
<b>Sinyal Karışmasında Sağlamlık</b>	Yüksek	Yüksek	Düşük
<b>Şifreleme</b>	AES 128 byte	Yok	LTE
<b>Uyarlamalı veri gönderme</b>	Var	Yok	Yok
<b>Konum Belirleme</b>	TDOA	RSSI	Yok
<b>Özel Ağ</b>	Var	Yok	Yok
<b>Gecikme</b>	Düşük (Class C)	Yüksek	Düşük
<b>Maliyet</b>	Düşük	Orta	Orta

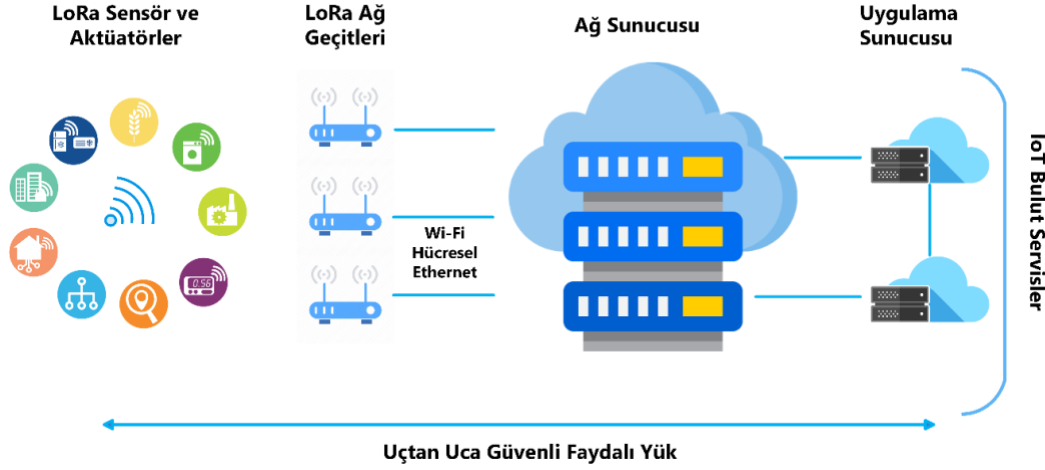
LoRa ISM bantlarında çalışması birçok avantaj sunmasının yanında yanında bazı kısıtlılıklar da getirmektedir. Bunlar, LoRa sistemlerinin çalıştığı frekanslar, diğer radyo frekanslı ağlardan da kullanılmaktadır. Bu nedenle, LoRa sistemlerinin çalışması sırasında bu tür ağlardan oluşabilecek gürültülerden etkilenebilir. Bunun dışında çok uzun mesafe iletimi gerektiğinde güç tüketimi artmaktadır. Askeri noktalar, havalimanları gibi alanlarda veya uçak gibi ortamlarda kullandıkları frekanslar sebebiyle çalıştırılmayabilir. Kullanıldığı çevrenin yoğunluğu, aygıtların yoğunluğu ve kullanıldığı ortamdan kaynaklı veri kayıpları yaşanabilir. Son olarak doğası gereği büyük miktarda veri aktarımının günümüz imkanlarıyla mümkün ve uygun olmadığı söylenebilir.

## 2.1. LoRaWAN Mimarisi (*LoRaWAN Architecture*)

LoRaWAN, LoRa uç aygıtları, LoRa ağ geçitlerinin yönlendirmesini, yıldız topolojisiyle uçtan uca güvenli ve çift yönlü haberleşmeyi mümkün kılmaktadır. LoRaWAN teknolojisi düşük enerji tüketimi, geniş kapsama alanı, basitlik, özel ağ kurulumunu mümkün kılması, güvenlik ve kolay ağ yönetimi gibi konularla öne çıkmıştır. Ancak literatür incelendiğinde özellikle büyük ağ senaryolarında ölçeklenebilirlik gibi konular üzerinde çalışmalar öne çıkmaktadır [14, 15]. LoRaWAN standartları LoRa Alliance tarafından belirlenen ve bir LoRa fiziksel katmanı tarafından üst katmanı tanımlanan bir MAC katmanlı ağ protokolüdür. Bu teknoloji hareketlilik (Mobility), konumlanma, uçtan uca koruma, çift yönlü haberleşme gibi özellikleriyle nesnelere bölgesel, ulusal ve

uluslararası düşük güçlü ve geniş alanda batarya ile çalışabilen kablosuz haberleşme teknolojisiyle güncel IoT ihtiyaçlarını karşılamaktadır. Mimarisi ile asenkron olarak tüm ağ düğümleri için veri hızı, iletişim frekansı, iletim gücü tanımlamalarının yapılmasını mümkün kılmaktadır.

LoRaWAN, NB-IoT ve Sigfox'un aksine açık erişimli tanımlaması sayesinde özel ağ kurulumunun yanısıra diğer LoRaWAN ve diğer geniş alan ağları ile bütünleşme imkânı sunmaktadır. Bu özellikleri sayesinde teknoloji birlikleri, üreticiler, servis sağlayıcılar, ve bilimsel araştırmacılar tarafından büyük ilgi görmektedir [16]. Adaptif veri hızı (adaptive data rate, ADR) sayesinde eldeki senaryoya göre iletim hızı ayarlayabilme özelliği, hata algılama ve düzeltme mekanizması bulundurmaktadır.



Şekil 2. LoRAWAN mimarisi (LoRaWAN architecture)

Şekil 2’de LoRaWAN’a ait genel mimari verilmiştir. LoRa teknolojisine sahip birçok sensör ve aktüatör tarafından üretilen veri uygun mesafede konumlandırılmış ağ geçidine iletilir. Ağ geçidine gelen veri Wi-Fi, hücresel veya Ethernet bağlantısı ile IoT uygulamalarıyla bütünleşik bulut sunuculara aktarılmaktadır. Ağ sunucusu veri güvenliği ve birden çok gönderilmiş paketlerin filtrelenmesi gibi işlerden sorumludur. Bir LoRaWAN mimarisi üç temel aygıtla tanımlanır. Bunlar:

- Uç Aygıt: Sensörler yalnızca veri üreten ve bu veriyi ağ sunucusuna ulaştırması için ağ geçidine gönderen aygıtlardır. Burada tek yönlü bir haberleşme vardır ve uç aygıttan sunucuya doğru olan iletişim uplink (UP) olarak isimlendirilir. Aktüatör ise veri göndermesi yanında sunucudan gelen veriyi de alabilmektedir. Sunucudan veri alma işlemi downlink (DL) olarak adlandırılır.
- Ağ Geçidi: LoRa haberleşmeyle alınan taşıyıcı sinyal bilgi sinyaline dönüştürülerek ağ sunucusuna iletmekle sorumlu aygıtlardır. Ağ sunucularına Wi-Fi, hücresel veya Ethernet bağlantısıyla iletişim kurabilir. Ağ geçitleri radyo frekanslarını çok kanaldan dinler ve eş zamanlı olarak birçok gönderim yapar.
- Ağ Sunucusu: Tüm uç aygıtlardan alınan veriler burada toplanır ve uygulama katmanında işlenerek veritabanı sunucularında saklanır. Kullanıcılar uygulamalar aracılığıyla aktüatörlere komutlar gönderebilmektedir.

