



T.C.  
NECMETTİN ERBAKAN  
ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**TARIMSAL SULAMADA YAPAY ZEKA  
TEKNİKLERİ VE UYGULAMALARI**

**AYOOB GHUFRAN IHSAN QAYAJI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Mayıs-2025  
KONYA  
Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

AYOOB GHUFRAN IHSAN QAYAJI tarafından hazırlanan “TARIMSAL SULAMADA YAPAY ZEKA TEKNİKLERİ VE UYGULAMALARI” adlı tez çalışması 23/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

#### Başkan

Doç. Dr. Mümtaz MUTLUER

#### Danışman

Prof. Dr. Muciz ÖZCAN

#### Üye

Dr. Öğr. Üyesi Ali Osman ÖZKAN

### İmza

.....

.....

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../20.. gün ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY  
FBE Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## **DECLARATION PAGE**

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

AYOOB GHUFRAN IHSAN QAYAJI

Tarih: 23/06/2025

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

#### TARIMSAL SULAMADA YAPAY ZEKA TEKNİKLERİ VE UYGULAMALARI

AYOOB GHUFRAN IHSAN QAYAJI

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof.Dr. Muciz ÖZCAN

2025, 111 Sayfa

Jüri

Prof.Dr. Muciz ÖZCAN

Doç. Dr. Mümtaz MUTLUER

Dr. Öğr. Üyesi Ali Osman ÖZKAN

Tarım sektörü, iklim değişikliği, su kaynaklarının azalması ve artan gıda ihtiyacı gibi küresel zorluklar karşısında daha verimli ve sürdürülebilir teknolojik çözümlere ihtiyaç duymaktadır. Bu bağlamda sulama sistemlerinin akıllı, enerji verimli ve otonom hale getirilmesi, tarımsal üretimin sürekliliği açısından büyük önem arz etmektedir. Bu tez çalışmasında, çevresel koşullara duyarlı, dağıtık karar verebilen ve hem çevrimdışı hem de çevrimiçi çalışabilen bir akıllı sulama sistemi geliştirilmiştir. Sistem, yapay zeka destekli karar mekanizması, kablosuz sensör ağları (WSN), zaman bölmeli haberleşme protokolü (TDMA) ve bulut-tabanlı veri yönetimiyle bütünlük bir yapıda tasarlanmış ve hem simülasyon hem de fiziksel ortamda uygulanmıştır.

Önerilen mimaride, toprak nemi ve ortam sıcaklığı gibi temel çevresel parametreler yerel düğümler aracılığıyla izlenmekte ve bu veriler düğümler arasında doğrudan paylaşılmaktadır. Dağıtık karar verme süreci, NBIA (Network-Based Intelligent Algorithm) algoritmasıyla desteklenmiş, böylece düğümler, merkezi bir birime ihtiyaç duymaksızın, en uygun sulama zamanını ve gerekliliğini ortaklaşa değerlendirebilir hale getirilmiştir. TDMA protokolü ile yapılandırılan haberleşme altyapısı sayesinde zaman çakışmaları önlenmiş, veri bütünlüğü artırılmış ve enerji tüketimi minimize edilmiştir.

Geliştirilen sistem, çevrimdışı senaryolarda da sorunsuz şekilde çalışabilmekte; düğümler arası iletişim ve sulama kontrolü internet bağlantısı olmaksızın sürdürülebilmektedir. Bununla birlikte, herhangi bir düğüm internet erişimi kazandığında, sistemdeki tüm veriler senkronize biçimde bulut ortamına (Firebase Realtime Database) aktarılmakta ve bu verilere mobil uygulama aracılığıyla kullanıcı erişimi sağlanmaktadır. Bu yapı, hem çevrimdışı sahalarda güvenilirlik sağlamak hem de uzaktan izleme ve müdahale olanağı sunmaktadır.

Sistem tasarımı, MATLAB ortamında simülasyonlar yoluyla analiz edilmiş ve ardından fiziksel prototip üzerinde uygulanmıştır. Simülasyon sonuçları; ağ gecikmesinin azaldığını, çakışma oranının minimize edildiğini, paket kayıplarının düşürüldüğünü ve ağ güvenilirliğinin önemli ölçüde artırıldığını göstermektedir. Fiziksel uygulama ise, sistemin saha koşullarında çalışabilirliğini ve gerçek zamanlı karar alma yeteneğini

başarıyla ortaya koymuştur. Ayrıca, sistemin enerji tasarrufu sağlaması ve su tüketiminde %30 ila %50 oranında azalma elde etmesi, uygulamanın tarımsal verimliliğe doğrudan katkı sunduğunu göstermektedir.

Bu çalışma, yapay zeka tabanlı, esnek haberleşme altyapısına sahip, düşük maliyetli ve dağıtık bir sulama kontrol sistemi geliştirerek, özellikle internet altyapısının yetersiz olduğu kırsal bölgelerde uygulanabilir akıllı tarım teknolojileri için önemli bir örnek sunmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Akıllı Sulama Sistemleri, Dağıtık Karar Verme, WSN, MATLAB, NBIA Algoritması, TDMA Protokolü, Veri Haberleşmesi, Yapay Zeka



## **ABSTRACT**

### **MS THESIS**

#### **T APPLICATIONS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNIQUES IN AGRICULTURAL IRRIGATION**

**AYOOB GHUFRAN IHSAN QAYAJI**

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY  
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE  
IN MECHANICAL ENGINEERING**

**Advisor: Prof.Dr. Muciz ÖZCAN**

**2025, 111 Pages**

**Jury**

**Prof.Dr. Muciz ÖZCAN**

**Doç. Dr. Mümtaz MUTLUER**

**Dr. Öğr. Üyesi Ali Osman ÖZKAN**

This thesis presents the design, implementation, and evaluation of an intelligent and autonomous irrigation management system that addresses the increasing demand for sustainable agricultural practices amid global water scarcity and climate variability. The proposed system integrates artificial intelligence techniques with wireless sensor networks (WSNs), utilizing a TDMA-based communication protocol and a dynamic optimization algorithm—NBIA (Network-Based Intelligent Algorithm)—to achieve decentralized, efficient control over irrigation operations.

Environmental parameters such as soil moisture and ambient temperature are monitored via distributed sensor nodes. These nodes exchange data directly with one another and collaboratively determine irrigation actions without requiring a central controller. The TDMA protocol ensures time-slotted communication to minimize collision, while the NBIA algorithm dynamically optimizes node-to-node communication paths based on network topology and real-time events.

The system is designed to operate both offline and online. In the absence of internet connectivity, sensor nodes continue to coordinate and control irrigation locally. When any node regains internet access, all collected data are synchronized with a Firebase Realtime Database, allowing users to remotely monitor and manage the system through a mobile application developed using Flutter.

The proposed architecture was validated through both MATLAB-based simulations and a real-world prototype built using low-power embedded hardware. Results show significant improvements in communication reliability, latency reduction, packet delivery success, and network scalability. Moreover, field testing demonstrated energy-efficient operation and potential water savings of up to 30–50%, confirming the system’s suitability for deployment in rural areas with limited infrastructure.

