



**T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SERA ORTAMINDA BAZI ÇEVRESEL
PARAMETRELERİN LORAWAN KABLOSUZ
İLETİŞİM PROTOKOLÜ KULLANILARAK
UZAKTAN İZLENMESİ**

MUSTAFA KARA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
BİYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

KAHRAMANMARAŞ 2025

T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SERA ORTAMINDA BAZI ÇEVRESEL
PARAMETRELERİN LORAWAN KABLOSUZ
İLETİŞİM PROTOKOLÜ KULLANILARAK
UZAKTAN İZLENMESİ

MUSTAFA KARA

Bu tez,
Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS
derecesi için hazırlanmıştır.

KAHRAMANMARAŞ 2025

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Mustafa KARA

Bu çalışma Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.

Proje No: 2023/3-11 YLS

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bilgilerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

**SERA ORTAMINDA BAZI ÇEVRESEL PARAMETRELERİN LORAWAN
KABLOSUZ İLETİŞİM PROTOKOLÜ KULLANILARAK UZAKTAN
İZLENMESİ
(YÜKSEK LİSANS TEZİ)**

**MUSTAFA KARA
ÖZET**

Günümüzde tarımsal üretimde verimliliğin artırılması, kaynak kullanımının optimize edilmesi ve çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması amacıyla hassas tarım uygulamaları giderek yaygınlaşmaktadır. Bu kapsamda, üretim ortamına ilişkin verilerin toplanması ve gerçek zamanlı olarak izlenmesi büyük önem arz etmektedir. Kablosuz haberleşme teknolojileri, geniş alanlarda kurulan tarımsal sensör ağlarının etkin bir şekilde çalışmasına imkân tanıyarak sahadan sürekli veri akışı sağlanmasına olanak vermektedir. Bu bağlamda, LoRaWAN (Long Range Wide Area Network), geniş kapsama alanı, düşük enerji tüketimi ve düşük maliyet gibi avantajları sayesinde, günümüzde tarımsal üretim süreçlerinde verilerin toplanması, analiz edilmesi ve uzaktan kontrol sistemlerinin uygulanması için tercih edilen bir iletişim teknolojisi haline gelmiştir. Bu çalışma kapsamında, bir sera ortamında sıcaklık, nem, toprak nemi ve elektriksel iletkenlik (EC) değerlerinin ölçülmesi amacıyla kullanılan LoRaWAN sensörlerinden elde edilen verilerin, The Things Network (TTN) konsolu aracılığıyla Node-RED platformuna aktarılması ve bu verilerin CSV (Comma Separated Values, virgülle ayrılmış değerler) formatında kaydedilmesi hedeflenmiştir. Veriler, 16-04-2024 23:55 ile 09-07-2024 11:08 tarihleri arasında 20 dakikalık aralıklarla kaydedilmiş ve analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, toprak su içeriği (Tsu) ile toprak elektrik iletkenliği (Ti) arasında elde edilen R^2 değeri 0.8381 olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, iki değişken arasında güçlü bir doğrusal ilişki olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, çalışmada toprak iletkenliğini tahmin etmek amacıyla çoklu doğrusal regresyon (Multiple Linear Regression) modeli kullanılmıştır. Söz konusu modelde, bağımlı değişken olarak Ti, bağımsız değişkenler olarak ise toprak sıcaklığı (Ts), Tsu, ortam nemi (On) ve ortam sıcaklığı (Os) kullanılmıştır. Modelin uygulanması sonucunda elde edilen R^2 değeri 0.8879 olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak, bu çalışmanın, akıllı tarım uygulamaları kapsamında veri toplama, veri analizi ve uzaktan izleme süreçlerinin geliştirilmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: LoRaWAN, Akıllı tarım, Kablosuz haberleşme.

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi
Fen Bilimler Enstitüsü
Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı, Ocak/2025

Danışman: Doç. Dr. Hayrettin KARADÖL
Sayfa Sayısı: 36

**REMOTE MONITORING OF CERTAIN ENVIRONMENTAL PARAMETERS IN
A GREENHOUSE USING THE LORAWAN WIRELESS COMMUNICATION
PROTOCOL**

(M.Sc. THESIS)

MUSTAFA KARA

ABSTRACT

Today, precision agriculture practices are becoming increasingly widespread with the aim of enhancing productivity in agricultural production, optimizing resource use, and ensuring environmental sustainability. In this context, collecting data from the production environment and monitoring it in real-time is of great importance. Wireless communication technologies enable the effective operation of agricultural sensor networks established over large areas, facilitating continuous data flow from the field. In this regard, LoRaWAN (Long Range Wide Area Network), with its advantages such as wide coverage area, low energy consumption, and low cost, has become a preferred communication technology for data collection, analysis, and remote control systems in agricultural production processes. This study aims to measure temperature, humidity, soil moisture, and electrical conductivity (EC) in a greenhouse environment using LoRaWAN sensors, transfer the collected data to the Node-RED platform via The Things Network (TTN) console, and save the data in Comma Separated Values (CSV) format. Data were recorded and analyzed at 20-minute intervals between April 16, 2024, 23:55 and July 9, 2024, 11:08. The analysis results revealed that the coefficient of determination (R^2) between soil moisture (T_{su}) and soil electrical conductivity (T_i) was 0.8381, indicating a strong linear relationship between these two variables. Furthermore, a Multiple Linear Regression model was employed to predict soil electrical conductivity. In this model, T_i was used as the dependent variable, while soil temperature (T_s), T_{su} , ambient humidity (O_n), and ambient temperature (O_s) were used as independent variables. As a result, an R^2 value of 0.8879 was obtained. In conclusion, this study is expected to contribute to the development of data collection, analysis, and remote monitoring processes in smart agriculture applications.

Key words: LoRaWAN, Smart Agriculture, Wireless Communication.

Kahramanmaraş Sütçü Imam University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Biosystems Engineering, January/2025

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hayrettin KARADÖL

Page number: 36

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimin boyunca bilgilerinden faydalandığım, insani ve ahlaki değerleri ile de örnek edindiğim, beraber çalışmaktan onur duyduğum ve ayrıca tecrübelerinden yararlanırken göstermiş olduğu hoşgörü ve sabırdan dolayı değerli danışman hocam, **Doç. Dr. Hayrettin KARADÖL**'e ve katkılarından dolayı değerli hocam **Prof. Dr. Ali AYBEK**'e teşekkür ederim.

Hayatım boyunca hep destekçim olan **annem, babam, abim, ablam** ve özellikle tez yazım aşamasında katkıda bulunan kardeşim **Melike Hayriye KARA**'ya ve çalışmalarım boyunca bana hep destek olan değerli eşim **Özge**'ye, kızım **Doğa** ve oğlum **Sarp**'a teşekkür ederim.

Mustafa KARA

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. LoRa Modülasyonu Nedir?.....	2
1.2. LoRaWAN Nedir?	7
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	9
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	14
3.1. Materyal	14
3.1.1. Ağ Geçidi (Gateway)	15
3.1.2. Sıcaklık-Nem Sensörü.....	16
3.1.3. Toprak Nem ve EC Sensörü.....	17
3.2. Yöntem	18
3.2.1. Gateway ve sensörlerin TTN sunucusuna kaydedilmesi.....	20
3.2.2. Sensör verilerinin TTN sunucusuna iletilmesi	22
3.2.3. Verilerin JSON Formatına Dönüştürülmesi	22
3.2.4. Raspberry Pi cihazına Node-Red ve MQTT kurulumunun yapılması	23
3.2.5. Verilerin MQTT protokolü kullanılarak Node-RED'e aktarılması.....	23
3.2.6. Verilere tarih ve saat damgası eklenmesi	23
3.2.7. Verilerin CSV Formatında Kaydedilmesi	24
3.2.8. Çoklu Doğrusal Regresyon Modeli (Multiple Linear Regression)	24
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	26
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	30
KAYNAKLAR.....	31
EKLER	34

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ABP	: Kişiselleştirme ile Aktif Etme
ADC	: Analog-Dijital Çevirici
AS	: Uygulama Sunucusu
CRC	: Hata Denetim Kodu
CSS	: Chirp Spread Spectrum
CSV	: Comma Separated Values, Virgülle Ayrılmış Değerler
IoT	: Nesnelerin İnterneti
JS	: Join Server
JSON	: JavaScript Object Notation
LoRa	: Long Range
LoRa PHY	: LoRa Fiziksel Katman
LoRaWAN	: Long Range Wide Area Network
LPWAN	: Düşük Güçlü Geniş Alan Ağları
MCU	: Mikrodenetleyici
NS	: Ağ Sunucusu
On	: Ortam Nemi
Os	: Ortam Sıcaklığı
OTAA	: Havadan Aktif Etme
RF	: Radyo Frekansı
SF	: Yayılma Faktörü
Ti	: Toprak Elektrik İletkenliği
Ts	: Toprak Sıcaklığı
Tsu	: Toprak Su İçeriği
TTN	: The Things Network

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 1.1. Chirp yayılma spektrumu (CSS) up chirp frekansı	2
Şekil 1.2. Chirp modülasyonu	3
Şekil 1.3. Referans chirp sinyali için zaman-genlik, zaman-frekans ve spektrogram grafikleri	3
Şekil 1.4. Modüle edilmiş chirp sinyali için zaman-genlik, zaman-frekans ve spektrogram grafikleri (sembol 0)	4
Şekil 1.5. Modüle edilmiş chirp sinyali için zaman-genlik, zaman-frekans ve spektrogram grafikleri (Sembol 120)	5
Şekil 1.6. Modüle edilmiş chirp sinyali için zaman-genlik, zaman-frekans ve spektrogram grafikleri (Sembol 750)	6
Şekil 1.7. 868 MHz SX1276 LoRa Modülü	6
Şekil 1.8. LoRaWAN ağı mimarisi	8
Şekil 3.1. Ortam verileri kaydedilen sera	14
Şekil 3.2. Ağ geçidi (Dragino DLOS8N)	15
Şekil 3.3. LoRaWAN sıcaklık nem sensörü	16
Şekil 3.4. LoRaWAN toprak nem ve EC sensörü	17
Şekil 3.5. Sensörler ve gateway cihazının bulunduğu noktalar ve aralarındaki mesafe.....	19
Şekil 3.6. Sensör verilerinin kaydedilme sürecine ait akış diyagramı.....	20
Şekil 3.7. TTN sunucu konsol arayüzü.....	21
Şekil 3.8. Node Red program arayüzü.....	23
Şekil 4.1. Sera Os değişimi.....	26
Şekil 4.2. Sera On değişimi	26
Şekil 4.3. Tsu değerinin değişimi	27
Şekil 4.4. Ti değerinin değişimi	27
Şekil 4.5. Os ve Ts değişimleri.....	28
Şekil 4.6. Ti ile Tsu arasındaki doğrusal regresyon ilişkisi.....	28
Şekil 4.7. Ti tahmini (Multiple linear regression)	29

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. LHT65N sensörü teknik özellikleri.....	16
Çizelge 3.2. Toprak nem ve EC sensörü teknik özellikleri	18



1. GİRİŞ

Tarım, günümüzde dünya nüfusunun artan gıda talebi nedeniyle birçok ülkede ekonominin en önemli sektörlerinden biridir. Gıda ihtiyacı arttıkça, tarımsal verimliliği arttırmak ve girdi maliyetlerini en aza indirmek gerekmektedir. Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojileri uygulamalarının artmasıyla birlikte işletmelerin ürün verimliliğini artırmak amacıyla uzaktan izleme, kontrol ve veri işleme gibi yeni çözüm yöntemlerine olan ilgileri giderek artmaktadır. Genel olarak veri odaklı teknolojiler, Nesnelerin İnterneti ile hızlı bir şekilde ilerlemekte olup, tarımın geleceği açısından önemli bir yere sahip olacağı görülmektedir (Brewster ve ark., 2017; Jayaraman ve ark., 2016; Verdouw ve ark., 2016; Wolfert ve ark., 2017). IoT, verileri yakalamak, iletmek, yönetmek ve analiz etmek için ağa bağlı sensörler ve makinelerin birleşimidir. Sensörlerden gelen veriler önce kablosuz olarak bir sunucuya yüklenir. Daha sonra veriler analiz ve hesaplama için internette kullanılabilir. Son olarak sunucu, görevleri yürütmek için sahadaki aktüatörlere kablosuz olarak komutlar gönderir. IoT sistemlerindeki çeşitli kablosuz teknolojiler, Wi-Fi, hücresel ağ (GPRS, LTE), ZigBee ve LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) gibi sistemlerdir ve bu sistemlerin tarımsal üretim süreçlerindeki kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bu sistemlerin her biri farklı avantajlar sunmaktadır. Wi-Fi, yüksek hızda veri iletimi sağlayarak kısa mesafeli iletişimde kullanılırken, hücresel ağlar (GPRS ve LTE), geniş kapsama alanı sunarak büyük tarım arazilerinde sürekli bağlantı imkânı sağlamaktadır. ZigBee, düşük enerji tüketimi ile kısa mesafeli ve düşük veri hızına sahip sensör ağları için idealdir ve mesh ağ yapısıyla daha geniş alanlar kapsanabilir. LoRaWAN ise düşük enerji tüketimi ve kilometrelerce uzaklıktaki cihazlarla iletişim kurma özelliği sayesinde geniş alanlarda veri iletimi sağlar, ancak veri hızı düşüktür. Bu teknolojilerin seçiminde, hedeflenen uygulamanın yapısı ve kurulum maliyetleri önemli etkiye sahiptir (Kumar ve ark., 2020).