Farklı tür uygulamalar ve ihtiyaçlar için LoRaWAN üç farklı operasyon için A, B ve C olmak üzere üç farklı sınıf tanımlanmıştır. Uç aygıtlar ağ geçidine herhangi bir zamanda veri gönderdiğinde varsayılan olarak A sınıfında başlatılır. Sınıf A’da her bir uplink sonrasında belirli bir zaman için iki alıcı penceresini kullanır. Sınıf B’de uç aygıtlar için iki alıcı penceresi dışında baz istasyonundan onaylama mesajı (acknowledgment, ACK) ek olarak beklenir. Fakat daha fazla pencere açma işlemi daha fazla enerji harcanmasına neden olmaktadır. Ağ geçidi işaretleri senkronizasyonu sağlayabilmek için periyodik olarak göndermektedir. Sınıf C’de ise UP işlemi dışında düğümler alıcı pencerelerini sürekli açık tutar. Sürekli açık tutmak enerji harcamasını daha da artırmakta, bu durum batarya yerine kesintisiz bir güç kaynağı ihtiyacını getirmektedir. Hangi sınıfla çalışılması gerektiğini ihtiyaçlar

ve imkanlar belirlemektedir. Sınıf A'da veri çakışması ve gecikmesi yüksektir; gerçek zamanlı olarak çalışmaz ve çoğunlukla uykudadır. Buna karşılık güç tüketimini minimum seviyede tutmaktadır. Diğer taraftan Sınıf C'de gerçek zamanlı iletim, düşük gecikme, daha az çakışma ve sürekli veri kabulü mümkün olmaktadır. Bu avantajların yanında güç tüketimini artırdığından sürekli güç kaynağı imkanı olan durumlar için uygundur.

LoRaWAN'ın düşük enerji tüketimi ve ihtiyaca yönelik sunduğu açık mimarisinin yanında LoRa'nın fiziksel katmanındaki kısıtlılıklarından kaynaklı eksiklikleri bulunmaktadır. Bu problemler ülkelerin koymuş olduğu regülasyonlardan kaynaklandığı gibi geniş alan ağının büyüklüğü, enerji tüketimi ve güvenlik gibi alanlardan da kaynaklanabilmektedir. Enerji tüketimi LPWAN ağları için sistemin yaşam süresini belirleyen en temel ve en kritik unsurdur. LoRa teknolojisinin öne çıkması ve birçok uygulama alanına hâkim olmasının önemli bir nedeni tek bir enerji kaynağıyla minimum bakımla 10 yıla kadar ürünler ortaya koymasıdır. Radyo haberleşmesi kaynaklı enerji verimliliğinin artırılması için bilimsel araştırmalar ve geliştirmeler sürmektedir [17]. Bir diğer önemli sorun ise ağ ölçeklenebilirliğidir. Çok sayıda uç aygıtın ağ geçidinden ACK isteğinde bulunması, ağ geçidinin uyması gereken görev döngüsü kısıtlamasına uymadığı durumlarda ortaya çıkmaktadır. Ayrıca uygun ölçeklemeler ticari ve ideal en iyi senaryo durumlarına göre belirlendiğinden pratikte beklentiler yeterince karşılanmayabilmektedir. Ağ geçitlerinin artırılması gibi öneriler ise maliyeti artırmaktadır. Enerji verimliliği ve ölçeklenebilirlik dışında, kapsama alanı, servis kalitesi, ağ güvenliği konularında da iyileştirmeler ve araştırmalar sürdürülmektedir [3, 18].

## 2. LORA TEMELLİ AKILLI TARIM (LORA-BASED SMART AGRICULTURE)

Nesnelerin interneti ve LoRa gibi yeni nesil haberleşme teknolojilerinin tarım sektörünün birçok ihtiyacını karşılaması, yeni ve kolay yöntemlerle verimlilik ve ekonomiklik sağlamasıyla sektör yeniden şekillenmektedir [19]. Tarım üreticileri nesnelerin interneti ve haberleşme teknolojileri aracılığıyla her yerden ve her an tarım alanlarına ulaşabilmektedir. Sensör, aktüatörler, kablosuz ağlar ve mobil uygulamalar aracılığıyla tarım arazilerindeki son durumun takip edilmesi ve gerekli komutlar verilerek tarım arazisinin yönetilmesi mümkün olmaktadır. Nüfus artışıyla birlikte tarımsal ürünlere olan talepler hızla artarken öte yandan özellikle son yıllarda kendisini daha çok hissettiren iklimsel değişiklikler ve doğal kaynakların azalması sebebiyle de verimlilik azalmakta ve maliyetler artmaktadır. Artan talepler ve belirtilen olumsuzluklar sebebiyle tarım alanında teknoloji kullanarak verim ve ekonomiklik sağlamak daha önemli hale gelmiştir. LoRa haberleşmesinin gelişmesiyle yıllarca bakım ve ek bir enerji kaynağı gerektirmeyen tarım ürünleri geliştirilmeye başlanmıştır. Özellikle kırsala yerleşmiş tarım arazilerinin imkânları arasında olmayan internet ve hücreli haberleşmeye alternatif veya tamamlayıcı olarak radyo frekansı temelli uzun mesafeli düşük güç gerektiren teknolojiler önemli bir ihtiyacı karşılamaktadır [20]. Tarım sektörünün ihtiyaçları ile LoRa haberleşmesinin avantajları birleşince tarım alanında birçok farklı ihtiyacı karşılayacak araştırmalar yürütülmüş ve uygulamalar geliştirilmiştir. Bu çalışmada LoRa tabanlı çalışmalar su ve sulama yönetimi, toprak yönetimi, ürün yönetimi ve sera yönetimi olmak üzere dört ana başlıkta incelenmiştir.

### 3.1. Su ve Sulama Yönetimi (Water and Irrigation Management)

Su kaynaklarına erişiminin zorlaşması ve maliyeti sebebiyle kaynaklarının etkili ve verimli kullanılması kritik öneme sahiptir. Son yıllarda sulama sisteminin tasarlanması, iyileştirilmesi, yürütülmesi ve yönetilmesinde LoRa teknolojileri yaygın şekilde kullanılmaktadır. İnsan katılımı olmadan tarım ürünlerinin durumlarını gösteren ortam verilerinin sensörler aracılığıyla alınması ve uygun koşullarda su akışının kontrol edilmesi süreçlerinde haberleşme LoRa ile sağlanabilmektedir. LoRa'nın Sigfox'da olduğu gibi DL veri gönderim kısıtlılığı olmaması aktüatör kullanımında elverişlilik sağlamaktadır. Modern sulama yöntemlerinde toprak sıcaklık ve nemi, toprak ve sulama çeşidi ve yağış durumu giriş olarak kullanılabilir [21].