**Keywords:** Artificial Intelligence, Communication Protocols, Distributed Decision Making, MATLAB, NBIA Algorithm, Smart Irrigation Systems, TDMA, Wireless Sensor Networks



# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER .....</b>	<b>viii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR.....</b>	<b>x</b>
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Sulama Sistemleri .....	3
1.2. Yeni Nesil Akıllı Sulama Sistemleri.....	4
1.3. Kapalı Döngü Sulama Kontrolü .....	10
1.3.1. Tanım .....	10
1.3.2. Operasyon .....	10
1.4. Kablosuz Sensör Ağları (WSN).....	12
1.5. Kablosuz Algılayıcı Ağlarda (WSN) Düğüm Konumlandırması .....	14
1.6. Tezin Amacı.....	15
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>17</b>
2.1. Kablosuz Haberleşme Teknolojileri ile İlgili Yapılan Çalışmalar.....	17
2.2. Akıllı Sulama Sistemleri Üzerine Yapılan Çalışmalar .....	21
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>25</b>
3.1. Akıllı Sulama Sisteminin Genel Mimari Yapısı .....	25
3.1.1. ESP32'nin Genel Özellikleri .....	26
3.1.2. HL-69 Toprak Nem Sensörü.....	28
3.1.3. DHT11 Sıcaklık ve Nem Sensörü.....	30
3.1.4. Su Pompası ve MOSFET Kontrollü Sürücü Devresi.....	31
3.1.5. Güneş Enerjili Güç Besleme Sistemi .....	32
3.2. Haberleşme ve Algoritma Yapısı.....	33
3.2.1. Haberleşme Altyapısı.....	34
3.2.2. Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Enerji Tüketim Kaynakları .....	35
3.2.3. Kablosuz Sensör Ağlarının Sınıflandırılması .....	37
3.2.4. Kablosuz Sensör Ağı Protokol Katmanları.....	38
3.2.5. Kablosuz Sensör Ağı MAC Protokolleri .....	39
3.3. Nesnelerin İnterneti (IoT) .....	42
3.3.1. Nesnelerin İnternetini Oluşturan Katmanlar.....	43
3.3.2. IoT Tabanlı Akıllı Gömülü Sistemler .....	44
3.4. Ağ Tabanlı Zeki Algoritma (NBIA) .....	46
<b>4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....</b>	<b>47</b>
4.1. Simülasyon Sonuçları ile Algoritma Performansı .....	47

4.1.1. Simülasyon Ortamı ve Yöntemi .....	48
4.1.2. Simülasyon Parametreleri .....	49
4.1.3. Kapsama Grafiği ile Ağ Yapısı.....	52
4.1.4. Bindirme Grafiği ile NBIA Sonrası Komşuluklar .....	53
4.1.5. Verimlilik (Throughput) Analizi .....	55
4.1.6. Çakışma Tespiti ve İzleme (Collision Detection).....	56
4.1.7. Zaman Dilimi Onay Olayları (Slot Confirmation Events).....	57
4.1.8. Ağ Güvenilirliği (Network Reliability) .....	58
4.1.9. Paket Kaybı Oranı (Packet Drop Rate).....	60
4.1.10. Ağ Gecikmesi (Latency) Değerleri.....	61
4.1.11. Düğüm Komşuluk Yoğunluğu (Neighbor Count) .....	62
4.1.12. Zaman İçinde Küresel Çakışma İzleri .....	63
4.1.13. Çakışma İzleme Grafiği (Collision Monitoring Visualization) .....	64
4.2. Gerçek Donanım Üzerindeki Uygulama Sonuçları .....	66
4.2.1. Donanım Testlerinin Amaç ve Süreci.....	66
4.2.2. Firebase Tabanlı Gerçek Zamanlı Veri Aktarımı .....	68
4.2.3. Gerçek Zamanlı Otonom Sulama Sistemi Donanım Uygulaması .....	69
4.2.4. Mobil Uygulama Geliştirme ve Arayüz Tasarımı .....	71
4.3. Tartışma .....	74
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>77</b>
5.1 Sonuçlar .....	77
5.2 Öneriler .....	79
<b>6. KAYNAKLAR .....</b>	<b>81</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>88</b>
EK-1 MATLAB tabanlı NBIA + TDMA simülasyon algoritması.....	88
EK-2 Flutter ile Geliştirilen Giriş Ekranı Kaynak Kodu .....	96
EK-3 Akıllı Tarımsal Sulama Mobil Uygulaması Ana Arayüz Kodları (Flutter) .....	99
EK-4 Tarım İstasyonları İzleme Paneli Mobil Arayüz Kodları (Flutter) .....	103
EK-5 İstasyon Konumlama Harita Arayüzü (Flutter).....	106
EK-6 NodeMCU Tabanlı Sulama Kontrol Kodu .....	109

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

Sembol	Açıklama	Birim
$T$	Temperature (Sıcaklık)	°C
$H$	Air humidity ratio (Hava nem oranı)	%
$N$	Total number of nodes in the network (Ağdaki toplam düğüm sayısı)	—
$P$	Pump status (0 = Off, 1 = On) (Pompa durumu (0 = Kapalı, 1 = Açık))	—
$\eta$	System energy efficiency (Sistem enerji verimliliği)	%
$\gamma$	Soil moisture level (Toprak nem seviyesi)	%

### Kısaltmalar

Kısaltma	Açıklama
AI	Artificial Intelligence (Yapay Zekâ)
NBIA	Network-Based Intelligent Algorithm (Ağ Tabanlı Zeki Algoritma)
TDMA	Time-Division Multiple Access (Zaman Bölmeli Çoklu Erişim)
WSN	Wireless Sensor Network (Kablosuz Sensör Ağı)
IoT	Internet of Things (Nesnelerin İnterneti)
MCU	Microcontroller Unit (Mikrodenetleyici Birim)
ESP32	Wi-Fi Supported Microcontroller (Wi-Fi destekli mikrodenetleyici)
HL-69	Soil Moisture Sensor Model (Toprak nem sensörü modeli)
DHT11	Temperature and Humidity Sensor (Sıcaklık ve nem sensörü)
PWM	Pulse Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor (Metal-Oksit-Yarıiletken Alan Etkili Transistör)
LCD	Liquid Crystal Display (Sıvı Kristal Ekran)
VCC	Power Supply (Güç beslemesi / gerilim kaynağı)
API	Application Programming Interface (Uygulama Programlama Arayüzü)
JSON	JavaScript Object Notation (Veri formatı)
RTC	Real Time Clock (Gerçek Zamanlı Saat)
UI	User Interface (Kullanıcı Arayüzü)
TX	Transmit (Veri gönderimi)
RX	Receive (Veri alımı)
GPIO	General Purpose Input/Output (Genel Amaçlı Giriş/Çıkış Pinleri)
IDE	Integrated Development Environment (Entegre Geliştirme Ortamı)
OTA	Over-the-Air (Kablosuz Yazılım Güncellemesi)
mA	Milliampere (Miliamper / akım birimi)
mV	Millivolt (Milivolt / gerilim birimi)
°C	Degree Celsius (Santigrat derece / sıcaklık birimi)