LoRaWAN teknolojisi, düşük enerji tüketimi ve geniş menzil özellikleriyle tarımsal üretimde veri toplama ve iletimi için ideal bir çözüm sunmaktadır. Bu teknoloji, su kaynaklarının verimli kullanımı için sulama yönetiminde, çevresel faktörlerin izlenmesi ve hızlı adaptasyon için iklim verilerinin toplanmasında, ürün sağlığı ve hastalıkların erken teşhisinde, büyük çiftlik alanlarında hayvanların izlenmesi ve yönetiminde (Karadöl ve ark., 2023), depolarda ürün kalitesinin korunması ve lojistik süreçlerin optimize edilmesinde (Mowla ve ark., 2023) ve sera ortamlarının kontrol edilmesi (Salih ve ark., 2020; Singh ve ark., 2020) gibi alanlarda kullanılmaktadır. Bu alanlardaki uygulamaları,

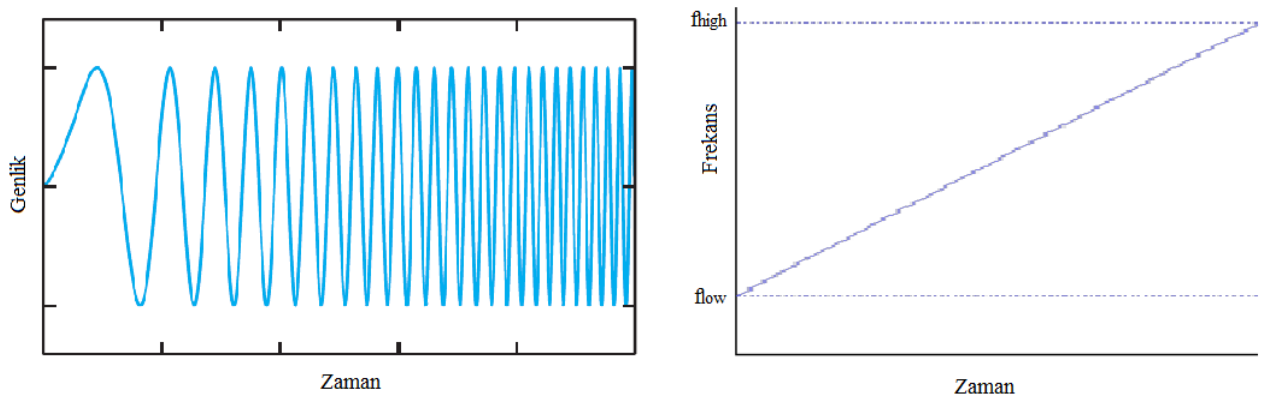
tarımsal süreçlerde sürdürülebilirlik ve verimlilik sağlanmasına önemli katkılar sunmaktadır.

1.1. LoRa Modülasyonu Nedir?

LoRa (Long Range) sinyali, Chirp Spread Spectrum (CSS) adı verilen bir modülasyon tekniği ile üretilmektedir. CSS modülasyonu, sinyalin frekansını zaman içinde sürekli olarak artırarak (upchirp) veya azaltarak (downchirp) veri iletimi sağlar. Bu yaklaşım, hem yüksek gürültü dayanıklılığı hem de uzun mesafelerde düşük enerji tüketimi sunar. LoRa, genellikle düşük güçlü geniş alan ağları (LPWAN) için tercih edilen bir teknolojidir (Augustin ve ark., 2016).

Bu modülasyon tekniğinde, veri bitleri zaman içinde frekans kaymasıyla kodlanır. Her veri sembolü, frekansı zaman içinde artan ya da azalan bir sinyale karşılık gelir. Bu işlem, sinyalin yayılmasını (spread spectrum) sağlar ve LoRa sinyalinin düşük güçle uzun mesafelerde iletilmesini mümkün kılmaktadır. LoRa'nın bu özelliği, geniş arazilerde sensör verilerinin uzak mesafelere iletilmesi gereken durumlarda önemli avantajlar sunmaktadır (Centenaro ve ark., 2016; Adelantado ve ark., 2017).

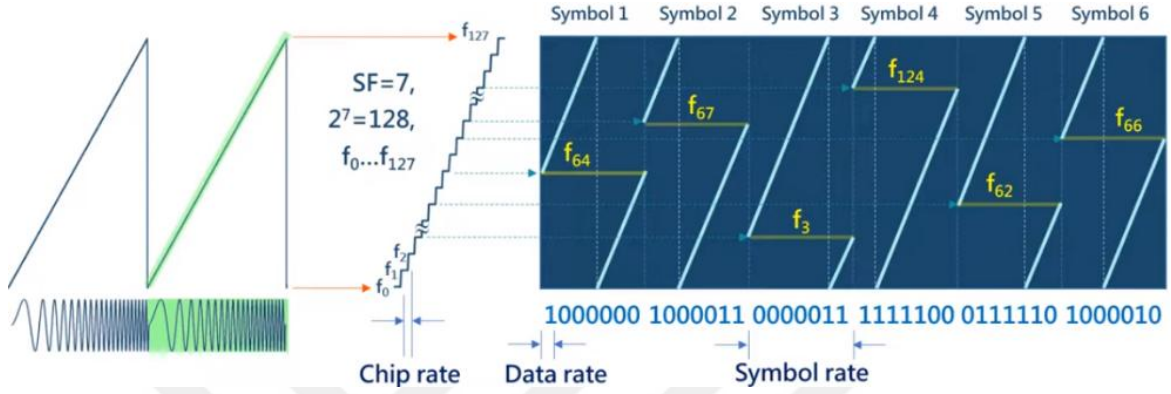
Şekil 1.1'de upchirp görülmektedir. Up chirp sinyali, başlangıç frekansı ile hedef frekans arasında bir frekans kayması yaparak veri iletimini gerçekleştirir. Downchirp sinyali ise aynı işlemi ters yönde yapar. Bu frekans kaymaları, sinyalin gürültüye karşı dayanıklılığını artırır ve veri iletiminin uzun mesafelerde güvenilir olmasını sağlar (Mikhaylov ve ark., 2016; Baccarelli ve ark., 2017).



Şekil 1.1. Chirp yayılma spektrumu (CSS) up chirp frekansı

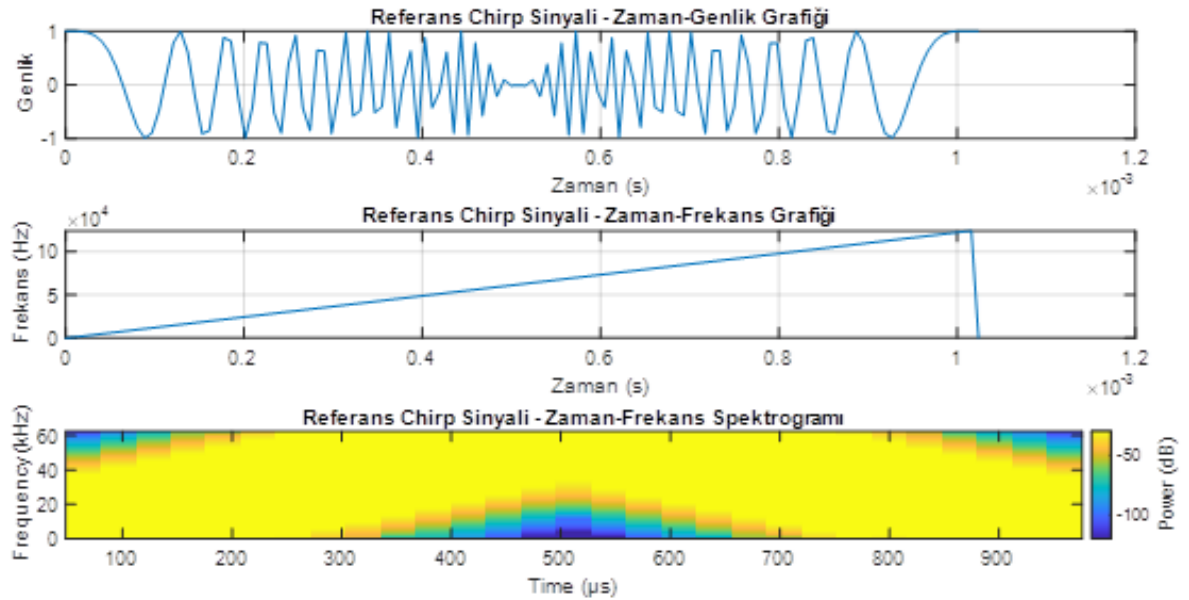
LoRa modülasyonunda frekansın yayılma hızı (minimum değerden maksimum değere ulaşma süresi) yayılma faktörü (SF) olarak ifade edilmektedir. Yayılma faktörü 7-

12 değerleri arasında değişmektedir. Örneğin SF değerinin 7 olması durumunda band genişliği 2^{SF} değeri kadar adıma bölünmektedir ve her bir sembolün başlangıç frekansı 7 bitlik datayı ifade etmektedir (Şekil 1.2). SF değerinin düşük olması durumunda chirp (cıvıltı) frekansı maksimum değere daha hızlı erişmekte ve dolayısıyla birim zamanda daha fazla data aktarımı gerçekleştirilmektedir ancak chirp sinyalinin gürültü sinyalinden ayrışması zorlaşmakta ve hata oranı artmaktadır.



Şekil 1.2. Chirp modülasyonu

Şekil 1.3'te Matlab programı ortamında oluşturulan referans chirp sinyali ve bu sinyalin modüle edilmesiyle elde edilen sembollere (0,120 ve 750) ilişkin zaman-genlik, zaman-frekans ve spektrogram grafiklerinin değişimleri görülmektedir.

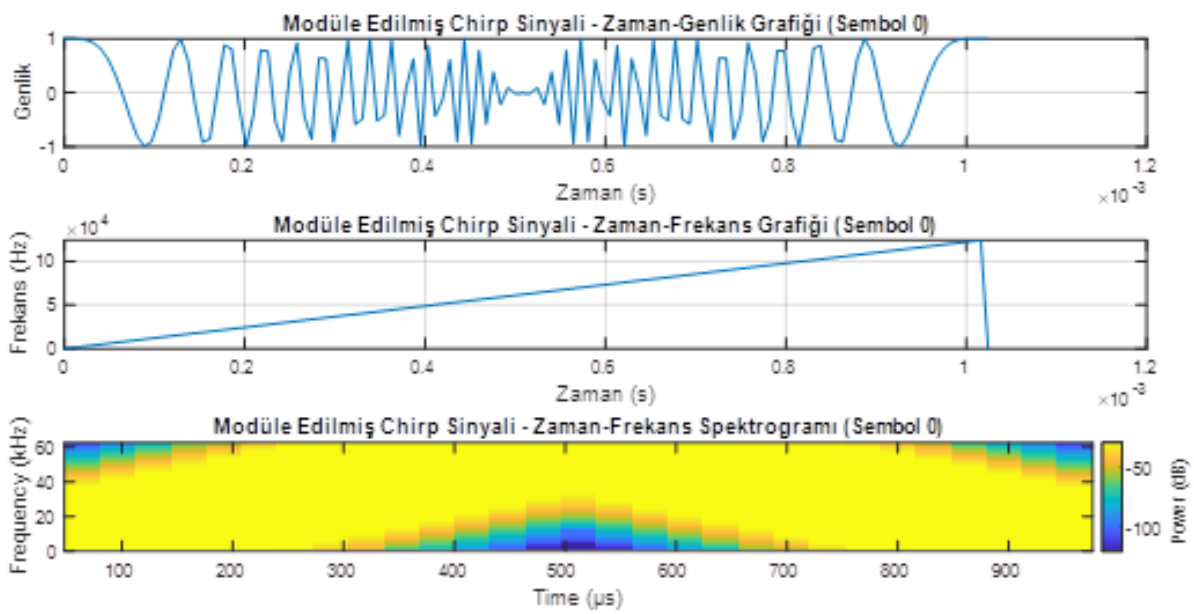


Şekil 1.3. Referans chirp sinyali için zaman-genlik, zaman-frekans ve spektrogram grafikleri

Sembol değeri 0 olduğunda (Şekil 1.4), modüle edilmiş chirp sinyali ile referans chirp sinyali aynı frekansa sahiptir ve herhangi bir frekans kayması uygulanmaz. Bu

durumda chirp sinyali, zamanla doğrusal olarak artan bir frekans bileşeni taşır. Zaman-genlik grafiğinde sinyalin genlik bileşeni düzgün bir yapı sergilerken, zaman-frekans grafiğinde frekansın başlangıçtan sona kadar doğrusal bir artış gösterdiği gözlemlenmektedir.

Spektrogram grafiği, chirp sinyalinin zamanla artan frekans bileşenlerinin güç yoğunluğunu renk skalası ile göstermektedir. Spektrogramda sarı renk ile gösterilen bölge, yüksek güç yoğunluğunu ifade etmektedir. Bu, sinyalin o anda ve o frekansta güçlü olduğunu gösterir. Sarı rengin düzgün ve sürekli bir şekilde uzanması, sinyalin sabit bir güçte yayıldığını ve modülasyonun tutarlı bir şekilde yapıldığını belirtmektedir.



Şekil 1.4. Modüle edilmiş chirp sinyali için zaman-genlik, zaman-frekans ve spektrogram grafikleri (sembol 0)

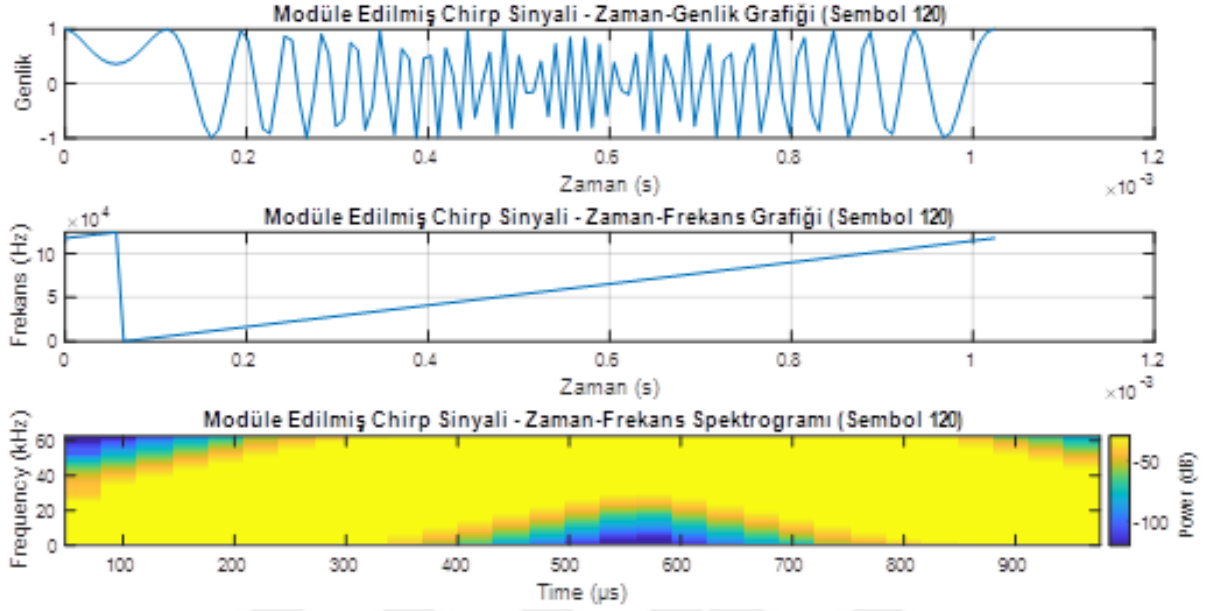
Sembol değeri 120 olduğunda (Şekil 1.5), chirp sinyaline bir frekans kayması uygulanmaktadır. Eşitlik 1’de frekans kaymasının denklemini görülmektedir.

$$\text{Frekans kayması} = \frac{\text{Sembol değeri}}{N} * BW \quad (1)$$

Burada “N” değeri 2^{SF} yani chirp sinyalinin bir sembol boyunca içerdiği toplam chirp sayısını ifade etmektedir. 120 sembol değeri için frekans kayması 125 kHz, BW değeri ise 117187.5 Hz olarak gerçekleşmektedir.