Literatürde Zhao ve arkadaşlarının öncül çalışmasında mobil uygulama ile selenoid valf ve hidroelektrik üreticisinin kontrolünü sağlayan lora haberleşmesi temelli bir sulama sistemi geliştirilmiştir [21]. Çalışmada enerji tüketimi ve iletim mesafesi ile ilgili deneysel çalışmalar verilerek LoRa haberleşmesinin avantajları, performansı ve kısıtlılıkları hakkında araştırmacılara faydalı bilgiler sunulmuştur. Aktham ve arkadaşları çalışmasında [22] özellikle tarım alanlarının büyüklüğü vurgulanmış ve sulama işleminin teknolojiye dayanmadığında insan emeğine çok fazla ihtiyacı olduğu tespitinde bulunmuştur Uygulamada beş yıla kadar ömürlü ve düşük maliyetli LoRa ürünü sunulmuştur. Çalışmada LoRa temelli olarak sistemin uzaktan kontrolü ve sulama pompasının güncel

durumunun izlenmesi mümkün hale gelmiştir. Chang ve arkadaşları, makine öğrenmesi temelli LoRA akıllı sulama sisteminde uzman çiftçilerin sulama hakkındaki deneyimlerini kullanan sistem önermiştir [23]. Modelin eğitilmesinde sıcaklık-nem, toprak sıcaklık-nem, ışık yoğunluğu gibi sensör verilerinden faydalanarak ileriye dönük sulama ihtiyacı modellenmiştir. Ivan ve arkadaşları ise çalışmasında [24] sis bilişim ağ geçitleri barındıran LoraWAN temelli akıllı sulama sistemi geliştirmiştir. Enerji tüketiminin azalması ve sağlıklı bağlantı kurulabilmesi için radyo planlama aracı aracılığıyla haberleşmede kullanılacak doğru ağ geçidinin hesaplanması sağlanmıştır. Lyu ve arkadaşları çalışmasında [25] üzüm bağları için damlama sulama sisteminin kontrolünde LoRA haberleşmesini kullanmıştır. Temel sulama sistemi çalışmalarından farklı olarak geçmiş toprak nemi, yağış ve iklim ölçümlerini kullanarak ileriye dönük toprak nemini tahmin etmeye çalışmıştır. Böylece sulama zamanı ve süresine otomatik karar verilebilmektedir. Tahminleme için tekrarlayan sinir ağı (Recurrent Neural Network, RNN) ailesinden uzun kısa süreli bellek (Long short-term memory, LSTM) derin ağ modeli kullanılmıştır. Çalışmada yürütülen deneylerle tahminleme başarısı ortaya konulmuştur. Başlıca çalışmalar dışında sulama sistemlerinin karşılaştırılması, enerji tüketimi ve iletişim mesafesi gibi konuların ölçülmesi ve mobil ve web uygulamaları ve servislerin yazılması gibi LoRA temelli birçok çalışma araştırmacılar tarafından sunulmuştur [26-29]. Su yönetimi için Baydur ve arkadaşları çalışmasında [30] ARM tabanlı akıllı su sayıcı için elektronik kart düzenlenmiştir. Sera ortam bilgilerinin alınması, zamanla değişen besin çözeltisinin kontrolünü sağlayan topraksız tarım sistemi tasarlanmıştır.

### 3.2. Toprak Yönetimi (Soil Management)

Toprak yönetimi, ürün kalitesi ve veriminin artırılması için, toprakla ilgili pH, sıcaklık, nem, iletkenlik, azot gibi bilgilerin elde edilmesi ile üretim koşullarına ve ürüne göre uygun koşulların sağlanması süreçlerini kapsamaktadır. Üretici gübreleme, sulama, drenaj, ısıtma ve havalandırma gibi süreçleri elde edilen toprak verisine göre başlatılmakta veya geliştirilen sistemlerle otomatik olarak gerçekleştirilebilmektedir. Ürün kalitesi ve ürün verimliliğinin yanında toprak değerlerindeki olumsuzlukların erken tespiti ile yaşanabilecek kayıpların da önüne geçilmektedir. Dahası uygulanan farklı yöntemler ile ürün verimliliği arasındaki analiz yapılmasına imkân veren veriyi oluşturmaktadır. Son dönemdeki uygulamalarda ürünlere ait ortam ve toprak bilgilerinin blok zinciri üzerine yazılarak ortam koşullarının garanti edildiği, alıcı ve son kullanıcılara ispatlanabildiği mümkün hale gelmiştir. [31, 32].

2017 yılındaki öncü çalışmada [33], Xue-fen ve arkadaşları toprak neminin LoRa haberleşmeyle alınıp bir mobil uygulama üzerinden akıllı telefonlarla kontrolü üzerine çalışma yapmıştır. NFC ile bağlanma, lokasyon öğrenme, yağmur yağış ölçme ve aktüatör kontrolü uygulamalarını esnek, güvenli, ekonomik ve kullanım kolay şekilde uygulamışlardır. Rachmani ve Zulkifli çalışmasında [34], yıldız meyvesi için LoRa temelli IoT izleme sistemi önermişlerdir. Uygulamada pH ve toprak nem sensörü ile bahçe izlenmiş ve kapsama alanı, paket gönderim oranı ve cevap zamanı üzerine analiz yapılmıştır. Benzer bir çalışmada toprak nemi ölçen bulut ve LoRa tabanlı uygulama geliştirilmiştir [35]. Hibrit teknolojilere örnek bir çalışmada, tarla içinde devriye gezebilen araçla tüm toprak sensörlerinden veri RFID ile kısa mesafeden alınıp araç üzerindeki LoRa modülüyle sunucuya gönderilmiştir [36].

Toprak nem değerlerinin alınmasında maliyetleri azaltmak adına sensör kullanmayan, yerine LoRa sinyalinin faydalanılan iki çalışma öne çıkmaktadır. İlk çalışmada [37], toprak neminin mahsul verim ve su israfının azaltılmasındaki önemi ile mevcut toprak nem sensörlerinin pahalılığı ve büyük hata payı vurgulanarak yeni bir teknik önerilmiştir. Çalışmadaki kilit anlayış toprak nemi ile toprak dielektrik geçirgenliğin arasındaki ilişkiden toprak içerisine yerleştirilen LoRa modülü sinyal faz okumalarından toprak nem bilgisinin çıkarılabileceği olmuştur. Deneysel çalışmalarda toprak neminin %3.1 hata oranıyla doğru tahmin edildiği gösterilmiştir. Benzer şekilde LoRa fiziksel özelliklerinin toprak nem değişiminde kullanılan ikinci çalışmada [38] Smol (Soil Moisture LoRa) isminde sinyal güç göstergesi (received signal strength indicator, RSSI) ve iletim gücü temelli toprak nem ölçme yöntemi tanıtılmıştır.