## 1. GİRİŞ

Küresel ölçekte hızla artan nüfus, gıda üretimine olan ihtiyacı da beraberinde getirmektedir. Bununla birlikte, sanayi, bireysel tüketim ve tarımsal faaliyetlerde kullanılan su miktarının artması ile iklim değişikliğine bağlı olumsuzluklar, dünya genelinde ciddi boyutlara ulaşan bir su krizine yol açmıştır. Su kaynaklarının sürdürülebilir şekilde kullanılabilmesi amacıyla çeşitli araştırmalar yapılmakta ve bu alanda teknolojik çözümler geliştirilmeye devam edilmektedir. Tarımda kontrolsüz ve ihtiyaç dışı sulama, hem suyun israfına neden olmakta hem de ürün verimliliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca, çiftçilerin gübre ve ilaç uygulamalarında doğru miktarı öngörememesi, sadece ürün sağlığını değil, aynı zamanda toprak yapısını ve çevresel dengeyi de tehdit etmektedir. Bu nedenlerle, tarımda kaynak kullanımının verimli hâle getirilmesi için akıllı sistemlere olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır (Baştuğ, 2014).

Sulamada yapılan yetersiz su yönetimi, özellikle sulamanın eşit dağılmadığı durumlarda hem su israfına hem de elde edilen ürünlerin kalitesinde düşüşe yol açmaktadır. Tarım arazilerinde sıklıkla birden fazla bitki türü yetiştirilmekte olup, her bir bitkinin suya olan ihtiyacı farklılık göstermektedir (Kwok & Sun, 2018). Bu durum göz ardı edildiğinde, çiftçiler genellikle ihtiyaç duyulandan fazla miktarda su pompalamakta ve bu da hem enerji hem de su kaynaklarının boşa harcanmasına neden olurken, ürün verimliliğinde de azalmaya yol açmaktadır (Goap vd., 2018).

Tarımda sulama ve gübreleme uygulamalarında karşılaşılan temel sorunlardan biri, tarım arazileri ile arazi sahibinin ikametgahı arasındaki mesafenin fazla olmasıdır. Bu durum, özellikle kırsal bölgelerde tarımsal faaliyetlerin düzenli olarak yerinde takip edilmesini zorlaştırmaktadır. Öte yandan, Türkiye’de sulama suyunun ekonomik olarak düşük maliyetli olması, suyun gereğinden fazla ve bilinçsizce kullanılmasına yol açmaktadır. Toprak nem düzeyi dikkate alınmaksızın yapılan düzensiz sulama uygulamaları, bu sorunu daha da derinleştirmekte ve hem su israfına hem de verimlilik kaybına neden olmaktadır (Kurt vd., 2022a).

Avrupa Birliği (AB), sürdürülebilir bir biyolojik ekonomi anlayışını benimseyerek, “Çiftlikten Çatala” (Farm to Fork – F2F) stratejisiyle tarım ve gıda sistemlerinin iklim değişikliğine karşı daha dirençli hâle getirilmesini hedeflemektedir. Bu strateji kapsamında, tarımsal üretimde dijital teknolojilerin kullanımının artırılması, girdilerin daha verimli yönetilmesi ve biyolojik kaynaklara dayalı çözümlerin (biyogübreler, biyoenerji ve biyokimyasallar gibi) geliştirilmesi özel olarak vurgulanmaktadır (Commission, 2020). AB’nin gelecek tarım politikalarında, iklim

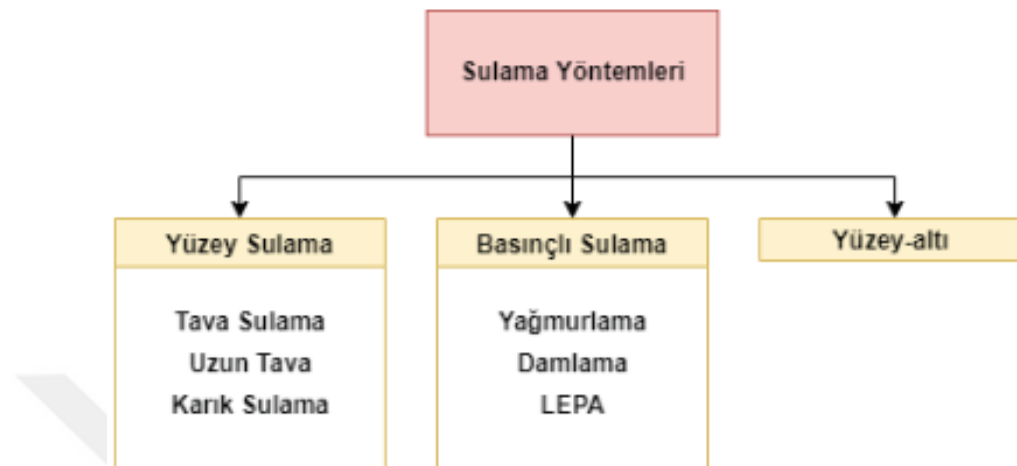
değişikliğine uyum sağlamak, kaynakların hassas ve etkin biçimde kullanılmasını sağlamak amacıyla dijitalleşme ve yapay zekâ tabanlı uygulamaların yaygınlaştırılması gerektiği belirtilmektedir. Ayrıca hassas tarım tekniklerinin yaygınlaştırılması, toprak işleme, gübreleme ve bitki koruma gibi temel tarımsal işlemler için yenilikçi çözümler geliştirilmesi de öncelikli hedefler arasındadır (MacPherson vd., 2022). Pestisitlerin aşırı kullanımı ve gübre kaynaklı besin birikiminin ekosistemler ve biyoçeşitlilik üzerinde yarattığı olumsuz etkileri göz önünde bulunduran AB, 2030 yılına kadar pestisit kullanımını %50, düşük girdili tarım ve hassas tarım uygulamaları ile gübre kaynaklı besin maddesi kirliliğini ise %20 oranında azaltmayı hedeflemektedir (Commission, 2020).

Türkiye’de mevcut durumda 112 milyar m<sup>3</sup> düzeyinde kullanılabilir su kaynağı bulunmaktadır. Bu kaynakların yaklaşık %39’u etkin olarak kullanılmakta olup, bunun 32 milyar m<sup>3</sup>’ü tarımsal sulamada, 7 milyar m<sup>3</sup>’ü hane halkının içme suyu ve diğer günlük ihtiyaçlarında, 5 milyar m<sup>3</sup>’ü ise sanayi faaliyetlerinde tüketilmektedir. Genel kullanım oranları incelendiğinde, Türkiye’deki su kaynaklarının %73’ü tarımsal sulamaya, %11’i endüstriyel faaliyetlere ve %16’sı evsel tüketime ayrılmaktadır. Dünya genelinde bu oranlar sırasıyla %70 tarım, %22 sanayi ve %8 şehirselle tüketim şeklindedir. Avrupa’da ise suyun %33’ü tarımsal sulamada, %51’i sanayi alanında ve %16’sı kentsel kullanımda değerlendirilmektedir (Dolcel vd., 2021).