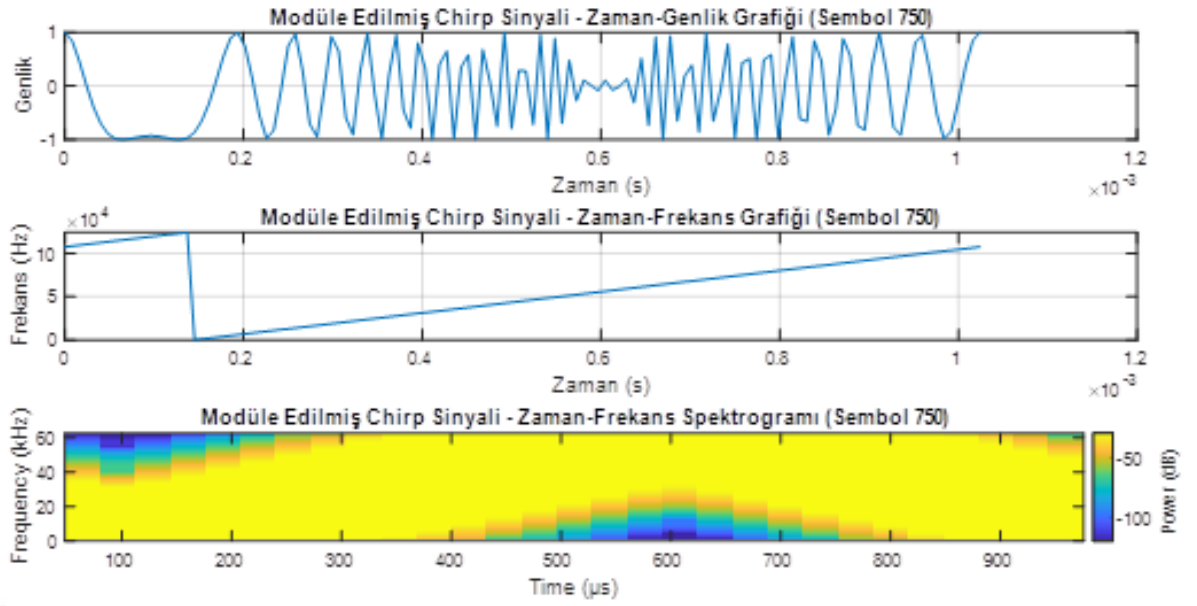
Bu frekans kayması, sinyalin başlangıç frekansını yükselterek iletilen verinin farklı bir sembol ile ifade edilmesini sağlamaktadır. Zaman-genlik grafiğinde, sinyalin genlik

bileşeni önceki duruma benzer bir yapı sergilemekte ancak frekansın daha yüksek bir başlangıç seviyesinden itibaren arttığı zaman-frekans grafiğinde açıkça görülmektedir. Frekans kayması, farklı sembollerin iletimini sağlamak için farklı değerler almaktadır.



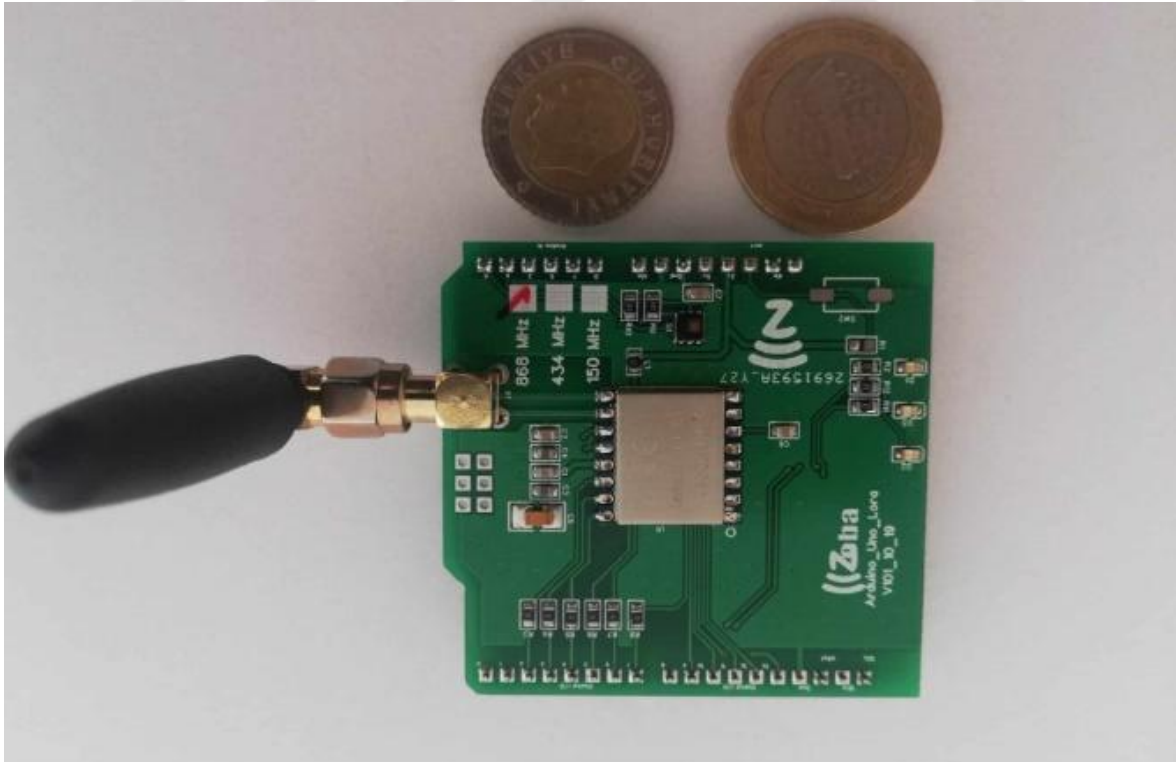
Şekil 1.5. Modüle edilmiş chirp sinyali için zaman-genlik, zaman-frekans ve spektrogram grafikleri (Sembol 120)

Sembol değeri 750 olduğunda (Şekil 1.6), frekans kayması 732421.875 Hz olmaktadır ancak bant genişliği 125 kHz olduğundan ve LoRa modülasyonu döngüsel frekans kaydırma kullandığından, bu kaymanın BW' ye göre mod alınarak belirlenmesi gerekmektedir. Bu durumda 750 sembol değeri için frekans kayması 107321.875 Hz olarak oluşmaktadır.



Şekil 1.6. Modüle edilmiş chirp sinyali için zaman-genlik, zaman-frekans ve spektrogram grafikleri (Sembol 750)

Şekil 1.7’de 868 MHz de çalışan bir LoRa modülü görülmektedir. Bu modül sensörlerden gelen veriyi (sıcaklık, nem, CO₂ vb.) işleyip CSS modülasyonu kullanılarak iletmektedir.



Şekil 1.7. 868 MHz SX1276 LoRa Modülü

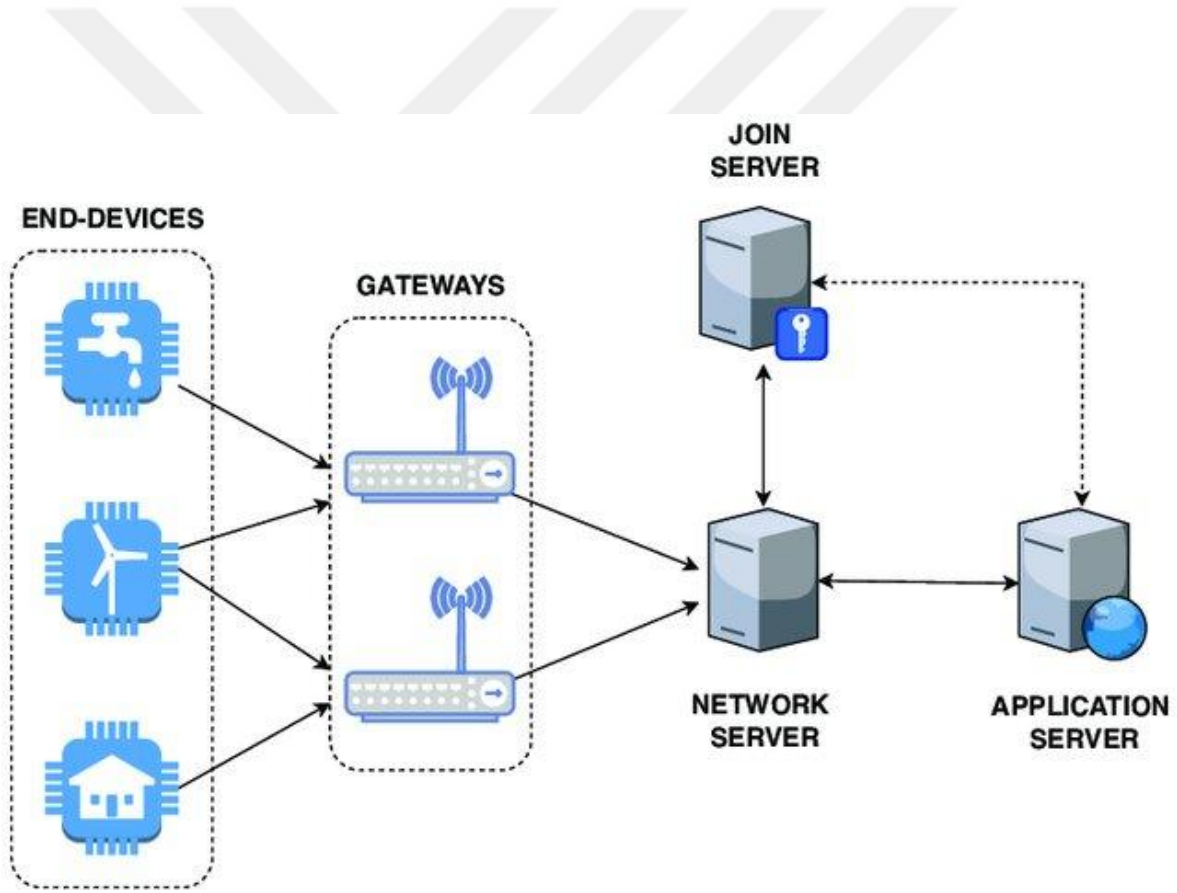
Sensör verilerinin toplanması, işlenmesi ve LoRa modülasyonu ile RF üzerinden aktarılması birkaç temel adımdan oluşmaktadır. Sensörler, fiziksel bir parametreyi ölçerek bu değerleri analog ya da dijital formatta üretmektedirler. Analog olarak üretilen değerler Analog-Dijital Çevirici (ADC) ile dijital değerlere dönüştürülürler. ADC, analog sinyali belirli bir çözünürlükte dijital bir değere dönüştürmektedir. Örneğin 10-bit ADC, 0-1023 aralığında bir dijital değer sağlamaktadır.

ADC tarafından dijital değere dönüştürülen sensör verileri bir mikrodenetleyici (MCU) tarafından okunmaktadır. MCU, LoRa modülüne veri aktarmadan önce çeşitli işlemleri gerçekleştirerek verilerin doğru ve güvenli bir şekilde iletilmesini sağlamaktadır. İlk olarak, mikrodenetleyici sensörlerden gelen ham verileri toplamaktadır. Veri toplandıktan sonra, mikrodenetleyici çeşitli veri işleme işlemleri gerçekleştirir. Bu işlemler, sensör verilerindeki hataları düzeltmek için kalibrasyon, gürültüyü azaltmak için filtreleme ve gerekli matematiksel dönüşümleri içerir (Adelantado ve ark., 2017). MCU daha sonra verileri iletme uygun bir formata dönüştürür. Bu süreç, JavaScript Object Notation (JSON) veya CSV gibi metin tabanlı formatlar kullanılarak veri paketleme veya sıkıştırma işlemlerini içerir. Örneğin, bir sıcaklık ve nem ölçümü şu şekilde paketlenabilir: {"temp":25.4,"hum":60} (Kotaru ve ark., 2017). LoRaWAN protokolü kullanılıyorsa, veri paketine başlık bilgisi, kimlik doğrulama verileri ve Hata Denetim Kodu (CRC) gibi ek bilgiler eklenmektedir. Güvenlik için mikrodenetleyici, verileri şifreler ve kimlik doğrulama işlemlerini gerçekleştirir. Son olarak, mikrodenetleyici işlenmiş ve şifrelenmiş veriyi LoRa modülüne gönderir. Bu aktarım genellikle UART, SPI veya I2C gibi iletişim protokolleri aracılığıyla gerçekleştirilir. Örneğin, UART kullanıldığında veri, belirlenen baud hızında seri hat üzerinden iletilir (Adelantado ve ark., 2017). MCU, LoRa modülüne AT komutları göndererek veri aktarım sürecini başlatır ve modül, veriyi radyo dalgalarıyla LoRa ağ geçidine iletir. Bu süreçler, sensör verilerinin doğru şekilde alınmasını, işlenmesini ve iletilmesini sağlayarak LoRa modülünün güvenilir ve etkili bir şekilde çalışmasını mümkün kılmaktadır.

1.2. LoRaWAN Nedir?

LoRaWAN ağı, yıldız-yıldız (star-of-stars) topolojisine dayanmaktadır ve bu topoloji Şekil 1.8'de sunulmuştur. Bu mimaride, uç cihazlar (örneğin, sensör düğümleri), LoRa fiziksel katman (LoRa PHY) kablosuz modülasyonu kullanarak doğrudan ağ geçitleri (gateway) ile iletişim kurar. Ağ geçitlerinin temel amacı, uç cihazlardan gelen mesajları Ağ

Sunucusu'na (Network Server – NS) iletmektir. LoRaWAN topolojisinin merkezi bir bileşeni olan Ağ Sunucusu (NS), çerçeve doğrulama (frame authentication), paket yönlendirme (packet routing) ve dolaşım (roaming) gibi birçok önemli işlemi yürütmektedir. Buna karşılık, Uygulama Sunucusu (Application Server – AS), uç cihazlardan alınan yukarı yönlü (uplink) mesajları kullanarak son kullanıcılara yüksek seviyeli hizmetler sunmaktan sorumludur. Ağa erişim sağlamak isteyen uç cihazların öncelikle kimlik doğrulama işlemini gerçekleştirmesi gerekmektedir. Bu görevden sorumlu düğüm, Join Server (JS) olarak adlandırılır. JS, kimlik doğrulama prosedürlerini yürütmenin yanı sıra şifreleme anahtarlarının saklanması gibi diğer güvenliğe ilişkin görevleri de yerine getirir. LoRaWAN ağının güvenli yapısı, bu tür merkezi kimlik doğrulama ve şifreleme mekanizmaları ile sağlanmaktadır.



Şekil 1.8. LoRaWAN ağı mimarisi

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Konuyla ilgili daha önce yapılmış olan çalışmalara kronolojik olarak aşağıda yer verilmiştir.