### 3.3. Ürün Yönetimi (Product Management)

Literatürde ürünün sağlığına işaret eden verilerin kaydedilmesi ve bu verilerin analiz edilerek ürünün sağlığı hakkında değerlendirmelerde bulunulması yönünde çalışmalar bulunmaktadır. IoT tabanlı sensör ve LoRa tabanlı haberleşme ile ürünün yetişkinlik seviyesi tespit edilip gübreleme veya hasat gibi süreçlerin başlatılmasına karar

verilmektedir. Bunun yanında ürünlerde oluşabilecek hastalıklar tespit edilebilmektedir. Özellikle son yıllarda üretim sonrası tarladan sofraya olarak adlandırılan anlayışla tarım ürünlerinin tedarik zincirinin ve tedarik koşullarının LoRa ve blok zinciri gibi uygulamalarla takip edilmesi önem kazanmaya ve yaygınlaşmaya başlamıştır [39-41].

Arshad ve arkadaşları optimum ürün verimi elde edebilmek için LoRa haberleşme temelli gerçek zamanlı izleme sistemi önermişlerdir. Önerilen sistem ürünle ilgili sensör modüllerinden aldığı verileri analiz ederek sulama ve gübreleme sistemlerinin otomatikleştirilmesini mümkün hale getirmişlerdir [42]. Ürün verimini artırmak için yapılan farklı bir çalışmada ise ARIMA tahmin modelini kullanan Agriprediction sistemi roka yetiştiriciliği üzerindeki uygulamada yaprak gelişimi açısından %17.94 ve ağırlık bakımından %14.29 oranında kazanç elde edilmiştir [43].

### **3.4. Sera Yönetimi (Greenhouse Management)**

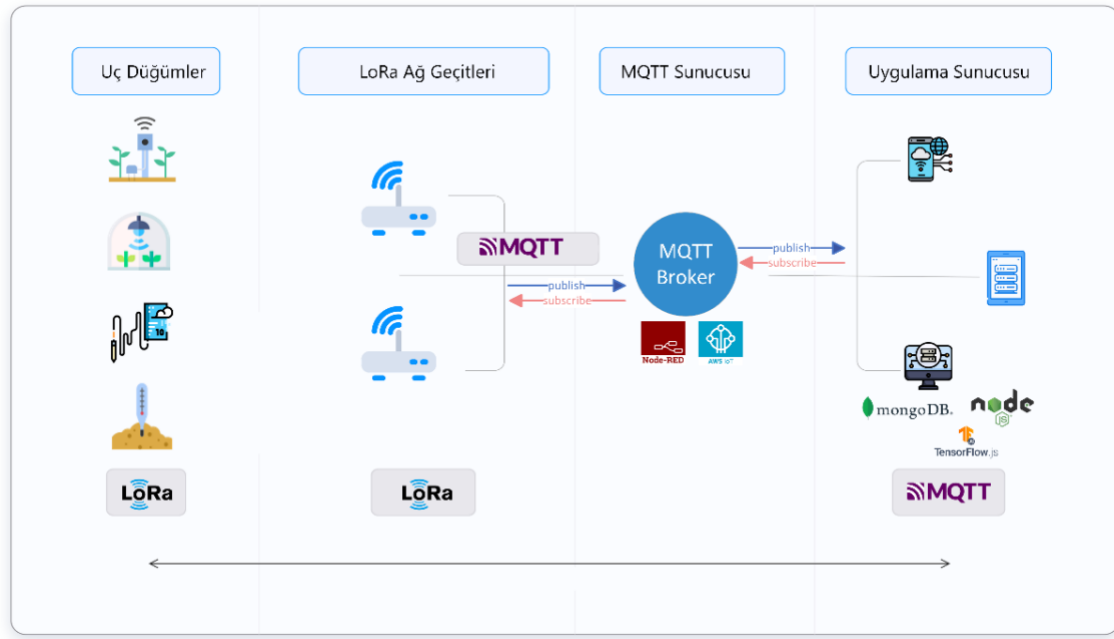
Akıllı seralar modern sensör, aktüatör ve iletişim teknolojileriyle donatılmış, mobil ve web ortamlarından kontrol edilebilen, kimi zaman otomatikleştirilmiş ve kişileştirilmiş karar destek mekanizmaları sunan yapılardır. Temelde iş gücü ve enerji gibi kaynakların verimli kullanılması ile ürünlerin kendine özgü uygun koşullarında yetişmesi gibi temel amaçlara hizmet ederler. Modern sensörlerden alınan veriler LoRa haberleşmesiyle ağ geçitlerine oradan da sunuculara iletilir. Gübreleme, sulama, havalandırma, ısıtma, soğutma gibi işlemlerin aktüatörler aracılığıyla uzaktan yönetilmesini mümkün kılar. Bunun yanında sensörlerden alınan veriler analiz edilerek ve otomatik karar mekanizmaları kurularak aktüatörler tetiklenebilir, meteoroloji gibi çeşitli servisler kullanılabilir.

Tripatyh ve arkadaşları sürdürülebilir tarım adına MyGreen isminde LoRa tabanlı akıllı sera sistemi önermiştir [44]. Nem, su besinleri çözelti seviyesi, toprak pH ve iletkenlik (EC) değeri, sıcaklık, UV ışık yoğunluğu, karbondioksit seviyesi, sis, insektisit ve pestisit miktarı gibi birçok parametreyi sensörler ve LoRa iletişimi aracılığıyla toplamaktadır. Sistem ile erken uyarı sistemi ve tüm aktiviteleri yönetebilen karar destek sistemi kurulmuştur. Huang ve arkadaşları çalışmasında [45] çoklu çevresel sensörlerle donatılmış çevrim içi sera izleme sistemi oluşturmuştur. Sensörler aracılığıyla çevresel parametreler elde edilmekte ve sıradan en küçük kareler (ordinary least square, OLS), destek vektör makinesi (support vector regressor, SVR), karar ağacı, rastgele orman ve eXtreme gradyan artırma (XGboost) makine öğrenmesi yöntemleri kullanarak sebze için en iyi klorofilini tespit etmektedir. Najmurokhman ve arkadaşları çalışmasında [46] LoRa iletişim protokolü ve bulanık mantık kontrolcüsü temelli seralarda ışık yoğunluğu ve nem kontrol sistemi önermiştir. Işık yoğunluğu ve nem bilgisini giriş olarak kabul eden bulanık sistem sulama süresini ve ultraviyole ledlerin durum kararlarını vermektedir. Sharofidinov ve arkadaşları ise sera yönetimi için LoRa temelli sınır bilişim sistemi (Edge Computing System) geliştirmiş böylece sunucuya gönderilecek olan veri miktarı azaltılmıştır [47].