Türkiye’nin 2019-2023 dönemi kalkınma planında yer alan “416.4. Akıllı tarım teknolojileri başta olmak üzere yenilikçi ve çevre dostu üretim teknikleri geliştirilecek ve desteklenecektir.” ifadesiyle, tarımsal üretimde dijitalleşme ve akıllı sistemlerin geliştirilmesi öncelikli politika hedefleri arasında yer almıştır (Baştuğ, 2014). Bu kapsamda, özellikle tarımsal sulama süreçlerinde teknoloji tabanlı çözümlerin teşvik edilmesi, hem su kaynaklarının korunması hem de ürün verimliliğinin artırılması açısından kritik öneme sahiptir. Bilinçsiz sulama uygulamaları, su kaynaklarının hızla tükenmesine yol açmakta ve aynı zamanda bitkisel üretimden elde edilen verimi olumsuz etkilemektedir. Bitkilerin büyüme dönemleri boyunca kök bölgelerinde yeterli düzeyde nemin sağlanması, sağlıklı gelişimleri açısından büyük önem taşımaktadır. Topraktaki nem oranının, bitkinin ihtiyaç duyduğu seviyeden düşük ya da yüksek olması, verimliliği doğrudan etkilemektedir (Dorak vd., 2019).

## 1.1. Sulama Sistemleri

Tarımda bitkisel üretimin sürekliliğini sağlamak ve verimliliği artırmak amacıyla çeşitli sulama yöntemleri geliştirilmiştir. Sulama yöntemleri genel olarak yüzey sulama, basınçlı sulama ve yüzey altı sulama olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Sulama yöntemlerinin sınıflandırılması

Şekil 1.1'de sulama yöntemleri genel hatlarıyla Yüzey Sulama, Basınçlı Sulama ve Yüzey-altı Sulama olmak üzere üç ana grupta sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırmaya göre, aşağıdaki yöntemler detaylandırılmıştır:

### 1. Tava (Göllendirme) Sulama Yöntemi:

Tava yöntemi, tarla alanının küçük bölgelere ayrılarak her bölgenin suyla doldurulması esasına dayanır. Arazinin düz olması bu yöntemin etkinliği için önemlidir. Ancak fazla su tüketimi dezavantaj oluşturmaktadır (Kurt vd., 2022b).

### 2. Uzun Tava (Border) Sulama Yöntemi:

Tava yöntemine benzer şekilde çalışır ancak burada sulama alanları uzunlamasına düzenlenmiştir. Yüzey akışkanlığı nedeniyle drenaj kanallarına ihtiyaç duyulmaktadır (Kurt vd., 2022b).

### 3. Karık Sulama Yöntemi:

Bu yöntem, sırayla ekilen bitkiler için uygundur. Bitkiler, karıkların kenarına dikilir ve aralara verilen su sayesinde kök bölgesine ulaşan nem ile sulama sağlanır. Tava yöntemine göre daha verimli kabul edilir (Kurt vd., 2022b).

#### 4. Yağmurlama Sulama:

Pompa yardımıyla basınç altında verilen su, borular ve başlıklar aracılığıyla bitki üzerine yağmur şeklinde püskürtülür. Düzgün alanlarda etkili şekilde uygulanabilmektedir (Kurt vd., 2022b).

#### 5. Damla Sulama:

Bu yöntemde, az miktarda su doğrudan bitkinin kök bölgesine verilir. Borular üzerindeki küçük deliklerden çıkan su, kök gelişimini destekleyici şekilde uygulanır. Su kullanım verimi oldukça yüksektir (Hakgören, 1988; Kurt vd., 2022b).

#### 6. LEPA Sulama:

LEPA (Low Energy Precision Application), hareketli sistemlerle uygulanan ve düzenli aralıklarla dikilmiş bitkilerde tercih edilen bir yöntemdir. Sulama başlıkları, karıklara üstten su vererek eşit ve verimli sulama sağlar (Kurt vd., 2022b).

#### 7. Yüzey Altı (Sızdırma) Sulama Yöntemi:

Sızdırma sulama, düz arazilerde kullanılan ve bitkinin kök bölgesine yer altından su sızdırılması esasına dayanan bir yöntemdir. Bu yöntemde toprak yapısı büyük önem taşır ve sınırlı yaygınlığa sahiptir (Kurt vd., 2022b).

### 1.2. Yeni Nesil Akıllı Sulama Sistemleri

Günümüzde akıllı sulama alanındaki teknolojik ilerlemeler, su kaynaklarının etkin yönetimini sağlamak, bitkisel üretimde verimliliği artırmak ve sürdürülebilir tarım uygulamalarını desteklemek amacıyla gelişmiş teknolojiler ile veri odaklı yöntemlerin entegrasyonuna yönelmiştir. Bu kapsamda geliştirilen yenilikçi yaklaşımlar, geleneksel sulama yöntemlerini geride bırakarak su kullanımını optimize eden, kaynak israfını en aza indiren ve bitki ihtiyaçlarına duyarlı, otomatik kontrol kabiliyetine sahip akıllı sistemlere dönüşmüştür (Obaideen vd., 2022; Vallejo-Gomez vd., 2023).

Nesnelere İnterneti (Nİ) teknolojisinin tarımsal üretim süreçleriyle entegrasyonu, akıllı sulama sistemlerinin gelişiminde kritik bir dönüm noktası olmuştur. Bu teknoloji sayesinde, çiftçiler sulama denetleyicilerini internet altyapısı üzerinden sistemle entegre ederek sulama süreçlerini anlık olarak izleyebilmekte ve uzaktan kontrol edebilmektedir (Obaideen vd., 2022). Söz konusu bağlantı, toprak nem düzeyi, iklimsel koşullar ve bitki

sağlığına ilişkin önemli çevresel verilerin toplanmasını mümkün kılmakta; bu sayede üreticilere veri temelli, optimize edilmiş sulama kararları alma imkânı sunmaktadır.

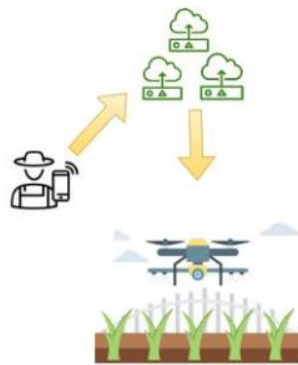
Günümüzde akıllı sulama sistemleri, makine öğrenmesi ve yapay zekâ (YZ) teknikleriyle daha da geliştirilmekte ve karar verme süreçlerinde etkin biçimde kullanılmaktadır. YZ tabanlı algoritmalar, büyük hacimli verileri analiz ederek örüntüleri tanımlayabilmekte; ürün tipi, toprak yapısı ve meteorolojik tahminler gibi çok sayıda değişkene dayalı olarak sulama programlarını optimize edebilmektedir (Vallejo-Gomez vd., 2023). Bu sayede geliştirilen akıllı sistemler, suyun israf edilmesini önleyerek yalnızca ihtiyaç duyulan miktarda sulama yapılmasına imkân tanımakta ve aşırı ya da yetersiz sulama riskini en aza indirerek bitkisel üretimde maksimum verimlilik sağlamaktadır.