Stočas ve ark. (2016), yapmış oldukları çalışmada modern IoT (Nesnelerin İnterneti) yöntemlerinin genel bir değerlendirmesini yaparak tarım sektörü üzerindeki etkilerini analizlerle incelemiştir. Çalışmanın amacı, Çek Cumhuriyeti'nin kırsal kalkınmasını ve IoT uygulamaları perspektifinde potansiyellerinin geliştirilmesidir. IoT'nin geniş çeşitliliğine dikkat çekilerek, farklı ittifakların benzer sorunların benzer çözümlerini sunduğunu vurgulamaktadır. IoT uygulamalarına örnek olarak FarmBot'u ele almakta ve platformun temel ilkelerini açıklamaktadır. FarmBot, tarımda IoT kullanımlarının açık yapılı bir donanım platformudur. Çalışmada, akıllı tarım makinelerinin tanımını yapmakta ve Çek Cumhuriyeti'ndeki IoT'lerin hazır sunumunun, IoT operatörlerini, bu alanla ilgili eksiklikleri ve olası alternatifleri tartışılmıştır.

Loriot ve ark. (2017), bu çalışmalarında LoRaWan teknolojisinin bir Üniversite Bilim Kampüsünde veri iletişimi için kullanımına ilişkin bir saha çalışması yapmışlardır. Testler, tek bir ağ geçidi kullanılarak açık ve kapalı ortamlarda gerçekleştirilmiştir. LoRaWAN teknolojisinin kampüsün büyük bölümünde iyi performans gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

Magrin ve ark. (2017), bu çalışmalarında tipik bir kentsel senaryoda LoRaWAN tabanlı bir IoT ağının performansını simülasyon araçlarıyla analiz etmişlerdir. Sonuç olarak, LoRaWAN ağı, temel olarak ağ geçitlerinin sayısındaki artışın yukarı bağlantının aşımını ve güvenilirliğini de artırması nedeniyle iyi ölçeklenebilir olduğunu ortaya koymuşlardır. Kentsel bir senaryoda, başarılı paket teslim oranı, birkaç ağ geçidi ile hizmet verilen 1000'den fazla düğüm için %95'lik bir orana ulaşmaktadır.

Kodali ve ark. (2018), çalışmalarında çiftçilere hem zaman, enerji tasarrufu ve para sağlamak hem de dünya genelinde artan nüfusa bağlı olarak gıda kıtlığı sorunlarına çözüm bulmak ve tarımsal verimliliği artırmak amacıyla akıllı bir sulama sistemi önerisinde bulunmuşlardır. ESP32 TTGO LoRa tabanlı bir sulama sisteminin sensörlerden veri alıp IBM Bluemix bulut platformuna göndermesi ve bu verileri analiz ederek su pompasını tetiklemesi esasına dayanan bir çalışma yapmışlardır. Çalışmanın sonucunda su ve enerji tasarrufu, maliyetlerin ve insan gücü gereksinimlerinin azaltılması gibi avantajlar sağlayacağını vurgulamışlardır. Bunun yanı sıra kullanıcıların istediği takdirde manuel kontrol de sağlayabileceği üzerinde durulmuştur.

Feltrin ve ark. (2018), çalışmalarında kırsal ortamlara odaklanarak, bir LoRaWAN ağ geçidinin ve çok ağ geçitli bir ağın geniş bir alana hizmet verme kapasitesini değerlendirmişlerdir. Birkaç ağ geçidi kullanımının ağ kapasitesini artırdığını ve daha yüksek bir başarı oranı sağladığını doğrulayan simülasyonlar aracılığıyla analiz gerçekleştirmişlerdir.

Trinh ve ark. (2018), çalışmalarında hassas tarım sistemlerinde kablosuz iletişim teknolojisinin uygulanmasının, bitki yetiştirme ortamının izlenmesi ve kontrol edilmesinde güvenilirlik ve sürdürülebilirlik gereksinimlerinin karşılanmasına nasıl yardımcı olduğu üzerinde araştırmalar yapmışlardır. Bu doğrultuda LoRa teknolojisini kullanan bir otomatik sulama sistemi önermişlerdir. Bu sistemde, seralardaki çevresel verilerin toplanmasını ve bu verilerin kullanılarak bitkilerin otomatik olarak sulanmasını, böylece su ve enerji tasarrufu sağlanmasını amaçlamışlardır. Sistemin kararlılığını arttırmak için Master/Slave ortam erişim kontrolü yöntemini kullanmışlardır. Çalışma sonunda sensör düğümleri, kontrol düğümleri, yerel veri tabanı ve kullanıcı arayüzünü içeren bir test sisteminin başarıyla tamamlamışlardır ve sistemin kararlı bir şekilde çalıştığını gözlemlemişlerdir.

Suwaid ve ark. (2019), çalışmalarında hava olaylarına karşı LoRaWAN teknolojisini kullanarak çiftçilerin ürünlerini uzaktan takip etmelerine yardımcı olacak, düşük güç tüketimi sağlayacak, sinyallerinin geniş alanda iyi sonuç verecek bir sistem oluşturmayı amaçlamışlardır. Sistemde sensörlerden veri toplamaktan sorumlu LoRa düğümü ve verileri sunuculara göndermek için LoRa Ağ Geçidi oluşturmuşlardır. Çalışmanın sonucunda LoRaWAN sistemi kullanılarak sahadan beş gün boyunca veri toplama ve okuma testi yapılarak toprağın ve bitkilerin ihtiyaç duyduğu nem, sıcaklık gibi faktörler hakkında bilgi edinmişlerdir.

Chang ve ark. (2019), çalışmalarında çiftçilerin serada yetiştirdikleri organik bitkiler için sulama deneyimlerini sürekli olarak öğrenmeyi amaçlayan makine öğrenimi tabanlı bir sulama sistemi sunmuşlardır. Çevresel veriler ve eğitilmiş sulama modelinin kombinasyonu sayesinde, her sulama için gereken su miktarı hesaplamışlar ve bitkileri LoRa P2P ağı üzerinden otomatik olarak sulamışlardır. Önerilen sistemi, Tayvan'ın Hsin-Chu İlçesindeki bir organik sebze çiftliğinde tasarlamışlar ve uygulamışlardır. Çoklu doğrusal regresyon algoritması kullanılarak bir model oluşturulmuş ve sulama süresini tahmin etmişlerdir.

Grunwald ve ark. (2019), bu çalışmalarında akıllı tarım için iki kullanım örneğini incelemişlerdir. Kullanım senaryolarından birinde, toprak özelliklerini analiz etmek ve tarım arazisinin geçirgenliğini ölçmek için 10 cm ila 60 cm derinliğe bir sensör araç seti

yerleştirilmiştir. Analiz, farklı yayılma faktörü (SF) ve çıkış gücü (dBm) değerleri kullanılarak tekrarlanmıştır. Geliştirilen prototipin ağ geçidinden 350 m mesafede 60 cm derinliğe kadar güvenilir bir şekilde iletim yapabildiği gösterilmiştir; bu şekilde tüm bölge kapsamıştır. Çalışmada, daha düşük ölçüm noktalarında yayılma faktörünün SF8'den SF10'a düşürülmesi ve iletim hızının 3125 bps'den 980 bps'ye düşürülmesi durumunda bile veri iletiminin gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir. Bu çalışmada güç tüketimini incelememişlerdir.

Parri ve ark. (2019), çalışmalarında deniz ortamlarında veri toplamak için kullanılacak bir LoRaWAN ağının fizibilitesini, verici cihazın denizin ortasına ve Ağ Geçidinin karaya yerleştirilmesiyle göstermişlerdir. Test sonuçlarında, 8,33 km'lik bir mesafede verimli veri iletiminin sağlanabileceğini kanıtlanmışlardır.

Gutiérrez ve ark. (2019), çalışmalarında nesnelerin interneti (IoT) teknolojisinin tarım sektöründe uygulandığı zaman büyük bir etki yaratma potansiyeline sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bunun sonucunda dünya çapında kullanılan geleneksel tarım yöntemlerinin iyileştirilmesi için LoRaWAN iletişim protokolünü kullanan bir mobil ağ geçidi cihazının geliştirilmesi önerilmiştir. Önerilen bu cihazın 1 kilometre mesafeden sensör verilerini okuyabileceği gösterilmiştir. Ayrıca LoRa iletişiminin açık alanlarda 300 metreye kadar kusursuz çalıştığı yönünde sonuçlar elde edilmiştir. Geliştirilen bu sistemin küçük çiftlikler ve üreticiler için düşük maliyetli ve doğru bir izleme ağı sunduğundan da bahsedilmiştir.

Siddique ve ark. (2019), çalışmalarında IoT farkındalığı ve iletişim teknolojisini akıllı tarım platformuna entegre etmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla, tarımda bilgi toplama, veri analizleri yapma, sinyalleri işleme, ekipman kontrolü sağlama gibi ihtiyaçları karşılayabilmek için LoRa tabanlı akıllı tarım hizmet platformu ve kablosuz sensör ağının (WSN) kullanımını önermişlerdir. Düşük güç tüketimi, geniş iletim mesafesi nedeniyle LoRa'yı tercih etmişlerdir. Bununla birlikte tarımsal verimliliğin de artırılması hedeflenmiştir. Çalışmanın sonucunda, LoRa tabanlı tarımsal uygulamaların kullanıldığı ticari çiftliklerde su kullanımının %50 oranında azaldığını gözlemlemişlerdir.

Codeluppi ve ark. (2020), çalışmalarında akıllı tarım alanlarında, çiftliklerin yönetimini iyileştirmek için LoRaFARM adı verilen LoRaWAN ağına dayalı bir IoT platformu önermişlerdir. Mimari, gerçek bir çiftliğe yerleştirilmiş ve 3 ay boyunca toplanan verilerin performansı analiz edilmiştir. Toplanan verilerin hem dış ortam da (örn. üzüm bağı) hem de iç ortamda (örn. sera) doğru sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir.

Froiz-Míguez ve ark. (2020), LoRa ve LoRaWAN tabanlı düşük güç tüketimine sahip, geniş alan ağı (LPWAN) sensör düğümleri kullanılarak geniş kentsel alanları kapsayabilen bir akıllı sulama sisteminin geliştirilmesini ele aldıkları bu çalışmalarında, nem değerlerinin ve Ts'nin IoT düğümlerinden alındığı ve sulama sürecinin sis bilişim ağ geçitleri veya buluttan gönderilen uzaktan komutlar kullanılarak kontrol edildiği üzerinde durmuşlardır. Sistemin üniversite kampüsleri gibi büyük ve karmaşık radyo yayılım senaryolarında konuşlandırıldığı ve senaryonun yayılımının analiz etmişlerdir. Elde edilen sonuçların akıllı sulama sistemlerinin verimliliğini ve sürdürülebilirliğini artırdığı ve su tasarrufu sağladığı sonucuna varmışlardır.

Ortiz ve ark. (2020), yapmış oldukları bu çalışmalarında LoRa teknolojisinin kentsel mobilite ortamında çalışma performansını, gerçek ve simüle edilmiş deneyimler üzerinden incelemişlerdir. Araç iletişimde mesafe, hız seviyeleri ve yayılma faktörlerinin etkisi üzerine sonuçlar çıkarmışlardır.

Adi ve ark. (2021), çalışmalarında bitki kalitesini artırmak için uygun su miktarının sağlanmasının önemi vurgulanırken, çiftçilerin rutin sulama eksikliklerinin ve olumsuz hava koşullarının mahsulleri nasıl etkilediği tartışılmıştır. Tarım arazilerinde su pH'ı, toprak pH'ı ve toprak neminin Arduino Atmega 328 mikrodenetleyici ile LoRa 915 MHz kullanılarak izlenildiğinden bahsedilmiştir. Çalışmada test amacıyla Pakcoy bitkisi kullanılmıştır. Verilerin Thingspeak IoT sunucusu üzerinde gerçek zamanlı olarak görüntülenmiştir. LoRa IoT teknolojisinin kullanımı sonrasında Pakcoy bitkilerinde geniş yapraklar gibi olumlu sonuçların görüldüğü belirtilmiştir. LoRa sinyallerinin 1 km'den daha uzak mesafelere gönderilmesinde sınırlamalar ve veri paketinde kayıplar olduğu da açıklanmıştır.

Gresl ve ark. (2021), çalışmalarında hassas tarımda çevresel değişkenleri yönetmek, performanslarını ölçebilmek ve mahsulleri daha iyi yetiştirebilmek için gerçek zamanlı verilerin kullanılmasının yararlı olacağı ancak bu verilerin toplanması ve analiz edilmesinin karmaşık ve pahalı olmasından bahsedilmiştir. Çevresel değişkenlerin mahsul kaybına ve dengesiz büyümeye yol açabileceği belirtilirken, bitki büyümesini kontrol edebilmek için bazı düzenlemeler yapılabileceğinden bahsedilmiştir. Bunun yanısıra mevcut kablosuz sensör ağlarının; sınırlı iletim menzili, karmaşık iletişim protokolleri ve yüksek enerji tüketimi gibi dezavantajlarından bahsedilmiştir. Çalışmanın sonucunda; tarımsal uygulamalar için bir sensör ağı veri alışverişi ve kontrol protokolü önerisinde bulunmuştur. Önerilen mimarinin iletişim omurgasını LoRa ve LoRaWAN oluşturmakta olup düğümler ve ağ geçidi arasındaki veri alışverişini tanımlayan LoRa eXchange (LoRa-

X) protokolüne de yer verilerek enerji tüketimini azaltan bir kablosuz sensör ağı geliştirilmiştir.

Irianto (2022), çalışmasında nesnelerin interneti (IoT) teknolojisi kullanılarak tarımsal sulama sistemlerinde LoRa iletişim teknolojisinin performansının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Dört pirinç tarlası sulama sisteminin düzenlendiği ve her tarlanın su akışını kontrol etmek için bir mikro denetleyici kullanıldığı belirtilmiştir. Bu mikro denetleyicilerinde su seviyesini ölçen bir sensör kullanılarak su kapılarını kontrol edildiği ve su seviyesi düştüğünde kapıların açılarak su seviyesini ayarlamak için gerekli işlemlerin yapıldığı bir sistem tasarımı bahsedilmiştir. Deneylerin Endonezya'da gerçekleştirildiği ve LoRa alıcısı ile LoRa kapısı arasında birkaç farklı mesafe belirlenerek testlerin gerçekleştirilmiştir. Çalışmada LoRa iletişim teknolojisinin tarımsal sulama sistemlerinde etkin bir şekilde kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Pagano ve ark. (2022), çalışmalarında LoRa'nın tarımda kullanılmasına ilişkin bir inceleme sunarak, akıllı tarım uygulamaları için teknolojilerin farklı uygulamalardaki potansiyelleri analiz etmişlerdir. Gelecekte tarım sektöründe kaynak kıtlığı, ekilebilir arazilerin azalması ve nüfus artışı gibi zorluklarla karşı karşıya kalılabileceği üzerinde durulmuştur. Nesnelerin interneti (IoT) uygulamalarının kullanılmasıyla birlikte tarımda; tarımsal üretimlerin her adımının iyileştirilmesi ve LoRa teknolojisinin akıllı tarım çözümlerini desteklemek için etkili bir yol sunacağına altı çizilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Çalışmada, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Ziraat Fakültesi yerleşke bölgesinde bulunan 110 m² alana sahip plastik kaplamalı sera içerisindeki ortam verileri izlenmiştir (Şekil 3.1). Sera ortamına ait sıcaklık ve nem değerlerini ölçmek amacıyla sıcaklık-nem sensörü ve toprak-nem ve EC sensörü kullanılmıştır.