### **4. ÖNERİLEN LORA TABANLI AKILLI TARIM MİMARİSİ (PROPOSED LORA-BASED SMART AGRICULTURE ARCHITECTURE)**

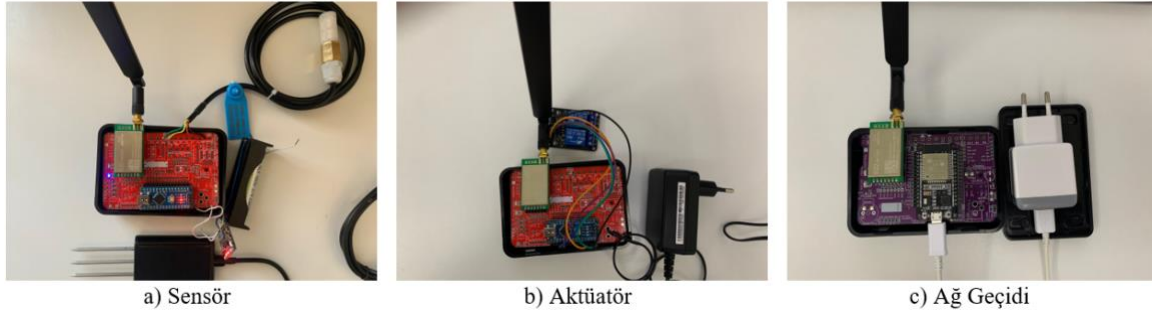
DeneySEL çalışmada, LoRa haberleşmesinin temel alındığı düşük enerji tüketimi ve geniş kapsama alanı sunan tarım sensör ve aktüatörlerinin web uygulamaları üzerinden; LSTM ve Pekiştirmeli öğrenme gibi derin öğrenme (Reinforcement learning) yöntemleriyle karar alarak otomatik şekilde süreçlerin kontrol edilebildiği akıllı tarım mimarisi üzerine durulmuştur. Önerilen mimari Şekil 3'de verilmiştir.





Şekil 3. Önerilen akıllı tarım mimarisi (*The proposed smart agriculture architecture*)

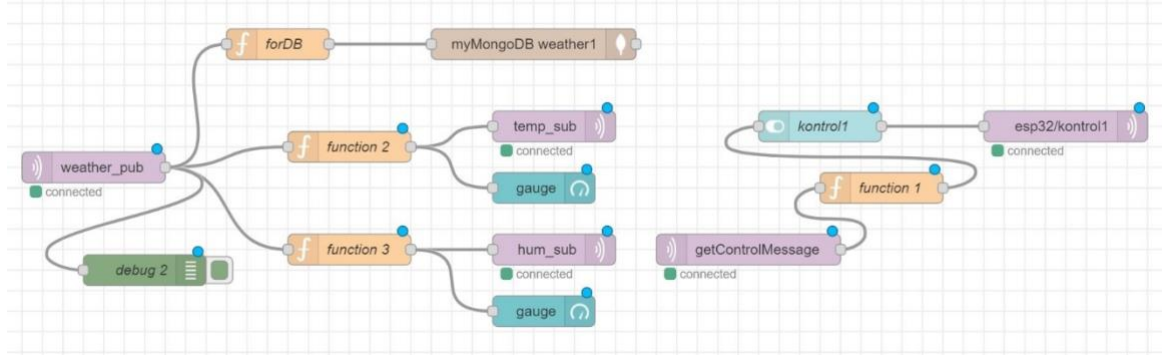
Şekil 3’de önerilen mimaride ilk olarak LoRa haberleşmesi temelli sensör ve aktüatörler geliştirilmiştir. Sensörler toprak sıcaklık-nem, ortam sıcaklık-nem; aktüatör ise havalandırma, ısıtma, sulama gibi sistemlerin çalıştırılmasında kullanılabilir role kontrolüdür. Sensörlerden alınan verilerin uygulama sunucularına ulaştırılması ve uygulamalardan gelen komutların aktüatörler tarafından alınmasını sağlayacak ağ geçitleri bulunmalıdır. Sensör, aktüatör ve ağ geçidi aygıtları Şekil 4’de verilmiştir.



Şekil 4. LoRa aygıtları (*LoRa devices*)

LoRa iletişimde uçtan uca şifreleme, gizli ağ yapısı imkanı sağlayan EBYTE’a ait 22900T22D LoRa modülü kullanılmıştır. Örnek uygulamada sıcaklık ve nem için Sht31 hava koşullarına dayanıklı sensörü ve 5 - 24V DC beslemeli -30 – 70 derece arasında çalışabilen paslanmaz toprak sıcaklık nem sensörü kullanılmıştır. Sensör ve aktüatörlerde arduino nano kullanılırken, ağ geçidi prototipinde internete çıkabilme özelliğine sahip ESP32 geliştirme kartı kullanılmıştır. Sensörlerde LoRa uyku modu ve düşük iletim imkânı sayesinde pil ile çalışmada yıllarca süren operasyon süresi sağlamaktadır.

IoT’de özellikle düşük enerji gerektiren ve karşılıklı haberleşmenin gerektiği uygulamalarda MQTT protokolü tercih edilmektedir. MQTT broker denilen mimari ile birçok aygıt ve nesne her an veri yayımlayabilir veya yayımlanan bir veriye üye olarak alabilir. Uygulamada bulut hizmet olan AWS IoT kullanılarak MQTT broker internete çıkmıştır. MQTT broker üzerinde Node-red programlama aracının sunduğu tarayıcı tabanlı düzenleme aracı örneği Şekil 5’de verilmiştir.



Şekil 5. Node-red web arayüzü: mqtt broker tasarımı (Node-red web interface: mqtt broker design)

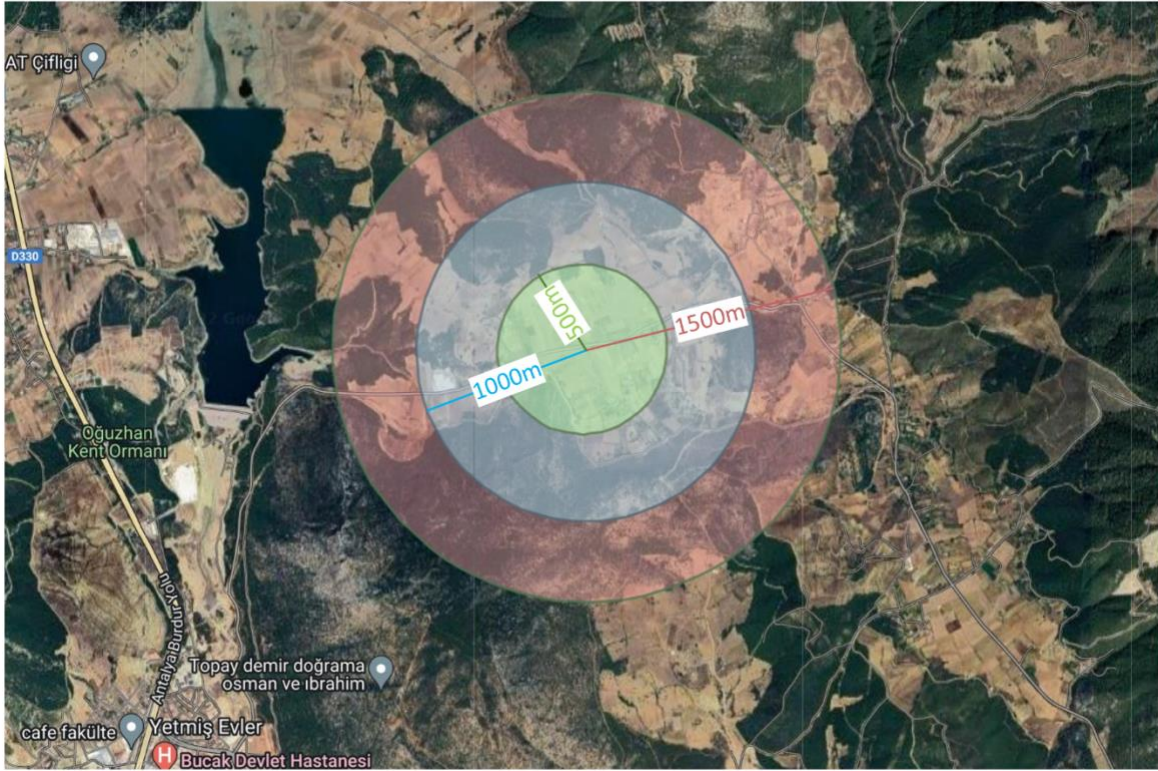
Sunucu tarafında MQTT broker ile anlık haberleşme sağlanması ve çeşitli tarımsal sensör veri sınırları dışına çıktığında otomatik tetikleme veya derin öğrenme temelli uygulamayla otomatik aygıt yönetimi yapılmasının sağlanması için arka planda bir javascript çerçevesi olan Node.js ve Express kütüphanesi kullanılmıştır. Derin öğrenme uygulamaları için tensorflow kütüphanesi uygulamaya dâhil edilmiştir.