Akıllı sulama sistemlerinde, damla sulama ve mikro sulama gibi hassas sulama teknikleri ön plana çıkarak suyun daha etkin ve kontrollü kullanılmasını mümkün kılmıştır (Jiménez vd., 2021). Bu yöntemler, suyu doğrudan bitkinin kök bölgesine ileterek buharlaşma kaynaklı kayıpları azaltmakta ve suyun bitkiye eşit ve verimli bir şekilde dağıtılmasını sağlamaktadır. Akıllı sistemler, bu teknikleri zamana, toprak koşullarına ve bitki türüne göre optimize ederek her bitkinin ihtiyaç duyduğu suyu, doğru zamanda ve miktarda temin etmektedir.

Bununla birlikte, uydu görüntüleme sistemleri ve uzaktan algılama teknolojileri de akıllı sulama sistemlerine entegre edilmiş, böylece bitki sağlığı, su stresi ve ürünün su gereksinimleri hakkında detaylı ve gerçek zamanlı bilgiler elde edilebilir hâle gelmiştir. Çiftçiler, bu görüntüler üzerinden analiz yaparak stres altındaki bölgeleri tespit edebilmekte, geniş arazilerde sulama planlarını eniyileyebilmekte ve sistemdeki verimsizlikleri belirleyerek müdahale edebilmektedir (Ahansal vd., 2022).

Ayrıca akıllı sulama sistemlerinin, tarımsal yönetim yazılımlarıyla entegrasyonu sayesinde sulama faaliyetleri, gübreleme, ilaçlama ve hasat gibi diğer tarımsal uygulamalarla eşgüdümlü olarak yürütülebilmekte, bu da genel çiftlik verimliliğini ve kaynak kullanım etkinliğini önemli ölçüde artırmaktadır (Khan vd., 2022).

Mobil uygulamalar da çiftçilerin akıllı sulama sistemlerine erişimini kolaylaştırmakta ve uzaktan kontrol imkânı sunmaktadır. Bu uygulamalar aracılığıyla çiftçiler, gerçek zamanlı veri görselleştirmelerine ulaşabilmekte, sulama ayarlarını yerinden bağımsız olarak güncelleyebilmekte ve sistem performansı hakkında anlık bildirimler ile bilgilendirilmektedirler (Guntur vd., 2022).



Şekil 1.2. Akıllı sulama uygulaması bulut tabanlı (Hamidoğlu, 2023)

Şekil 1.2’de, mobil cihazlar ve alıcı sistemler yardımıyla çiftçilerin akıllı sulama işlemlerini nasıl yönettikleri örneklenmiştir.

Günümüzde akıllı sulama teknolojilerindeki ilerlemeler, nesnelerin interneti (Nİ) bağlantısı, yapay zekâ (YZ) algoritmaları, hassas sulama teknikleri, uzaktan algılama sistemleri ve büyük veri analizinin bir araya getirilmesiyle, tarımsal su yönetiminde köklü bir dönüşüm başlatmıştır (García vd., 2020). Bu teknolojik gelişmeler, özellikle su kullanım verimliliğini artırma, ürün verimliliğini maksimize etme ve iklim değişikliğinin neden olduğu su kıtlığına karşı sürdürülebilir tarım uygulamalarının yaygınlaştırılması açısından büyük bir potansiyele sahiptir (Taştan, 2019).

Akıllı sulama sistemleri, bitkinin gerçek zamanlı ihtiyaçlarını karşılamak ve su kullanımını optimize etmek amacıyla çeşitli kontrol stratejilerinden yararlanmaktadır. Bu sistemlerde kullanılan başlıca kontrol stratejileri aşağıda özetlenmiştir (Bwambale vd., 2022, 2023; Romero vd., 2012; Uçar, 2022):

- **Hava Durumuna Dayalı Sulama Planlaması:** Bu yaklaşımda, sıcaklık, bağıl nem ve yağış gibi güncel meteorolojik veriler dikkate alınarak sulama süresi ve sıklığı dinamik olarak ayarlanmakta, böylece hem su israfı önlenmekte hem de bitkinin su ihtiyacı tam zamanında karşılanmaktadır.
- **Toprak Nemine Dayalı Sulama:** Toprağa yerleştirilen nem sensörleri yardımıyla toprak nem içeriği düzenli aralıklarla ölçülmekte, ölçülen değer belirlenen eşik seviyesinin altına düştüğünde sulama işlemi otomatik olarak devreye girmektedir. Bu strateji, aşırı sulamayı önleyerek enerji ve su tasarrufu sağlamaktadır.
- **Bitki Tabanlı Sulama Planlaması:** Bitki türlerine özgü su gereksinimleri göz önünde bulundurularak yapılan bu planlama, her bitki türünün biyolojik özelliklerine ve büyüme dönemlerine uygun su miktarının sağlanmasını

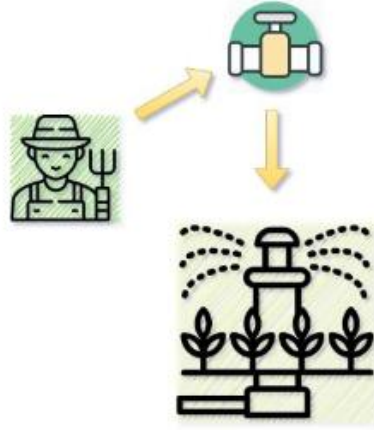
hedeflemektedir. Bu strateji, farklı mahsuller için bireysel sulama algoritmaları oluşturulmasına olanak tanır.

- **Bölgeye Özel Sulama Uygulamaları:** Tarımsal alan, farklı iklimsel ve topografik özelliklere sahip alt bölgelere ayrılarak, her bir bölgeye özel sulama programları tanımlanabilir. Böylece güneşe maruz kalma süresi, toprak yapısı ve bitki türü gibi parametreler doğrultusunda alan bazlı su yönetimi mümkün kılınmaktadır.
- **Yağmur Suyu Hasadı ve Kullanımı:** Akıllı sulama sistemleri, yağmur suyunu toplamak ve bu doğal kaynağı sulamada öncelikli olarak kullanmak üzere entegre su depolama çözümleri sunmaktadır. Bu yaklaşım, özellikle su kaynaklarının sınırlı olduğu bölgelerde sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır.
- **Kaçak Tespiti ve İzleme:** Sistem içerisinde yer alan akış ölçerler veya kaçak sensörleri, su iletim hatlarındaki arıza ve sızıntıları erken evrede tespit ederek sistem verimliliğini artırmakta, aynı zamanda su israfını minimize etmektedir.
- **Uzaktan İzleme ve Kontrol:** Geliştirilen mobil uygulamalar ve web tabanlı kullanıcı arayüzleri sayesinde çiftçiler, sulama sistemlerini uzaktan izleyip kontrol edebilmekte; böylece gerçek zamanlı veriler doğrultusunda sulama zamanlamaları ve miktarları dinamik biçimde ayarlanabilmektedir.

Bu kontrol stratejileri, kapalı döngü akıllı sulama sistemlerinin temelini oluşturarak, su kullanımında yüksek hassasiyet, kaynak tasarrufu ve verimlilik artışı sağlamaktadır. Tarım sektörünün dijital dönüşümünde bu sistemler, çevresel sürdürülebilirlik açısından da kritik bir rol üstlenmektedir.