Şekil 3.1. Ortam verileri kaydedilen sera

3.1.1. Ağ Geçidi (Gateway)

Ağ geçidi (Dragino DLOS8N), açık kaynaklı OpenWrt işletim sistemi desteği sunmakta ve dış ortamda kullanılabilir şekilde imal edilmiştir. Bu cihaz, LoRa kablosuz ağını WiFi veya Ethernet üzerinden bir IP ağına bağlama işlevi görmektedir. LPS8, Semtech paket iletici kullanır ve LoRaWAN protokolü ile tam uyumlu çalışır. Cihaz, 10 programlanabilir paralel demodülasyon yolu sağlayan SX1308 LoRa yoğunlaştırıcı ve 2 adet 1257 LoRa alıcı-vericiye sahiptir. Ayrıca, 2.4 GHz Wi-Fi (802.11 bgn) desteği ve 10M/100M RJ45 bağlantı noktası sunar. USB ve Mini-PCIE çıkış arabirimleri de mevcuttur (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Ağ geçidi (Dragino DLOS8N)

3.1.2. Sıcaklık-Nem Sensörü

Sıcaklık-nem sensörü (Dragino, LHT65N), LoRaWAN, sıcaklık ve nem ölçümü yapan, düşük enerji tüketimi ve uzun menzilli veri iletimi için tasarlanmış bir IoT sensörüdür. LoRaWAN protokolü ile uyumlu olması, cihazın geniş alanlarda kablosuz veri aktarımı yapmasını sağlamaktadır. Dahili sıcaklık ve nem sensörünün yanı sıra harici sıcaklık probu ile çeşitli çevre koşullarında ölçümler yapabilmektedir (Şekil 3.3). Sensöre ait özellikler Çizelge 3.1’de sunulmuştur.



Şekil 3.3. LoRaWAN sıcaklık nem sensörü

Çizelge 3.1. LHT65N sensörü teknik özellikleri

Özellik	Değer
Sensör Türleri	Dahili sıcaklık ve nem sensörü; harici sıcaklık probu
LoRaWAN Uyumluluğu	LoRaWAN 1.0.3 protokolü (EU868, US915, AU915, AS923 frekans bantları)
Sıcaklık Ölçüm Aralığı	- Dahili sensör: -40°C ile +85°C - Harici prob: -55°C ile +125°C
Sıcaklık Hassasiyeti	±0.3°C
Nem Ölçüm Aralığı	0% ile 100% RH (Bağıl Nem)
Nem Hassasiyeti	±3% RH (tipik)
LoRa İletim Mesafesi	Açık alanda 10 km’ye kadar
Gönderim Periyodu	10 dakikadan 24 saate kadar yapılandırılabilir
Batarya Kapasitesi	2400 mAh Lityum pil
Pil Ömrü	Tipik kullanımda 10 yıla kadar
Boyutlar	88 mm x 63 mm x 30 mm
Ağırlık	90 gram
Koruma Sınıfı	IP65
Çalışma Sıcaklığı	-40°C ile +85°C

3.1.3. Toprak Nem ve EC Sensörü

Toprak nem ve EC sensörü (Dragino, LSE01), Tsu, Ts ve Ti ölçmek amacıyla kullanılmıştır. Tsu, Ts ve Ti ait veriler LoRaWAN IoT sunucusuna 20 dak. aralıklarla LoRa modülasyonunu kullanarak kablosuz olarak iletmektedir (Şekil 3.4). Sensöre ait özellikler Çizelge 3.2’de sunulmuştur.



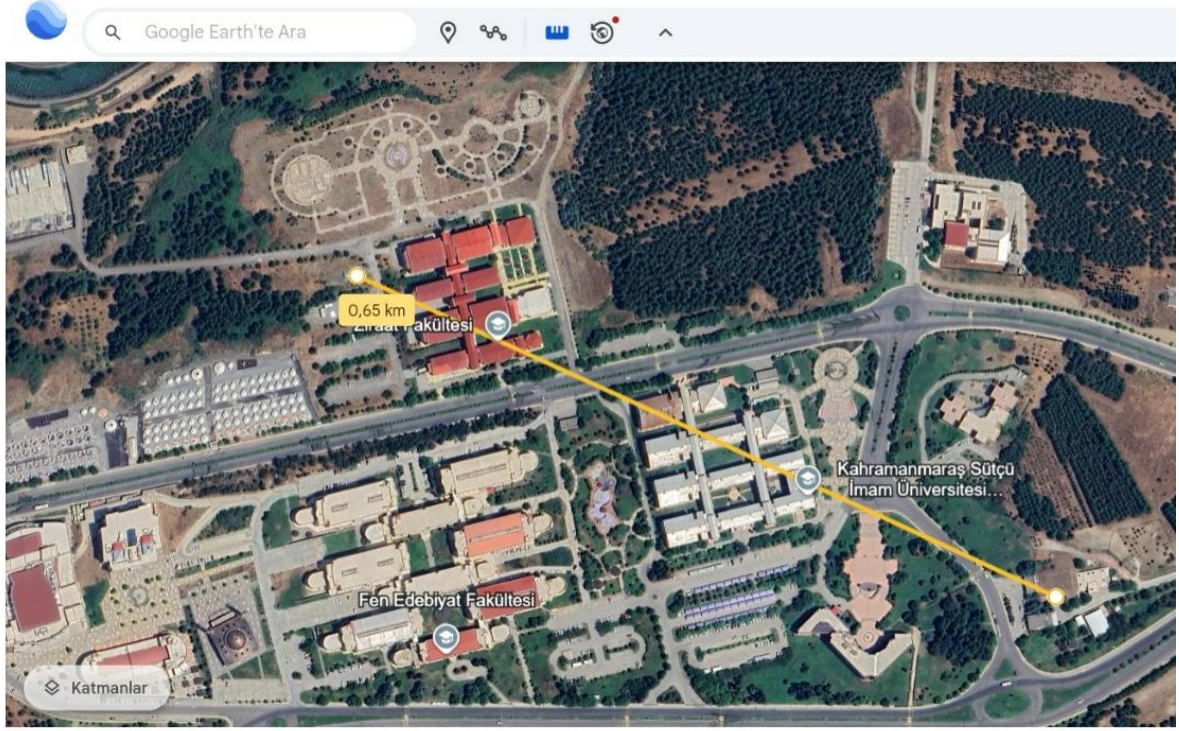
Şekil 3.4. LoRaWAN toprak nem ve EC sensörü

Çizelge 3.2. Toprak nem ve EC sensörü teknik özellikleri

Özellik	Açıklama
LoRaWAN Protokolü	LoRaWAN 1.0.3 Class A
Güç Tüketimi	Ultra düşük güç tüketimi
İzlenen Parametreler	Toprak Nemi, Ts, Toprak İletkenliği
Sıcaklık Telafisi	Toprak nem ölçümleri için sıcaklık ve iletkenlik telafisi
Desteklenen Frekans Bantları	CN470, EU433, KR920, US915, EU868, AS923, AU915, IN865
Konfigürasyon	AT Komutları ile parametre değişikliği desteği
Veri İletimi	Periyodik uplink; downlink ile yapılandırma değişikliği
Kasa	IP66 su geçirmez muhafaza
Batarya Seçenekleri	4000 mAh veya 8500 mAh Li-SOCl ₂ batarya
Batarya Ömrü	10 yıla kadar sürekli kullanım
Fabrika Kalibrasyonu	Mineral toprak türleri için önceden kalibre edilmiş
Uygulama Alanları	Akıllı tarım, uzaktan toprak izleme, sulama yönetimi

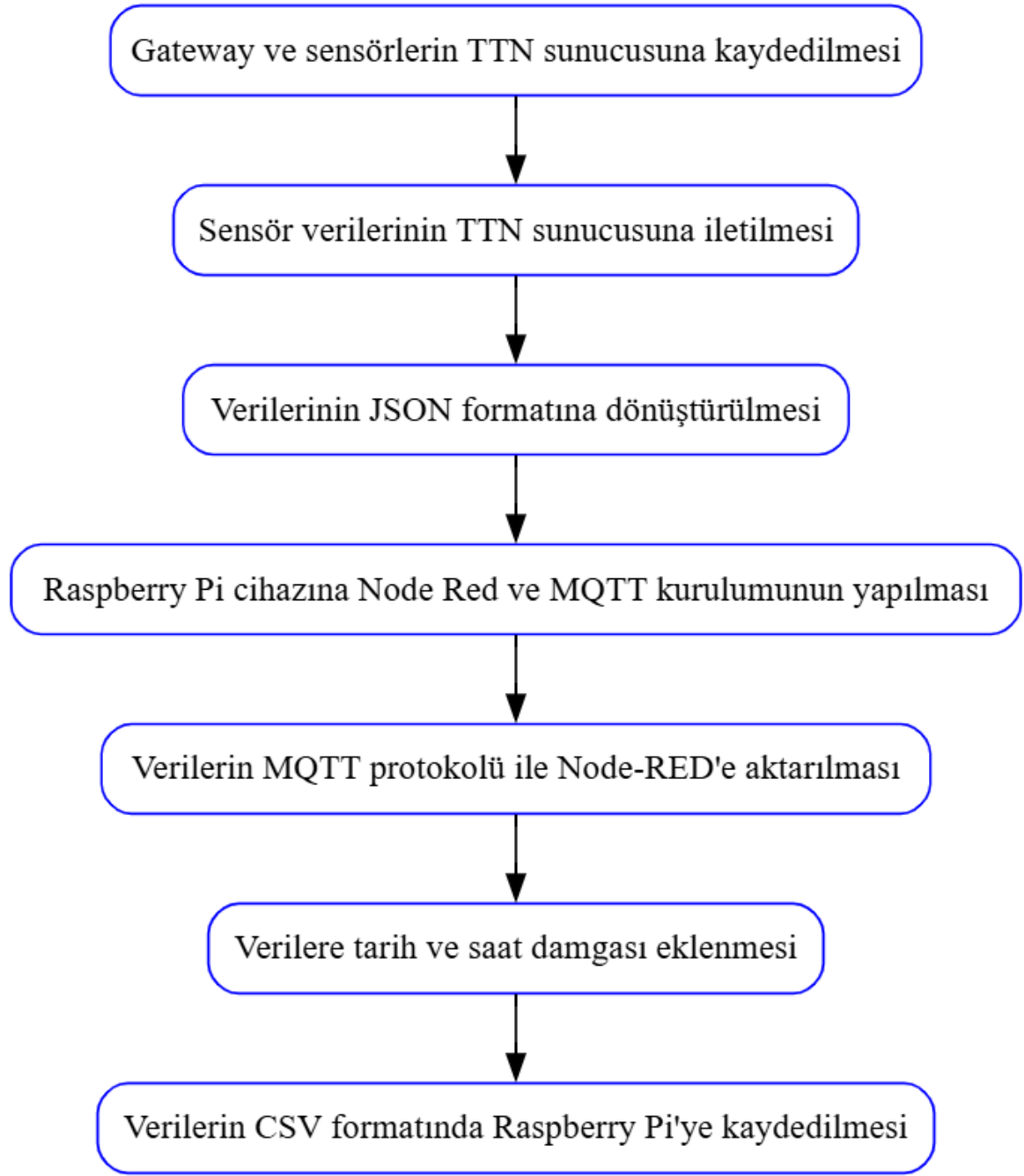
3.2. Yöntem

Çalışmada verilerin izlenmesi ve kaydedilmesi amacıyla ilk olarak gateway ve sensörler TTN server'e kaydedilmiştir. TTN, LoRaWAN ağındaki veri akışını yönetmek ve uç cihazlardan (end devices) gelen paketlerin doğru bir şekilde işlenmesini sağlamak için LoRaWAN protokolünün gerektirdiği tüm network server işlevlerini yerine getiren bir platformdur. Bulut (internet) üzerinde çalışan bu platform sayesinde kullanıcılar ayrı ayrı fiziksel bir Network Server veya Application Server kurmadan verileri yönetebilmektedir. Şekil 3.5'te sera ortamında bulunan sensörlerin ve gateway cihazının bulunduğu noktalar ve aralarındaki mesafe görülmektedir.



Şekil 3.5. Sensörler ve gateway cihazının bulunduğu noktalar ve aralarındaki mesafe

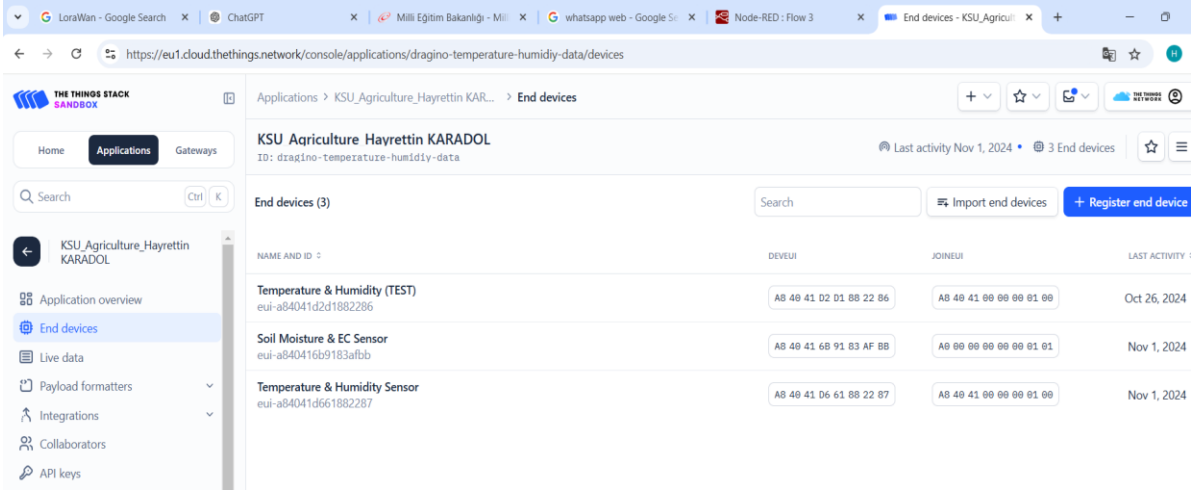
TTN üzerinde sensörlerden gelen ham veriler, kullanıcıların daha kolay işleyebileceği bir formata dönüştürülmektedir. Bu dönüşüm sürecinde, TTN konsolu üzerinde yer alan Payload Formatters (yük biçimlendiriciler) bölümüne eklenen her bir sensör için JavaScript dilinde yazılmış kod parçalarıdır. Payload formatter, cihazdan gelen 16 bit heksadesimal formatındaki ham veriyi almakta ve belirli bir kod veya algoritma yardımıyla anlamlı verilere dönüştürmektedir. Çözülen veriler, nesne tabanlı bir veri yapısı olan JSON formatına dönüştürülmektedir. JSON, veri alışverişi ve okunabilirlik açısından oldukça kullanışlı bir format olup IoT platformları arasında yaygın olarak kullanılmaktadır. JSON formatına dönüştürülen veriler MQTT iletişim protokolü kullanılarak Node-RED ortamına aktarılıp verilerin izlenmesi ve kaydedilmesi sağlanmıştır. Sırasıyla bu süreçleri ifade eden akış diyagramı (Şekil 3.6) ve açıklamalar aşağıda sunulmuştur.