Deneyel çalışmalarda LoRa modülleri için uygun ayarlamalar yapılmış [48] kullanılan ayarlamalar Tablo 2’de verilmiştir. Kapsama alanı ölçümleri için hava hızını ve paket boyutu mümkün olduğu kadar küçültülmüştür.

Tablo 2. LoRa iletişimde kullanılan ayarlamalar (Configurations used in LoRa communication)

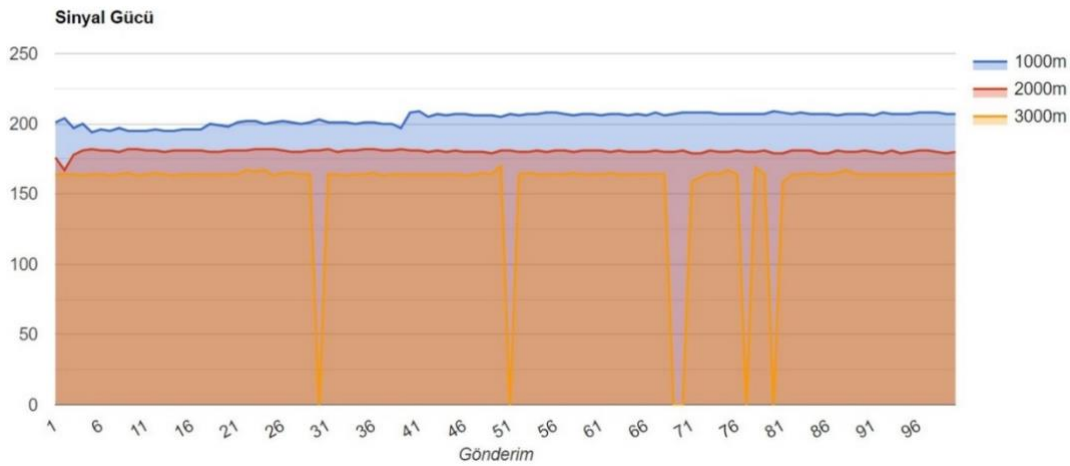
Özellik	Değer	Özellik	Değer
LoRa çalışma frekansı	868 MHz	Güç	22 dBm
Air rate	0.3 kbps	Anten kazanımı	5.0 Dbi
Paket boyutu	32 bayt	Lisanssız ISM	Lisanslı LTE

Deneyel çalışmalar Burdur ili Bucak ilçesinin tarım uygulama alanları üzerinde 1000, 2000 ve 3000 metre kapsama alanını ölçecek şekilde yapılmıştır. Uygulama ve kapsama alanları Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6. Bucak ilçesi sınırları içindeki tarım arazileri kapsama alanı  
(Coverage of agricultural lands within the borders of Bucak district)

Tarım alanlarının yoğun bulunduğu, yerleşimin az bulunduğu ve yükseltilerin sınırlı olduğu test alanında her kapsama alanı için toplam 100 adet veri gönderimi yapılmıştır. Sensörlerden ağ geçidine LoRa haberleşme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler neticesinde sinyal gücü ve kayıp gönderimler analiz edilmiş ve Şekil 7’de sunulmuştur.



Şekil 7. Sinyal gücü ve veri gönderim kayıpları (Signal strength and data transmission losses)

Veri gönderimlerinde 1000 ve 2000 metre çapında veri kaybı yaşanmazken 3000 metre çapta 6 veri gönderimi başarısız olmuştur. RSSI sinyal değeri 0-255 arasında değer almakla birlikte yüksek değer, sinyalin güçlü olduğu anlamına gelmektedir. 1000 metre çapta sinyal gücü 203.84, 2000 metre için 180.36 ortalama olurken 3000 metre

çap için ortalama 164.32 olarak ölçülmüştür. LoRA iletişimi UP ve DL olmak üzere çift yönlü haberleşmeye imkân verdiği için kayıp veriler oluşması durumunda geri bildirim alıp veri gönderimini tekrarlayarak sorunu çözebilmektedir.

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Son yıllarda nesnelerin interneti ve LoRa uygulama ve marketinin üstel ve kararlı şekilde büyümektedir. IOT ve haberleşme teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte hem uygulama sayıları artmakta hem de yeni uygulama sahaları ve problemleri oluşmaktadır. Nesnelerin internet temelinde tarım uygulamalarına özgü ihtiyaçlara bakıldığında, tarım arazilerinin geniş ve yerleşim yerlerine uzak olması sebebiyle iletişim teknolojilerinin bu bölgelere hizmet sunması ve geniş kapsama alanı sunulması kritik öneme sahiptir. Bir diğer problem de enerji kaynağına erişim olabilmektedir. LoRa ise geniş alanda düşük enerji ile iletişim sağlanmasına imkân veren iletişim teknolojisi olarak LPWAN teknolojileri arasında ön plana çıkmaktadır. Özellikle açık erişimli tanımlamaları, lisanssız ISM kullanması, maliyeti ve diğer LoRa ağlarıyla bütünleşebilirliği gibi özellikleri sayesinde günlük hayatımızda kullanımı hızlı bir şekilde yaygınlaşmaktadır.

Bu çalışmada LoRa ve LoRaWAN hakkında tanımlamalar, özellikler, diğer LPWAN teknolojileriyle kıyaslamalar sunulmuştur. LoRa'nın tarım alanındaki uygulamaları ele alınmış, çalışmalar sınıflandırılmış ve gelecek çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir. LoRa temelli akıllı tarım mimarisi önerilmiş ve performans analizi yapılmıştır. 3000 metre çapında bir alanda yapılan testlerde veri kaybının çok az olduğu ve sinyalin güçlü olduğu saptanmıştır.