Yukarıda açıklanan yöntemler, akıllı sulama sistemlerinde yaygın olarak kullanılan kapalı döngü kontrol yapılarının temel örneklerini temsil etmektedir. Bununla birlikte, özellikle küçük ölçekli tarım işletmeleri, peyzaj uygulamaları ve bahçe düzenlemelerinde açık döngü sulama kontrol sistemleri de sıklıkla tercih edilmektedir. Bu sistemler, maliyet etkinlikleri ve kurulum kolaylıkları nedeniyle birçok alanda uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır (KANTAROĞLU, 2011).

Açık döngü sulama sistemlerinde, sulama işlemi önceden belirlenmiş bir zaman çizelgesine göre gerçekleştirilir. Sulama süresi ve sıklığı sabit bir program doğrultusunda yapılandırıldığından, sistem dış koşullardaki değişkenlikleri algılayamaz ve herhangi bir gerçek zamanlı geri bildirim mekanizması barındırmaz. Bu nedenle, çevresel veriler doğrultusunda adaptasyon yeteneği oldukça sınırlıdır.



Şekil 1.3. Zamana dayalı program döngü kontrol sulama yöntemi (Hamidoğlu, 2023)

Şekil 1.3'te gösterildiği üzere, çiftçiler tarafından yaygın biçimde kullanılan ve belirli saatlerde otomatik olarak devreye giren zamanlayıcı kontrollü fiskiye sistemleri, açık döngü kontrol yapısına tipik bir örnek teşkil etmektedir.

Açık döngü sistemler, belirli bir düzeyde kolaylık ve erişilebilirlik sağlasa da, kontrol edilebilirlik açısından kapalı döngü akıllı sistemlerin gerisinde kalmaktadır. Açık sistemlerde kullanıcı, yalnızca zamanlayıcıya müdahale edebilirken; çevresel koşullar, bitki gereksinimleri ya da anlık iklim değişiklikleri dikkate alınmaz. Dolayısıyla, suyun gereksiz kullanımı veya yetersiz sulama gibi problemler daha sık gözlemlenmektedir.

Buna karşın, kapalı döngü sulama kontrol sistemleri, gerçek zamanlı verileri işleyen sensörler, geri bildirim döngüsü oluşturan yazılım algoritmaları ve yapay zekâ temelli karar destek sistemleriyle donatılmıştır. Bu yapılar, sulama süreçlerini çevresel verilerle uyumlu biçimde yönetebilmekte ve sistemin uyarlanabilirliğini artırarak kaynak kullanımını optimize etmektedir. Gerçek zamanlı toprak nemi, hava sıcaklığı ve bitki fizyolojisi gibi çok sayıda parametreye dayalı olarak çalışan bu sistemler, hem yüksek doğrulukta su yönetimi sağlar hem de mahsul kalitesi ile verimliliği önemli ölçüde artırır.

Toprak nemi, karasal ekosistemin temel bir bileşeni olup, özellikle akıllı tarım uygulamaları kapsamında oldukça kritik bir rol oynamaktadır. Toprak neminin doğru şekilde izlenmesi ve yönetilmesi, sürdürülebilir ve yüksek verimli tarımsal faaliyetlerin gerçekleştirilmesinde büyük önem taşımaktadır. Çünkü su; bitkilerde besin alımı, fotosentez, terleme gibi yaşamsal fizyolojik süreçlerin gerçekleşmesinde temel bir unsurdur. Dolayısıyla toprakta yeterli düzeyde nem bulunması, doğrudan bitki gelişimi üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Nem yetersizliği, bitkilerde su stresine neden olarak verimde düşüşe, ürün kalitesinde bozulmaya ve hatta bazı durumlarda bitki

kaybına yol açabilmektedir (Kanber vd., 2005). Öte yandan, toprakta aşırı nem birikmesi ise su baskınlarına neden olmakta; kök sisteminin sağlıklı gelişimini engellemekte ve patojenlerin üremesi için elverişli ortamlar oluşturarak bitki sağlığını tehdit etmektedir (Kanber vd., 2005).

Akıllı tarım uygulamaları çerçevesinde toprak neminin hassas biçimde izlenmesi ve yönetilmesi, sulama stratejilerinin optimize edilmesi açısından son derece önemlidir. Çiftçiler, tarla içerisinde farklı derinlik ve konumlarda gerçekleştirdikleri toprak nemi ölçümleriyle, bitki ihtiyaçlarına uygun en doğru sulama zamanlamasını ve miktarını belirleyebilmektedir. Bu doğruluk, özellikle damla sulama ve yağmurlama gibi suyu doğrudan kök bölgesine ileten hassas sulama tekniklerinin uygulanmasını mümkün kılarak, suyun verimli kullanımını sağlar (Adeyemi vd., 2017).

Akıllı sulama sistemleri, sulama sürecini otomatikleştirmek ve maksimum verim elde etmek adına, toprak nem verileri ile birlikte hava durumu tahminleri ve bitki türlerine özgü su gereksinimlerini bir arada değerlendirir. Böylelikle su israfının ve sulamaya bağlı enerji maliyetlerinin önemli ölçüde azaltılması sağlanır. Ayrıca, toprak nem düzeylerinin sürekli izlenmesi, sulama sistemlerindeki eşitsiz su dağılımı ya da sızıntı gibi verimsizliklerin erkenden fark edilmesini ve giderilmesini kolaylaştırır (Adeyemi vd., 2017).

Toprak neminin farklı seviyelerde izlendiği alanlarda, sulama uygulamalarına yönelik yapılacak ayarlamalar, suyun sadece ihtiyaç duyulan bölgelere yönlendirilmesini mümkün kılar. Bu yaklaşım, hem toplam su kullanımında tasarruf sağlar hem de mahsul performansını artırır. Öte yandan, toprak nem verileri sadece sulama yönetimi için değil, aynı zamanda gübreleme uygulamalarının etkin biçimde planlanması açısından da önemlidir. Toprak nemi, bitkilerin besin alımı ve besinlerin çözünürlük düzeylerini etkilediğinden, nem koşullarına uygun olarak zamanlanan gübreleme uygulamaları, besin kaybını azaltır, verimi artırır ve çevresel etkileri en aza indirir.

Ayrıca, toprak nem verileri ürün seçimi, dikim zamanı planlaması ve haşere yönetimi gibi tarımsal karar alma süreçlerinde de çiftçiye önemli ölçüde yol gösterir (Tantalaki vd., 2019). Farklı bitki türlerinin ihtiyaç duyduğu nem düzeyleri dikkate alınarak yapılan ürün seçimi, tarlada çimlenme ve gelişme başarısını artırırken, verimlilikte de artış sağlar.

Bu doğrultuda, öngörülü kontrol modeli olarak adlandırılan strateji, gerçek zamanlı veriler, optimizasyon algoritmaları ve matematiksel modellemeler aracılığıyla belirli bir zaman dilimi içinde en verimli sulama kararlarını almayı hedefler (Ding vd.,

2018). Toprak-bitki-atmosfer sisteminin matematiksel modeli üzerinden yapılan analizler sayesinde, yalnızca gerekli olduğunda ve optimum miktarda sulama yapılır. Böylelikle gereksiz sulamaların önüne geçilerek hem kaynak tasarrufu sağlanır hem de tarımsal verimlilik artar (Cáceres vd., 2021).