Şekil 3.6. Sensör verilerinin kaydedilme sürecine ait akış diyagramı

3.2.1. Gateway ve sensörlerin TTN sunucusuna kaydedilmesi

Gateway’i TTN platformuna kaydetmek için öncelikle TTN web sitesi üzerinde bir hesap oluşturulması gerekmektedir. TTN server sınırlı sayıda cihaz yapılandırması için bir altyapı sağlamaktadır. Kayıt işlemi tamamlandıktan ve gateway cihazı doğru şekilde internete bağlandıktan sonra TTN server’a sinyal göndererek aktif duruma geçmekte ve veri almaya başlamaktadır. Şekil 3.7’de TTN server konsol arayüzü görülmektedir.



Şekil 3.7. TTN sunucu konsol arayüzü

LoRaWAN ağına yeni bir uç cihazın bağlanması için katılım (join) prosedürünün tamamlanması gerekmektedir. Bu işlem iki farklı yöntemle gerçekleştirilebilmektedir:

ABP (Activation by Personalization – Kişiselleştirme ile Aktif Etme): Uç cihaz, önceden yapılandırılmış kimlik bilgileri ile doğrudan ağa katılmaktadır.

OTAA (Over-the-Air Activation – Havadan Aktif Etme): OTAA yöntemi, uç cihazın ağ sunucusuyla dinamik olarak kimlik doğrulaması yaparak ağa katılmasını sağlamaktadır. Bu yöntem daha güvenlidir ve genellikle tercih edilmektedir.

OTAA yöntemi kullanıldığında uç cihaz, ağ geçidine Join Request adı verilen bir katılma isteği mesajı göndermektedir. Bu mesaj, uç cihazın benzersiz kimliği (DevEUI), uygulama kimliği (AppEUI) ve geçici bir şifreleme anahtarı içermektedir. Ağ geçidi, bu mesajı almakta ve ağ sunucusuna iletmektedir. Ağ sunucusu, bu isteği doğrulamak için Join Server (JS) ile iletişime geçmektedir. Join Server, uç cihazın kimlik doğrulama işlemlerini gerçekleştirmekte ve başarılı bir doğrulama durumunda ağ sunucusuna bir Join Accept mesajı göndermektedir. Bu mesajda uç cihaz için ağ kimliği (DevAddr) ve şifreleme anahtarları yer almaktadır.

3.2.2. Sensör verilerinin TTN sunucusuna iletilmesi

Uç cihazın ağa katılımı tamamlandıktan sonra veri iletim süreci başlamaktadır. Veri iletimi, uç cihaz ile ağ geçidi arasında LoRa PHY modülasyonu kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu süreç aşağıdaki adımları içermektedir.

Veri gönderimi (Uplink transmission): Uç cihaz, topladığı veriyi şifreleyerek bir veri paketi oluşturmaktadır. Veri paketinde cihaz adresi (DevAddr), çerçeve sayısı (Frame Counter) ve şifrelenmiş veri yükü (payload) yer almaktadır. Veri paketi, LoRa modülasyonu kullanılarak ağ geçidine iletilmektedir.

Ağ geçidinin paketi ağ sunucusuna iletilmesi: Ağ geçidi, uç cihazdan aldığı veri paketini IP tabanlı ağ üzerinden ağ sunucusuna iletmektedir. LoRaWAN ağ mimarisinde birden fazla ağ geçidi aynı anda bir paketi alabilmekte ve ağ sunucusuna iletebilmektedir. Ağ sunucusu, alınan paketlerden birini seçerek işlemi sürdürmektedir.

Ağ sunucusunun paketi doğrulaması ve yönlendirmesi: Ağ sunucusu, veri paketinin doğruluğunu ve bütünlüğünü kontrol etmek için NwkSKey (uç cihazın ağa bağlanması sürecinde dinamik olarak oluşturulan temel şifreleme anahtarı) anahtarını kullanmaktadır. Çerçeve sayısı kontrol edilerek paket sıralaması sağlanmakta ve tekrar eden paketler reddedilmektedir. Doğrulan veri paketi, şifre çözme işlemi yapılmadan uygulama sunucusuna iletilmektedir.

Uygulama sunucusunun veriyi işlemesi: Uygulama sunucusu, veri paketini almak için AppSKey (uç cihaz ile Application Server arasında verilerin şifrelenmesi amacıyla kullanılan anahtar) anahtarını kullanarak şifre çözme işlemi gerçekleştirmektedir. Uç cihazdan gelen veri, anlamlı hale getirilerek son kullanıcının erişimine sunulmaktadır.

3.2.3. Verilerin JSON Formatına Dönüştürülmesi

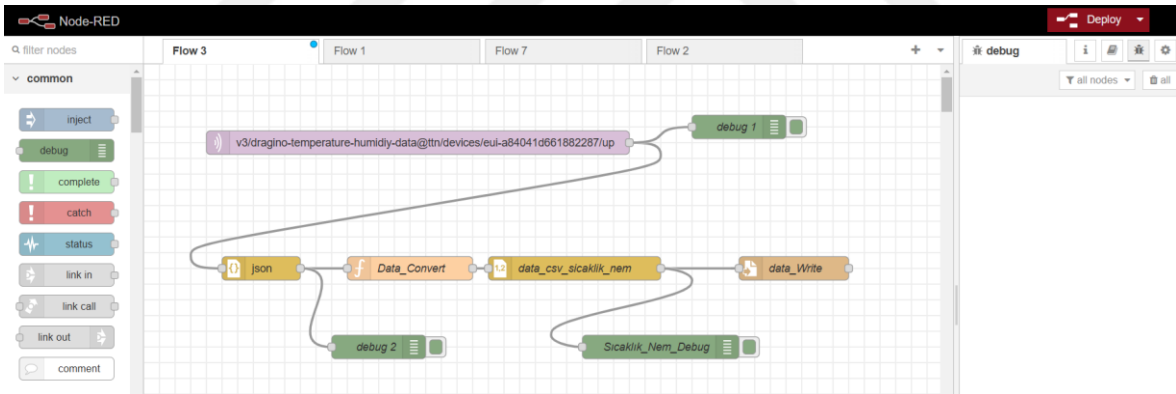
LoRaWAN protokolü ile gönderilen ham veriler, TTN konsolunda toplanmış ve standart JSON formatına dönüştürülmektedir. JSON formatı, sensörlerden alınan verilerin kolayca işlenebilmesi ve farklı uygulamalara entegre edilebilmesi için uygun bir veri yapısıdır. Her sensör verisi, ilgili zaman damgası ve sensör kimlik bilgileri ile birlikte JSON mesajı olarak sunulmaktadır.

3.2.4. Raspberry Pi cihazına Node-Red ve MQTT kurulumunun yapılması

Çalışmada veri kaydı için Raspberry Pi 5 tek kart bilgisayar kullanılmıştır. Node-RED'in kurulumu için Raspberry Pi tarafından sağlanan resmi yükleyici kullanılmış ve kurulum tamamlandıktan sonra Node-RED hizmeti başlatılmıştır. Ayrıca, sistemin her açılışında Node-RED'in otomatik olarak çalışması için gerekli ayarlamalar yapılmıştır. Node-RED arayüzüne Raspberry Pi'nin IP adresi üzerinden 1880 portunu kullanarak tarayıcıdan erişilebilmektedir. MQTT haberleşme protokolü için ise Mosquitto isimli açık kaynaklı broker yazılımının kurulumu gerçekleştirilmiştir.

3.2.5. Verilerin MQTT protokolü kullanılarak Node-RED'e aktarılması

TTN konsolunda JSON formatında sunulan veriler, MQTT protokolü kullanılarak Node-RED platformuna aktarılmıştır. MQTT, düşük bant genişliği gerektiren uygulamalar için uygun, hafif bir mesajlaşma protokolüdür. Bu sayede, sera içerisindeki tüm sensör verileri Node-RED üzerinde gerçek zamanlı olarak izlenebilir hale gelmiştir. Oluşturulan Node Red program Şekil 3.8'de görülmektedir.



Şekil 3.8. Node Red program arayüzü

3.2.6. Verilere tarih ve saat damgası eklenmesi

Node-RED üzerinde alınan her veri setine, Türkiye yerel saatine uygun olarak bir tarih ve saat damgası eklenmiştir. Bu işlem, veri analizi yapılırken zamana dayalı karşılaştırmaların yapılabilmesi için gerçekleştirilmiştir.

3.2.7. Verilerin CSV Formatında Kaydedilmesi

Node-RED üzerinde toplanan ve zaman damgası eklenmiş veriler, CSV dosya formatında depolanmıştır. CSV formatı, verilerin daha sonra istatistiksel analiz, makine öğrenmesi modelleri ve veri görselleştirme işlemleri için kolayca işlenmesini sağlamaktadır.

Bu yöntemde kullanılan IoT tabanlı sistem sayesinde sera içerisindeki sıcaklık, nem, Tsu, Ti ve Ts verileri gerçek zamanlı olarak izlenebilmiş, uzun süreli veri kaydı sağlanarak çevresel koşulların detaylı analizi için gerekli altyapı oluşturulmuştur. LoRaWAN teknolojisinin sağladığı uzun menzilli iletişim ve düşük enerji tüketimi, sistemin sera gibi geniş alanlarda etkin bir şekilde kullanılmasına olanak sağlamıştır.

3.2.8. Çoklu Doğrusal Regresyon Modeli (Multiple Linear Regression)

Çoklu doğrusal regresyon modeli (Multiple Linear Regression), bağımlı bir değişkenin (y) birden fazla bağımsız değişkene (işaretlenen x_1, x_2, \dots, x_p) bağlı olarak öngörülmesi veya açıklanması için kullanılan istatistiksel bir tekniktir. Bu model, doğrusal ilişkilerin var olduğu durumlarda önemli bir öngörü ve analiz aracı olarak yaygın şekilde kullanılır (Montgomery ve ark., 2021).

Matematiksel Model Modelin genel formu şu şekildedir:

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_px_p + \varepsilon$$

Burada:

- y: Bağımlı değişken,
- x_1, x_2, \dots, x_p : Bağımsız değişkenler,
- β_0 : Sabit terim (intercept),
- $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$: Bağımsız değişkenlerin katsayıları,
- ε : Hata terimi (error term), modelin öngöremediği varyasyon.

Model, bağımlı değişkenin bağımsız değişkenlerle olan doğrusal ilişkisini ölçmeyi ve tahmin etmeyi amaçlar. Burada β katsayıları, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkilerini ifade eder.

Modelin kurulumu ve tahmin edilmesi: En küçük kareler yöntemi (Ordinary Least Squares), çoklu doğrusal regresyon modelindeki parametrelerin tahmini için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, hata terimlerinin karelerinin toplamını (Residual Sum of Squares) minimize ederek β katsayılarını tahmin eder (Kutner ve ark., 2005):

$$RSS = \sum (y_i - (\beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_p x_{ip}))^2$$

Varsayımlar Çoklu doğrusal regresyon modelinin geçerli olması için şu temel varsayımların sağlanması gerekir:

1. **Doğrusal bağıllık:** Bağımlı değişkenin bağımsız değişkenlerle olan ilişkisi doğrusaldır.
2. **Hata terimlerinin normal dağılımı:** Hata terimleri normal dağılım gösterir.
3. **Sabit varyans (Homoskedastisite):** Hata terimlerinin varyansı sabittir.
4. **Bağımsızlık:** Hata terimleri birbirinden bağımsızdır.
5. **Bağımsız değişkenler arasındaki multicollinearity sorununun olmaması:** Bağımsız değişkenler arasındaki çok yüksek korelasyon, model performansını olumsuz etkileyebilir (Gujarati, 2002).

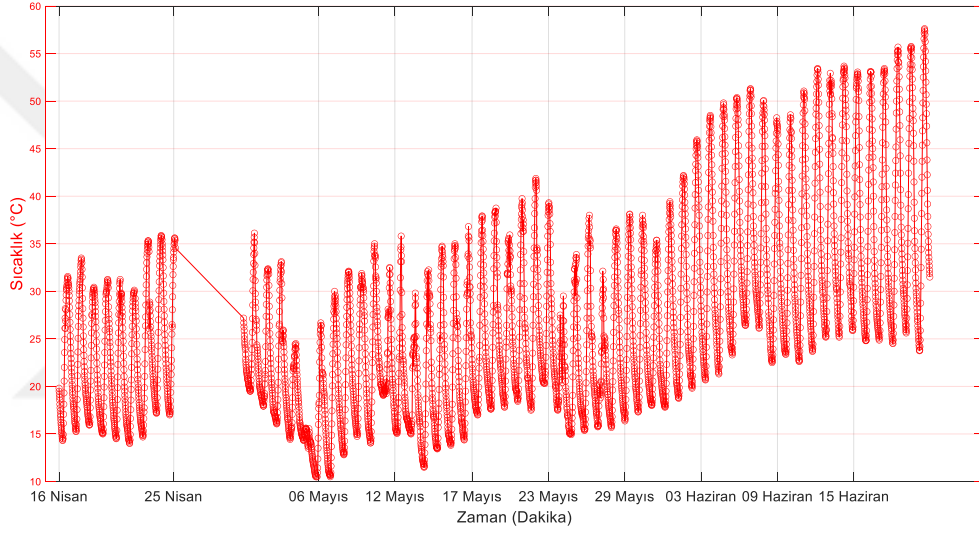
Modelin değerlendirilmesi: Modelin başarısı, genellikle aşağıdaki metriklerle değerlendirilir:

- **R² (Determination Coefficient):** Modelin bağımlı değişkenin toplam varyansını açıklama oranını gösterir.
- **Adjusted R²:** Bağımsız değişken sayısının etkisini dikkate alarak R² değerini düzenler.
- **F-Statistiği:** Modelin genel anlamda anlamlı olup olmadığını test eder.
- **p-Değerleri:** Her bir bağımsız değişkenin anlamlılığını belirler.