Özellikle blok zinciri ve iot temelli uygulamalarda tarladan sofraya ürünlerin takip edilmesi, kimliklendirilmesi ve sertifikalandırılarak ürünlerin değerinin korunması çalışmalarının önem kazanması ve yaygınlaşması beklenmektedir. Diğer taraftan robotik uygulamalarının gelişmesiyle LoRa haberleşmesi hem kara hem de hava otonom araçlarıyla kullanılarak tarım otomasyonlarının gelişeceği düşünülmektedir. Araştırmacılara ise ölçeklenebilirlik, kapsama alanı, enerji tüketimi, güvenlik gibi konularda geliştirme çalışmalarıyla geniş yelpazedeki uygulama alanında önemli araştırma sahası açtığı söylenebilir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES )

- [1] U. Nations, "World population to reach 8 billion on 15 November 2022," 2022. [Online]. Available: [link](#)
- [2] U. Nations, "Policies on spatial distribution and urbanization have broad impacts on sustainable development," 2020. [Online]. Available: [link](#)
- [3] M. A. Almuha, W. A. Jabbar, N. Sulaiman, and S. Abdulmalek, "A Survey on LoRaWAN Technology: Recent Trends, Opportunities, Simulation Tools and Future Directions," *Electronics*, vol. 11, no. 1, p. 164, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/electronics11010164>.
- [4] S. Oyucu and H. Polat, "M2M ve IoT platformları üzerinde prototip uygulama geliştirme," *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi*, vol. 9, no. 2, pp. 11-20, 2017.
- [5] S. Zeadally, F. K. Shaikh, A. Talpur, and Q. Z. Sheng, "Design architectures for energy harvesting in the Internet of Things," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 128, p. 109901, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109901>.
- [6] S.-Y. Wang, J.-E. Chang, H. Fan, and Y.-H. Sun, "Comparing the performance of NB-IoT, LTE Cat-M1, Sigfox, and LoRa for IoT end devices moving at high speeds in the air," *Journal of Signal Processing Systems*, vol. 94, no. 1, pp. 81-99, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s11265-021-01660-4>.
- [7] R. Boisguene, S.-C. Tseng, C.-W. Huang, and P. Lin, "A survey on NB-IoT downlink scheduling: Issues and potential solutions," in *2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, 2017: IEEE, pp. 547-551, doi: <https://doi.org/10.1109/IWCMC.2017.7986344>.

- [8] A. Lavric, A. I. Petrariu, and V. Popa, "SigFox communication protocol: The new era of IoT?," in *2019 international conference on sensing and instrumentation in IoT Era (ISSI)*, 2019: IEEE, pp. 1-4, doi: <https://doi.org/10.1109/ISSI47111.2019.9043727>.
- [9] N. Naik, "LPWAN technologies for IoT systems: choice between ultra narrow band and spread spectrum," in *2018 IEEE international systems engineering symposium (ISSE)*, 2018: IEEE, pp. 1-8, doi: <https://doi.org/10.1109/SysEng.2018.8544414>.
- [10] J. P. Queralt, T. N. Gia, Z. Zou, H. Tenhunen, and T. Westerlund, "Comparative study of LPWAN technologies on unlicensed bands for M2M communication in the IoT: Beyond LoRa and LoRaWAN," *Procedia Computer Science*, vol. 155, pp. 343-350, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.08.049>.
- [11] A. I. PETRARIU and A. LAVRIC, "Sigfox wireless communication enhancement for internet of things: A study," in *2021 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, 2021: IEEE, pp. 1-4, doi: <https://doi.org/10.1109/ATEE52255.2021.9425213>.
- [12] P. Datta and B. Sharma, "A survey on IoT architectures, protocols, security and smart city based applications," in *2017 8th International conference on computing, communication and networking technologies (ICCCNT)*, 2017: IEEE, pp. 1-5, doi: <https://doi.org/10.1109/ICCCNT.2017.8203943>.
- [13] M. Bor, J. E. Vidler, and U. Roedig, "LoRa for the Internet of Things," 2016.
- [14] M. Jouhari, E. M. Amhoud, N. Saeed, and M.-S. Alouini, "A Survey on Scalable LoRaWAN for Massive IoT: Recent Advances, Potentials, and Challenges," *arXiv preprint arXiv:2202.11082*, 2022, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.11082>.
- [15] P. Ferrari *et al.*, "Simulating scalability of a transparent LoRaWAN enhancement for emergency communication," in *2022 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT (MetroInd4.0&IoT)*, 2022: IEEE, pp. 349-353, doi: <https://doi.org/10.1109/MetroInd4.0IoT54413.2022.9831495>.
- [16] M. A. Ertürk, M. A. Aydın, M. T. Büyükakkaşlar, and H. Evirgen, "A survey on LoRaWAN architecture, protocol and technologies," *Future Internet*, vol. 11, no. 10, p. 216, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/fi11100216>.
- [17] V. A. Dambal, S. Mohadikar, A. Kumbhar, and I. Guvenc, "Improving LoRa signal coverage in urban and sub-urban environments with UAVs," in *2019 International Workshop on Antenna Technology (iWAT)*, 2019: IEEE, pp. 210-213, doi: <https://doi.org/10.1109/IWAT.2019.8730598>.
- [18] J. P. S. Sundaram, W. Du, and Z. Zhao, "A survey on lora networking: Research problems, current solutions, and open issues," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 1, pp. 371-388, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2949598>.
- [19] B. B. Sinha and R. Dhanalakshmi, "Recent advancements and challenges of Internet of Things in smart agriculture: A survey," *Future Generation Computer Systems*, vol. 126, pp. 169-184, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.future.2021.08.006>.
- [20] R. S. Sinha, Y. Wei, and S.-H. Hwang, "A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT," *Ict Express*, vol. 3, no. 1, pp. 14-21, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ict.2017.03.004>.
- [21] W. Zhao, S. Lin, J. Han, R. Xu, and L. Hou, "Design and implementation of smart irrigation system based on LoRa," in *2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2017: IEEE, pp. 1-6, doi: <https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2017.8269115>.
- [22] A. H. Ali, R. F. Chisab, and M. J. Mnati, "A smart monitoring and controlling for agricultural pumps using LoRa IOT technology," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 13, no. 1, pp. 286-292, 2019, doi: 10.11591/ijeecs.v13.i1.pp286-292.