### **1.3. Kapalı Döngü Sulama Kontrolü**

Kapalı döngü (closed-loop) sulama kontrol modelinin tanımı, temel işleyiş prensipleri ve akıllı sulama sistemlerindeki rolü kapsamlı bir şekilde ele alınmaktadır. Ayrıca, bu kontrol yapısının tarımsal uygulamalardaki avantajları ve sınırlılıkları da teknik açıdan değerlendirilmiştir.

#### **1.3.1. Tanım**

Kapalı döngü sulama kontrolü; çevresel değişkenlere ve bitkisel ihtiyaçlara dinamik olarak yanıt verebilen, geri besleme (feedback) mekanizmasına dayalı bir otomatik sulama sistemidir (Nahar vd., 2019). Bu kontrol yapısında, toprak nemi, hava sıcaklığı, bağıl nem, güneş ışınımı ve bitkinin su tüketim eğilimi gibi çevresel parametreler sürekli olarak sensörler aracılığıyla izlenir ve bu veriler doğrultusunda sulama kararı alınır.

Sistem, gerçek zamanlı veri akışını kullanarak sulama süresini, sıklığını ve uygulanan su miktarını optimize eder. Böylece sulama işlemi sadece ihtiyaç hâsıl olduğunda ve doğru miktarda gerçekleştirilir. Bu yaklaşım sayesinde, hem su kaynaklarının etkin kullanımı sağlanmakta hem de bitki gelişimi için ideal nem koşullarının korunması mümkün olmaktadır.

Kapalı döngü kontrol sistemleri, özellikle toprak-bitki-atmosfer etkileşimlerini göz önünde bulundurarak karar veren yapay zekâ algoritmaları ve tahmine dayalı modelleme yöntemleriyle entegre edilerek daha hassas ve öngörülü bir yapı kazanmaktadır. Bu sayede sulama stratejileri sadece mevcut koşullara değil, aynı zamanda gelecekteki olası durumlara da uyumlu hâle getirilebilir.

#### **1.3.2. Operasyon**

Kapalı döngü sulama kontrolünün işleyişi, gerçek zamanlı veri toplama, analiz, karar verme, otomatik ayarlama ve sürekli geri bildirim süreçlerini içeren çok aşamalı bir sistematik yapıya sahiptir. Bu yapı, çevresel koşullar ve bitki ihtiyaçlarına duyarlı olarak

sulama uygulamalarını dinamik biçimde optimize eder. Aşağıda bu operasyonun temel adımları detaylandırılmıştır:

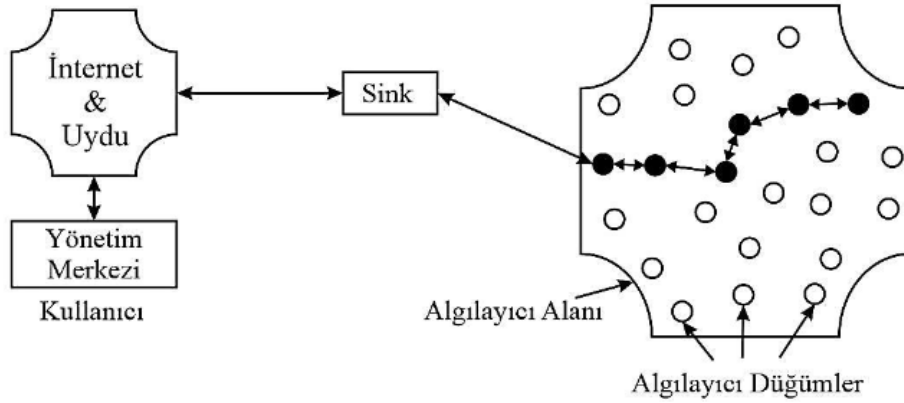
- **Veri Toplama:** Sistem; toprak nemi, hava sıcaklığı, bağıl nem, güneş ışınımı ve bitki büyüme evresi gibi tarımsal parametreleri ölçmek amacıyla araziye entegre edilmiş sensörler aracılığıyla sürekli veri toplar. Bu veriler, sulama kararlarının temeli olarak kullanılır.
- **Veri Analizi:** Elde edilen ham veriler, gelişmiş makine öğrenmesi algoritmaları, bulanık mantık ya da karar destek sistemleri yardımıyla işlenir ve anlamlı bilgiye dönüştürülür. Bu analiz, sulama ihtiyacının ne zaman ve ne miktarda gerçekleşeceğini belirlemek açısından kritik öneme sahiptir.
- **Geri Bildirim Mekanizması:** Analiz edilen veriler, sistemin mevcut durumu hakkında geri bildirim üretir. Toprak nem seviyesi, anlık hava durumu ve mahsulün su ihtiyacı gibi bilgiler sistemin otomatik karar sürecine yön verir.
- **Kontrol ve Uygulama:** Geri bildirim dayalı olarak çalışan kontrol birimi, sulama süresini, sıklığını ve su miktarını otomatik olarak belirler. Böylece yalnızca ihtiyaç duyulan zamanda ve miktarda su uygulaması yapılır (Özcan, 2004).
- **Dinamik Ayarlamalar:** Kapalı döngü sistemi, çevresel değişkenlerdeki anlık değişimlere adaptif şekilde yanıt verebilmek amacıyla sulama parametrelerini (örneğin sulama aralığı, debi ve zamanlama) sürekli olarak yeniden ayarlar.
- **Optimizasyon ve Uyum Sağlama:** Sistem, performans analizlerine ve sensör verilerine dayalı olarak sulama stratejilerini güncelleyerek hem su kullanımını optimize eder hem de değişen çevresel koşullara uyum sağlar .
- **Geri Bildirim Döngüsünün Sürekliliği:** Sulama işleminin ardından, sistem uygulamanın etkisini izleyerek, toprak nem seviyelerindeki değişimi değerlendirir ve bu değerlendirme sonucunda kontrol algoritmalarını yeniden besler. Bu döngü, sistemin kendi kendini iyileştirme kapasitesini oluşturur.
- **İzleme ve Bakım:** Alıcı sensörler ve kontrol üniteleri, sistemin performansını sürekli izler. Olası arızalar, veri tutarsızlıkları veya çevresel sapmalar erkenden tespit edilerek sistemin kararlılığı korunur.

Bu yapı, açık döngü sulama sistemlerinin aksine, çevresel koşullara duyarlı ve uyarlanabilir bir sulama yaklaşımı sunar. Böylece yalnızca su kullanımında tasarruf sağlamakla kalmaz, aynı zamanda bitki sağlığı ve verimlilik üzerinde de olumlu etkiler

yaratır. Bu kontrol mimarisi, özellikle su kıtlığının arttığı günümüz dünyasında sürdürülebilir tarım uygulamaları için stratejik bir çözüm sunmaktadır.