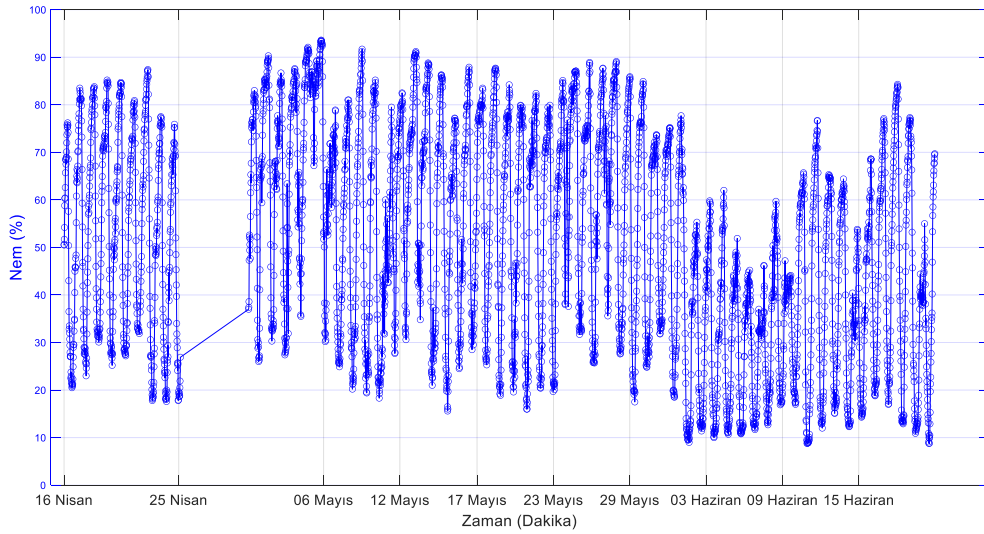
Çoklu doğrusal regresyon, birden fazla faktörün etkisinin analiz edilmesi ve bu faktörlerin öngörüler üzerindeki katkısının ölçülmesi için güçlü bir tekniktir. Ancak modelin başarısı, varsayımların sağlanması ve özellikle veri setindeki multicollinearity gibi potansiyel sorunların giderilmesine bağlıdır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Sera ortamına ait Os, On ve ayrıca Ti, Tsu ve Ts verileri 16-04-2024 23:55-09-07-2024 11:08 tarihleri arasında 20 dk. aralıklarla kaydedilmiştir. Şekil 4.1 ve 4.2’de sera ortamına belirtilen tarihler arasındaki sıcaklık ve nem değerleri görülmektedir. Çalışmanın ilk aşamasında elektrik kesintisi nedeniyle Raspberry Pi 5 tek kart bilgisayarın kapanıp açılması durumunda Node-Red programının otomatik olarak aktif olması için gereken kurulum yapılandırılmalarının yapılmaması nedeniyle 25 Nisan 16:22 ile 30 Nisan 18:34 tarihleri arasında veri kaydı yapılamamıştır. Sonraki süreçte ise herhangi bir aksama olmaksızın sistem veri kaydını gerçekleştirmiştir.

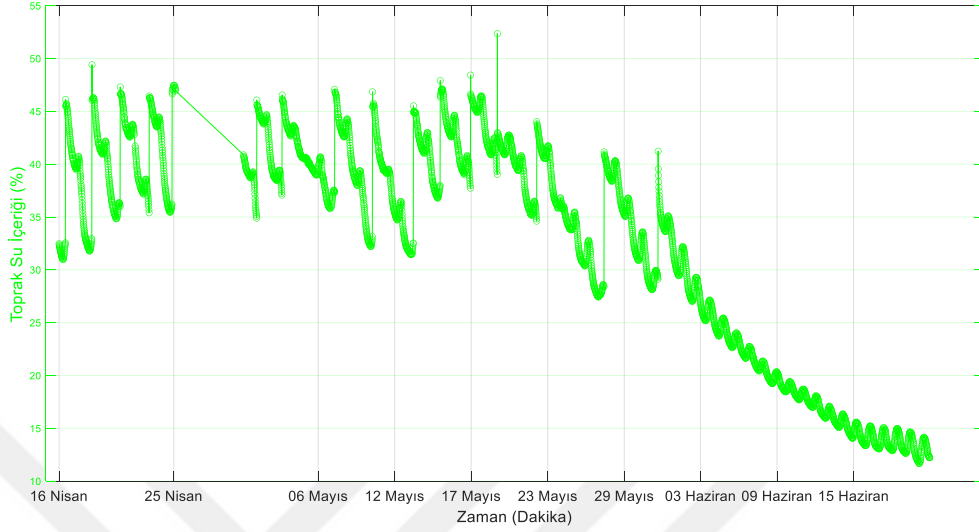


Şekil 4.1. Sera Os değişimi

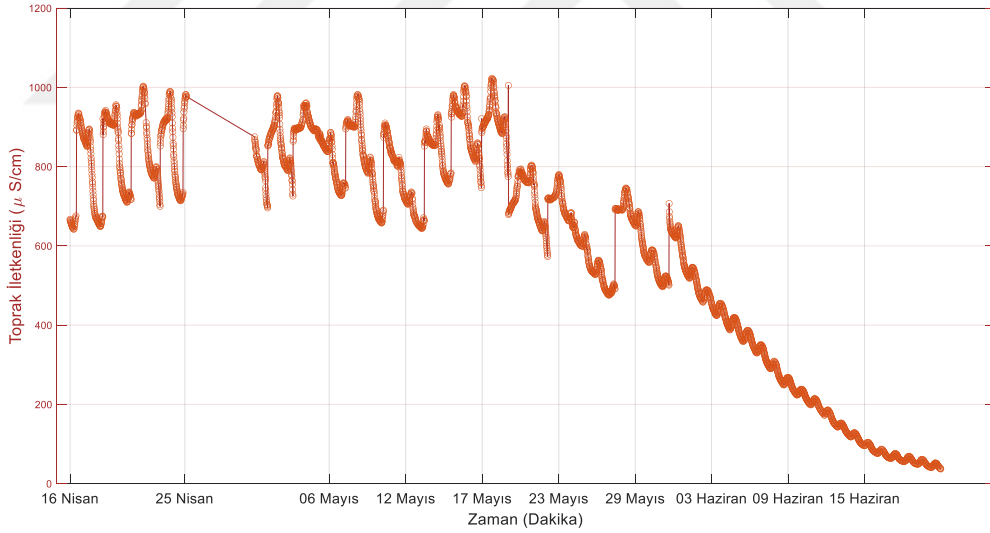


Şekil 4.2. Sera On değişimi

Şekil 4.3 ve 4.4'te ise T_{su} ve T_i değerleri görülmektedir. Buğday bitkilerinin her sulama döneminde T_{su} ve T_i 'nin periyodik olarak arttığı ve sonraki sulama dönemine kadar zamanla azaldığı görülmektedir.

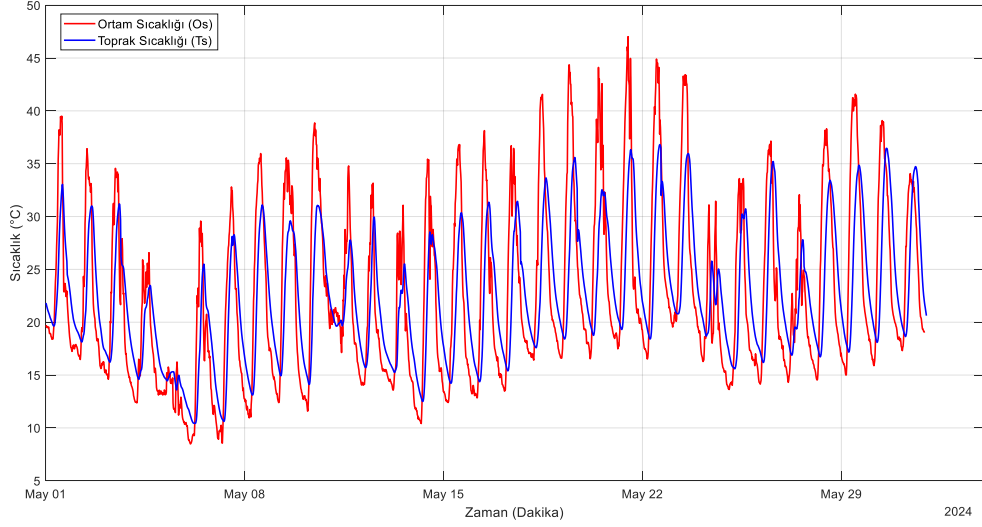


Şekil 4.3. T_{su} değerinin değişimi



Şekil 4.4. T_i değerinin değişimi

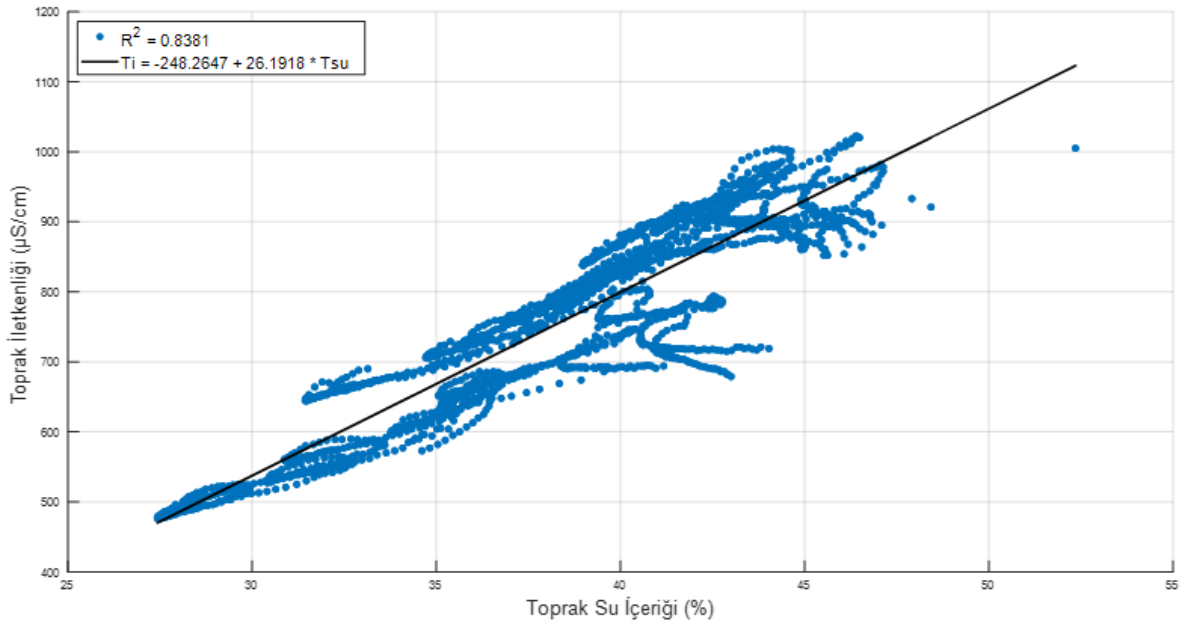
Şekil 4.5'te DHT65 sensörünün ölçmüş olduğu sıcaklık değeri ile toprak nem ve EC sensörünün ölçmüş olduğu sıcaklık değerinin paralel değişim sergilediği görülmektedir. Bu durum her iki sensörün de sıcaklık değişimlerini hassas bir şekilde algıladığını göstermektedir.



Şekil 4.5. Os ve Ts değişimleri

Ti ile Tsu arasındaki ilişki Şekil 4.6’da verilmiştir. İki değişken arasında anlamlı bir korelasyon bulunmaktadır. Regresyon denkleminin R^2 değeri 0.8381 olup, bu da iki değişken arasında güçlü bir doğrusal ilişki olduğunu göstermektedir.

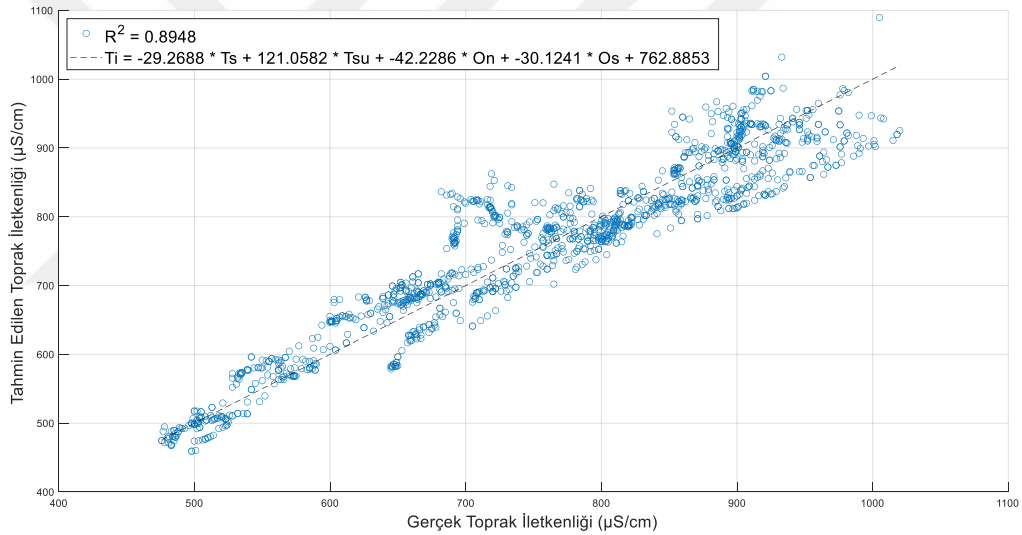
Ti, topraktaki çözülmüş tuzların ve iyonların varlığına bağlıdır. Tsu arttıkça, toprakta bulunan suyun daha fazla iyonu çözme kapasitesi artmaktadır. Özellikle sodyum (Na^+), potasyum (K^+), kalsiyum (Ca^{2+}) gibi katyonlar ve klor (Cl^-) gibi anyonlar, toprakta çözünür ve bu iyonların varlığı, Ti doğrudan etkilemektedir.



Şekil 4.6. Ti ile Tsu arasındaki doğrusal regresyon ilişkisi

Çalışmada, T_i 'yi tahmin etmek amacıyla çoklu doğrusal regresyon (Multiple Linear Regression) modeli kullanılmıştır. Regresyon analizi, bağımsız değişkenlerle (input değişkenleri) bağımlı değişken arasındaki ilişkiyi modelleyerek, bağımsız değişkenlerin etkilerini ortaya koyan bir istatistiksel tekniktir. Bu model, T_i , T_s , T_{su} , O_n ve O_s gibi bağımsız değişkenler kullanılarak tahmin edilmiştir.