- [23] Y.-C. Chang, T.-W. Huang, and N.-F. Huang, "A machine learning based smart irrigation system with lora p2p networks," in *2019 20th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS)*, 2019: IEEE, pp. 1-4, doi: <https://doi.org/10.23919/APNOMS.2019.8893034>.
- [24] I. Froiz-Míguez *et al.*, "Design, implementation, and empirical validation of an IoT smart irrigation system for fog computing applications based on Lora and Lorawan sensor nodes," *Sensors*, vol. 20, no. 23, p. 6865, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/s20236865>.
- [25] L. Lyu, J. M. Caballero, and R. A. Juanatas, "Design of Irrigation Control System for Vineyard Based on LoRa Wireless Communication and Dynamic Neural Network," in *2022 7th International Conference on Business and Industrial Research (ICBIR)*, 2022: IEEE, pp. 373-378, doi: <https://doi.org/10.1109/ICBIR54589.2022.9786439>.
- [26] W. Chen, X. Jiang, M. Chen, Q. Liang, and B. Zhang, "Development and Analysis of Solenoid Valve Controller Based on LoRa Technology," in *Wireless Technology, Intelligent Network Technologies, Smart Services and Applications*: Springer, 2022, pp. 153-160.
- [27] B. Mallikarjun, R. Ranjitha, R. Rakshith, N. M. HS, K. Yashavantha, and P. Rakshith, "LoRa Technology Based Farm Irrigation Control System," in *2021 10th International Conference on Internet of Everything, Microwave Engineering, Communication and Networks (IEMECON)*, 2021: IEEE, pp. 1-5, doi: <https://doi.org/10.1109/IEMECON53809.2021.9689074>.
- [28] D. K. Singh, R. Sobti, A. Jain, P. K. Malik, and D. N. Le, "LoRa based intelligent soil and weather condition monitoring with internet of things for precision agriculture in smart cities," *IET Communications*, vol. 16, no. 5, pp. 604-618, 2022, doi: <https://doi.org/10.1049/cmu2.12352>.
- [29] F. Sánchez-Sutil and A. Cano-Ortega, "Smart Control and Energy Efficiency in Irrigation Systems Using LoRaWAN," *Sensors*, vol. 21, no. 21, p. 7041, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/s21217041>.
- [30] C. Baydur, S. Sahin, A. Gökçen, and B. Yeşil, "ARM Based Smart Water Meter with LoRa for Soilless Agriculture Application," *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, no. 26, pp. 352-357, 2021, doi: <https://doi.org/10.31590/ejosat.957639>.
- [31] U. Bodkhe, S. Tanwar, P. Bhattacharya, and N. Kumar, "Blockchain for precision irrigation: Opportunities and challenges," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, p. e4059, 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/ett.4059>.
- [32] K. Dey and U. Shekhawat, "Blockchain for sustainable e-agriculture: Literature review, architecture for data management, and implications," *Journal of Cleaner Production*, vol. 316, p. 128254, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128254>.
- [33] W. Xue-fen, D. Xing-jing, Y. Yi, Z. Jing-wen, M. S. Sardar, and C. Jian, "Smartphone based LoRa in-soil propagation measurement for wireless underground sensor networks," in *2017 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA)*, 2017: IEEE, pp. 114-117, doi: <https://doi.org/10.1109/CAMA.2017.8273371>.
- [34] A. F. Rachmani and F. Y. Zulkifli, "Design of iot monitoring system based on lora technology for starfruit plantation," in *TENCON 2018-2018 IEEE Region 10 Conference*, 2018: IEEE, pp. 1241-1245, doi: <https://doi.org/10.1109/TENCON.2018.8650052>.
- [35] S. S. Bhattacharjee, S. Shreeshan, G. Priyanka, A. R. Jadhav, P. Rajalakshmi, and J. Kholova, "Cloud based low-power long-range iot network for soil moisture monitoring in agriculture," in *2020 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, 2020: IEEE, pp. 1-5, doi: <https://doi.org/10.1109/SAS48726.2020.9220017>.

- [36] F. Deng, P. Zuo, K. Wen, and X. Wu, "Novel soil environment monitoring system based on RFID sensor and LoRa," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 169, p. 105169, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105169>.
- [37] Z. Chang, F. Zhang, J. Xiong, J. Ma, B. Jin, and D. Zhang, "Sensor-free Soil Moisture Sensing Using LoRa Signals," *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, vol. 6, no. 2, pp. 1-27, 2022, doi: <https://doi.org/10.1145/3534608>.
- [38] D. Kiv, G. Allabadi, B. Kaplan, and R. Kravets, "smol: Sensing Soil Moisture using LoRa," in *Proceedings of the 1st ACM Workshop on No Power and Low Power Internet-of-Things*, 2022, pp. 21-27, doi: <https://doi.org/10.1145/3477085.3478991>.
- [39] J. Lin, Z. Shen, A. Zhang, and Y. Chai, "Blockchain and IoT based food traceability for smart agriculture," in *Proceedings of the 3rd international conference on crowd science and engineering*, 2018, pp. 1-6, doi: <https://doi.org/10.1145/3265689.3265692>.
- [40] S. V. Akram, P. K. Malik, R. Singh, G. Anita, and S. Tanwar, "Adoption of blockchain technology in various realms: Opportunities and challenges," *Security and Privacy*, vol. 3, no. 5, p. e109, 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/spy2.109>.
- [41] M. A. Ferrag, L. Shu, X. Yang, A. Derhab, and L. Maglaras, "Security and privacy for green IoT-based agriculture: Review, blockchain solutions, and challenges," *IEEE access*, vol. 8, pp. 32031-32053, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2973178>.
- [42] J. Arshad *et al.*, "Implementation of a LoRaWAN based smart agriculture decision support system for optimum crop yield," *Sustainability*, vol. 14, no. 2, p. 827, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/su14020827>.
- [43] U. J. L. dos Santos, G. Pessin, C. A. da Costa, and R. da Rosa Righi, "AgriPrediction: A proactive internet of things model to anticipate problems and improve production in agricultural crops," *Computers and electronics in agriculture*, vol. 161, pp. 202-213, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.10.010>.
- [44] P. K. Tripathy, A. K. Tripathy, A. Agarwal, and S. P. Mohanty, "MyGreen: An IoT-enabled smart greenhouse for sustainable agriculture," *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 10, no. 4, pp. 57-62, 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/MCE.2021.3055930>.
- [45] W. Huang, M. Chiu, L. Yeh, and C. Chiu, "Remote control of greenhouse hybridized with AI technique and LoRa communication," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2020, no. 1: IOP Publishing, p. 012006, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2020/1/012006>.
- [46] A. Najmurokhman, K. Kusnandar, U. Komarudin, R. Rachmalia, and H. Subarli, "Fuzzy Logic Controller for Light Intensity and Humidity Control System of Greenhouse and Its Monitoring using LoRa communication protocol," in *2021 International Seminar on Machine Learning, Optimization, and Data Science (ISMODE)*, 2022: IEEE, pp. 69-74, doi: <https://doi.org/10.1109/ISMODE53584.2022.9742801>.
- [47] F. Sharofidinov, M. S. A. Muthanna, V. D. Pham, A. Khakimov, A. Muthanna, and K. Samouylov, "Agriculture management based on lora edge computing system," in *International Conference on Distributed Computer and Communication Networks*, 2020: Springer, pp. 113-125, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-66471-8\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-66471-8_10).
- [48] E. Duman , M. Altıntaş , İ. Gül ve M. Dolu , "LPWAN Teknolojileri ve Uygulama Alanlarının Karşılaştırmalı İncelemesi", *Veri Bilimi*, c. 5, sayı. 1, ss. 34-44, Eki. 2022.