Veri seti, modelin genel geçerliliğini sağlamak amacıyla eğitim ve test olmak üzere ikiye bölünmüştür: Eğitim seti (%70) modelin öğrenmesi için, test seti (%30) ise modelin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Modelin başarısını artırmak için veri ön işleme adımları gerçekleştirilmiştir. Verilerdeki eksik değerler, `rmmisssing` fonksiyonu ile temizlenmiş ve bağımsız değişkenler, ortalama 0 ve standart sapma 1 olacak şekilde normalize edilmiştir. Elde edilen modelin R^2 değeri %88.79 olarak elde edilmiştir (Şekil 4.7)



Şekil 4.7. T_i tahmini (Multiple linear regression)

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu araştırmada elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- Çalışmada kablosuz haberleşme yöntemlerinden biri olan LoRaWAN sistemi kullanılarak bir sera ortamına ait O_s ve O_n , T_{su} , T_s ve T_i değerleri ölçülerek uzak bir tek kart bilgisayara kaydedilmiştir.
- Gateway ve sensörler TTN konsola tanıtılarak sensör verileri MQTT protokolü kullanılarak internet üzerinden Node-Red platformuna aktarılmıştır.
- Node-Red ortamında verilere tarih ve saat damgası eklenerek CSV dosya formatında kaydedilmiştir.
- Veriler 16-04-2024 23:55-09-07-2024 11:08 tarihleri arasında 20 dk. aralıklarla kaydedilmiş ve değerlendirilmiştir.
- T_{su} ile T_i arasındaki R^2 değeri 0.8381 olarak elde edilmiştir. Bu durum bu iki değişken arasında güçlü bir doğrusal ilişki olduğunu göstermektedir.
- Çalışmada, toprak iletkenliğini tahmin etmek amacıyla çoklu doğrusal regresyon (Multiple Linear Regression) modeli kullanılmıştır. Bu modelde, T_i , T_s , T_{su} , O_n ve O_s gibi bağımsız değişkenler kullanılarak tahmin edilmiştir ve sonuç olarak R^2 değeri 0.8879 olarak elde edilmiştir.

Bu araştırma sonunda aşağıdaki önerilerde bulunulabilir:

- LoRaWAN sisteminin yanı sıra Zigbee, NB-IoT ve Wi-Fi gibi farklı kablosuz haberleşme protokollerinin farklı tarımsal üretim süreçlerindeki performansı incelenebilir.
- Node-Red platformunda toplanan veriler kullanılarak, belirli eşik değerlerin aşılması durumunda üreticiyi uyaracak bir gerçek zamanlı bildirim sistemi (SMS, e-posta veya mobil uygulama) geliştirilebilir.
- Bu çalışma yöntemine benzer bir yöntem kullanılarak T_{su} ve iletkenlik verilerine dayalı olarak otomatik sulama sistemi geliştirilebilir.
- Verilerin bulut tabanlı bir veri tabanında depolanması ve uzaktan erişilebilir hale getirilmesi ile daha geniş çaplı uygulamalar (belirli bir bölgedeki sera ya da çiftliklerin uzak takibi ve kontrolü) yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Adelantado, F., Vilajosana, X., Tuset-Peiró, P., Martinez, B., Melia-Segui, J., & Watteyne, T. (2017). Understanding the limits of LoRaWAN. *IEEE Communications Magazine*, 55(9), 34-40.
- Adi, P. D. P., Prasetya, D. A., Arifuddin, R., Sari, A. P., Mukti, F. S., Sihombing, V., Anjar, A., Sagala, E., Junita, & Yanris, G. J. (2021, October). Application of IoT-LoRa Technology and Design in irrigation canals to improve the quality of agricultural products in Batu Indonesia. In *2021 2nd International Conference On Smart Cities, Automation & Intelligent Computing Systems (ICON-SONICS)* (pp. 88-94). IEEE.
- Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., & Townsley, W. M. (2016). A study of LoRa: Long range & low power networks for the internet of things. *Sensors*, 16(9), 1466.
- Baccarelli, E., Naranjo, P. G. V., Scarpiniti, M., Shojafar, M., & Abawajy, J. H. (2017). Fog of everything: Energy-efficient networked computing architectures, research challenges, and a case study. *IEEE access*, 5, 9882-9910.
- Brewster, C., Roussaki, I., Kalatzis, N., Doolin, K., & Ellis, K. (2017). IoT in agriculture: Designing a Europe-wide large-scale pilot. *IEEE communications magazine*, 55(9), 26-33.
- Centenaro, M., Vangelista, L., Zanella, A., & Zorzi, M. (2016). Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*, 23(5), 60-67.
- Chang, Y. C., Huang, T. W., & Huang, N. F. (2019, September). A machine learning based smart irrigation system with LoRa P2P networks. In *2019 20th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS)* (pp. 1-4). IEEE.
- Codeluppi, G., Cilfone, A., Davoli, L., & Ferrari, G. (2020). LoRaFarM: A LoRaWAN-based smart farming modular IoT architecture. *Sensors*, 20(7), 2028.
- Feltrin, L., Buratti, C., Vinciarelli, E., De Bonis, R., & Verdone, R. (2018). LoRaWAN: Evaluation of link-and system-level performance. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(3), 2249-2258.
- Froiz-Míguez, I., Lopez-Iturri, P., Fraga-Lamas, P., Celaya-Echarri, M., Blanco-Novoa, Ó., Azpilicueta, L., Falcone, F., & Fernández-Caramés, T. M. (2020). Design, implementation, and empirical validation of an IoT smart irrigation system for fog computing applications based on Lora and Lorawan sensor nodes. *Sensors*, 20(23), 6865.

- Gresl, J., Fazackerley, S., & Lawrence, R. (2021, January). Practical Precision Agriculture with LoRa based Wireless Sensor Networks. In *SENSORNETS* (pp. 131-140).
- Grunwald, A., Schaarschmidt, M., & Westerkamp, C. (2019, May). LoRaWAN in a rural context: Use cases and opportunities for agricultural businesses. In *Mobile Communication-Technologies and Applications; 24. ITG-Symposium* (pp. 1-6). VDE.
- Gujarati, D. N. (2002). *Basic Econometrics* 4th ed.
- Gutiérrez, S., Martínez, I., Varona, J., Cardona, M., & Espinosa, R. (2019, November). Smart mobile LoRa agriculture system based on internet of things. In *2019 IEEE 39th Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXIX)* (pp. 1-6). IEEE.
- Irianto, K. D. (2022). Performance evaluation of LoRa in farm irrigation system with internet of things. *Kinet. Game Technol. Inf. Syst. Comput. Network, Comput. Electron. Control*, 4(1), 81-90.
- Jayaraman, P. P., Yavari, A., Georgakopoulos, D., Morshed, A., & Zaslavsky, A. (2016). Internet of things platform for smart farming: Experiences and lessons learnt. *Sensors*, 16(11), 1884.
- Kodali, R. K., Kuthada, M. S., & Borra, Y. K. Y. (2018, December). LoRa based smart irrigation system. In *2018 4th International Conference on Computing Communication and Automation (ICCCA)* (pp. 1-5). IEEE.
- Kumar, P. R., Wan, A. T., & Suhaili, W. S. H. (2020). Exploring data security and privacy issues in internet of things based on five-layer architecture. *International journal of communication networks and information security*, 12(1), 108-121. ndition
- Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J., & Li, W. (2005). *Applied linear statistical models*. McGraw-hill.
- Loriot, M., Aljer, A., & Shahrour, I. (2017, September). Analysis of the use of LoRaWan technology in a large-scale smart city demonstrator. In *2017 Sensors Networks Smart and Emerging Technologies (SENSET)* (pp. 1-4). IEEE.
- Magrin, D., Centenaro, M., & Vangelista, L. (2017, May). Performance evaluation of LoRa networks in a smart city scenario. In *2017 IEEE International Conference on communications (ICC)* (pp. 1-7). ieee.
- Mikhaylov, K., Petaejaervi, J., & Haenninen, T. (2016, May). Analysis of capacity and scalability of the LoRa low power wide area network technology. In *European Wireless 2016; 22th European Wireless Conference* (pp. 1-6). VDE.

- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2021). *Introduction to linear regression analysis*. John Wiley & Sons.
- Mowla, M. N., Mowla, N., Shah, A. S., Rabie, K. M., & Shongwe, T. (2023). Internet of Things and wireless sensor networks for smart agriculture applications: A survey. *IEEE Access*, 11, 145813-145852.
- Ortiz, F. M., de Almeida, T. T., Ferreira, A. E., & Costa, L. H. M. (2020). Experimental vs. simulation analysis of LoRa for vehicular communications. *Computer Communications*, 160, 299-310.
- Pagano, A., Croce, D., Tinnirello, I., & Vitale, G. (2022). A survey on LoRa for smart agriculture: Current trends and future perspectives. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(4), 3664-3679.
- Parri, L., Parrino, S., Peruzzi, G., & Pozzebon, A. (2019). Low power wide area networks (LPWAN) at sea: Performance analysis of offshore data transmission by means of LoRaWAN connectivity for marine monitoring applications. *Sensors*, 19(14), 3239.
- Salih, T. A., & Noori, M. S. (2020, November). Using LoRa technology to monitor and control sensors in the greenhouse. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 928, No. 3, p. 032058). IOP Publishing.
- Siddique, A., Prabhu, B., Chaskar, A., & Pathak, R. (2019). A review on intelligent agriculture service platform with lora based wireless sensor network. *Life*, 100, 7000.
- Singh, R. K., Aernouts, M., De Meyer, M., Weyn, M., & Berkvens, R. (2020). Leveraging LoRaWAN technology for precision agriculture in greenhouses. *Sensors*, 20(7), 1827.
- Stoček, M., Vaněk, J., Masner, J., & Pavlík, J. (2016). Internet of things (iot) in agriculture-selected aspects. *Agris on-line Papers in Economics and Informatics*, 8(1), 83-88.
- Suwaid, M. M., Habaebi, M. H., & Khan, S. (2019, December). Embedded LoRaWAN for agricultural sensing applications. In *2019 IEEE 6th International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS)* (pp. 1-5). IEEE.
- Trinh, D. C., Truvant, T. C., & Bui, T. D. (2018, October). Design of automatic irrigation system for greenhouse based on LoRa technology. In *2018 International conference on advanced technologies for communications (ATC)* (pp. 72-77). IEEE.
- Verdouw, C., Wolfert, S., & Tekinerdogan, B. (2016). Internet of Things in agriculture. *CABI Reviews*, (2016), 1-12.
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big data in smart farming—a review. *Agricultural systems*, 153, 69-80.

EKLER

% Çoklu doğrusal regresyon (Multiple Linear Regression) modeli MATLAB kodları

```
% Excel dosyasını oku
data = readtable('toprak.xlsx'); % Excel dosyasını yükle
% Zamanı datetime formatına dönüştür (eğer zaman bilgisi var)
data.Time = datetime(data.Time, 'InputFormat', 'dd.MM.yyyy HH:mm');
% NaN değerleri kontrol et ve temizle
data = rmmissing(data); % NaN içeren satırları kaldır
% Bağımsız değişkenler (X) ve Bağımlı değişken (y) seçimi
X = data(:, {'Ts', 'Tsu', 'On', 'Os'}); % Bağımsız değişkenler
y = data.Ti; % Bağımlı değişken (toprak iletkenliği)
% Bağımsız değişkenleri standartlaştır (ortalama 0, standart sapma 1)
X_std = (X - mean(X)) ./ std(X);
% Eğitim ve test setlerine ayırma
cv = cvpartition(size(X_std,1), 'HoldOut', 0.3); % Verinin %70'i eğitim, %30'u test için
ayrılacak
XTrain = X_std(training(cv), :); % Eğitim verisi
yTrain = y(training(cv)); % Eğitim hedefi
XTest = X_std(test(cv), :); % Test verisi
yTest = y(test(cv)); % Test hedefi
% fitlm ile regresyon modelini oluşturma
mdl = fitlm(XTrain, yTrain); % Regresyon modelini oluştur
% Test verisi ile tahmin yapma
yPred = predict(mdl, XTest); % Test verisi ile tahmin yap
% Sonuçları görselleştirme
figure;
set(gcf, 'Color', 'w'); % Arka planı beyaz yap
scatter(yTest, yPred);
hold on;
plot([min(yTest), max(yTest)], [min(yTest), max(yTest)], 'k--');
xlabel('Gerçek Toprak İletkenliği ( $\mu\text{S/cm}$ )', 'FontSize', 16); % Eksen açıklaması toprak
iletkenliği, mikrosiemens/cm olarak değiştirildi
```

```

ylabel('Tahmin Edilen Toprak İletkenliği ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )', 'FontSize', 16); % Eksen açıklaması
toprak iletkenliği, mikrosiemens/cm olarak değiştirildi
grid on;
set(gca, 'Color', 'w'); % Arka planı beyaz yap
% R kare hesaplama
R2 = 1 - sum((yTest - yPred).^2) / sum((yTest - mean(yTest)).^2);
% Regresyon katsayılarını al ve denklemi oluştur
coeffs = mdl.Coefficients.Estimate(2:end); % Katsayılar (intercept hariç)
intercept = mdl.Coefficients.Estimate(1); % Sabit terim
% Denklemi oluştur (intercept en son olacak)
independentVars = {'Ts', 'Tsu', 'On', 'Os'}; % Bağımsız değişken isimleri
eqn = ''; % Başlangıçta denkleme boş değer atanır
for i = 1:length(coeffs)
    eqn = [eqn, num2str(coeffs(i), '%.4f'), ' * ', independentVars{i}];
    if i < length(coeffs)
        eqn = [eqn, ' + ']; % Sonraki terimler için ' + ' ekle
    end
end
eqn = [eqn, ' + ', num2str(intercept, '%.4f')]; % Sabit terimi denklemin sonuna ekle
% R kareyi ve denklem metnini legend olarak ekleyin
legendText = {[R^2 = ' num2str(R2, '%.4f')], eqn};
% Denklem ve R kareyi legend olarak grafiğe ekleyin
legend(legendText, 'Location', 'northwest', 'FontSize', 16, 'TextColor', 'black');
% Modelin performansını değerlendirme
mse = mean((yPred - yTest).^2); % MSE hesapla
rmse = sqrt(mse); % RMSE hesapla
disp(['MSE: ', num2str(mse)]);
disp(['RMSE: ', num2str(rmse)]);
% Katsayılar tablosu oluştur
coeffTable = table(coeffs(1), coeffs(2), coeffs(3), coeffs(4), coeffs(5), ...
    'VariableNames', {'Ts', 'Tsu', 'On', 'Os', 'Intercept'});
% Katsayılar tablosunu görüntüle
disp('Katsayılar Tablosu:');
disp(coeffTable);

```