#### 1.4. Kablosuz Sensör Ağları (WSN)

Kablosuz sensör ağları, belirli bir alandaki fiziksel ya da çevresel verileri toplamak amacıyla yerleştirilen, “düğüm” adı verilen birçok küçük ve akıllı cihazdan oluşur. Bu ağlar; sıcaklık, nem, ses, rüzgâr gibi büyüklükleri izler, kaydeder ve merkezi bir noktaya iletir (Al Ameen vd., 2010; Mahalik, 2007). Mikro elektro-mekanik sistemler, dijital elektronik ve kablosuz iletişim alanındaki gelişmeler sayesinde, düşük maliyetli ve az enerji tüketen sensör düğümleri geliştirilmiştir. Bu düğümler çevreden veri toplayabilir, birbirleriyle iletişim kurabilir ve verileri bir çıkış düğüme aktarır. Çıkış düğümü, verileri internet, GSM ya da uydu aracılığıyla kullanıcıya ileten bir ağ geçidi görevi görür (Akyildiz & Vuran, 2010).



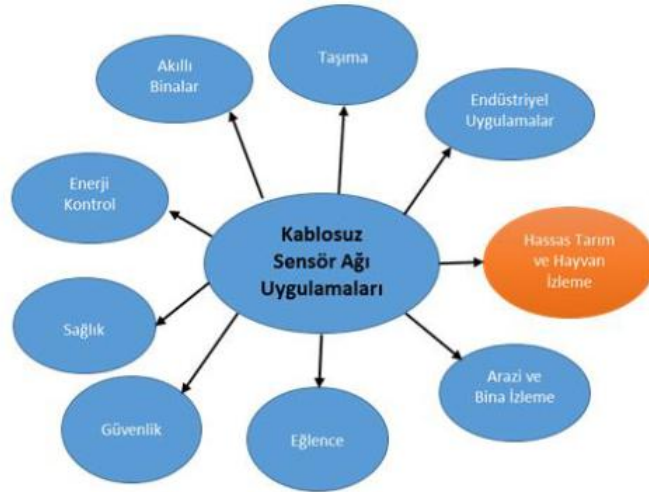
Şekil 1.4. Çalışma alanına dağılmış algılayıcı düğümleri (Akyildiz & Vuran, 2010)

Şekil 1.4’te gösterildiği gibi, kablosuz sensör ağları, belirli bir algılama alanına dağıtılmış çok sayıda algılayıcı düğümden oluşmaktadır. Bu düğümler, çevresel verileri toplamakta ve bu verileri birbirleriyle kablosuz olarak iletterek çıkış düğümü (sink) aracılığıyla merkez sistemle paylaşmaktadır. Sink düğümü, bir ağ geçidi görevi üstlenmekte olup, toplanan verileri internet veya uydu aracılığıyla yönetim merkezine aktarmaktadır. Yönetim merkezi ise kullanıcıya verileri sunmakta ve gerekli durumlarda sistemin uzaktan kontrolüne olanak sağlamaktadır. Bu yapı, dağıtık bir mimariyle veri toplama ve iletimi mümkün kılmakta, aynı zamanda sistemin geniş alanlarda etkin çalışmasını desteklemektedir.

Kablosuz algılayıcı ağların temel amacı, belirli bir çalışma alanının uzaktan izlenmesini sağlamaktır. Son yıllarda algılayıcı düğümlerin hem maliyet hem de boyut

açısından avantajlı hâle gelmesiyle, bu teknolojilerin kullanım alanları önemli ölçüde genişlemiştir (Al Ameen vd., 2010). Uygulama alanlarına şu örnekler verilebilir:

- **Askeri alanlarda:** dost ve düşman birliklerinin takibi, nükleer veya biyolojik saldırıların algılanması,
- **Çevresel izleme:** hava kirliliği, orman yangını, sel ve deprem gibi doğal afetlerin erken tespiti,
- **Sağlık sektörü:** doktor ve hasta konum takibi, tansiyon ve EKG gibi hayati verilerin uzaktan izlenmesi,
- **Trafik sistemleri:** araç hareketlerinin izlenmesi, hız kontrolü, trafik sinyalizasyonunun yönetimi ve yol güvenliğinin artırılması,
- **Endüstriyel uygulamalar:** riskli bölgelerin izlenmesi ve önleyici bakım faaliyetlerinin yönetimi,
- **Tarım sektörü:** meteorolojik verilerin takibi, sulama, gübreleme ve ilaçlama işlemlerinin otomatik yönetimi (Akyildiz & Vuran, 2010; Mahalik, 2007).



Şekil 1.5. KSA uygulama alanları

Kablosuz sensör ağı düğümleri genellikle küçük boyutludur ve donanımsal yetenekleri sınırlıdır. Bu düğümler temel olarak üç ana bileşenden oluşur: işlem birimi, algılama birimi ve iletim birimi. Bu bileşenler arasında en fazla enerji tüketimi iletim birimine aittir (Nayyar, 2013). Her bir sensör düğümünün işlem kapasitesi sınırlı olsa da çok sayıda düğümün birlikte çalışmasıyla fiziksel çevre detaylı şekilde izlenebilir. Bu nedenle, sensör ağları belirli bir görevi gerçekleştirmek üzere birlikte çalışan çok sayıda

düğümün oluşturduğu sistemler olarak tanımlanabilir. Geleneksel ağlardan farklı olarak, sensör ağları yoğun yerleşim ve düğümler arası koordinasyona dayanarak görevlerini yerine getirir (Bharathidasan & Ponduru, 2002).

Geçmişte sensör ağları, az sayıda düğümden oluşur ve tüm verileri merkezi bir işleme istasyonuna iletirdi. Ancak günümüzde, özellikle iletişimin enerji tüketimi açısından en büyük yükü oluşturduğu durumlarda, dağıtık algılama yaklaşımı yaygınlaşmıştır. Merkezi sistemlerde bazı düğümlerin uzak mesafelere veri iletmesi gerektiğinden, enerji harcaması artmaktadır. Bu nedenle, verinin mümkün olduğunca yerelde işlenerek, iletilen toplam veri miktarının azaltıldığı dağıtık mimariler tercih edilmektedir ar içinde bazı algılayıcı düğümler, enerji bakımından diğerlerine göre daha hızlı tükenerek zayıf duruma gelmektedir. Bu düşük enerjili düğümlerin tespit edilerek yönlendirme sürecinde tercih edilmemesi, ağın genel enerji dengesini korumakta ve ağın toplam çalışma süresini önemli ölçüde uzatmaktadır (Bharathidasan & Ponduru, 2002).

### **1.5. Kablosuz Algılayıcı Ağlarda (WSN) Düğüm Konumlandırması**

Günümüzde kablosuz ağ yapılarına duyulan ilgi, teknolojik ilerlemelerle birlikte çok çeşitli ve karmaşık sistem mimarilerinin ortaya çıkmasına yol açmıştır. “Heterojen kablosuz ağlar” kavramı, yazılım ve donanım platformları bakımından farklı özellikler taşıyan, çeşitli türden cihazların birlikte çalışmasını ifade etmektedir. Bu yapılar IoT (Nesnelerin İnterneti), VANET (Vehicular Ad Hoc Networks), HAN (Home Area Networks), mobil robotlar (mBots) ve robotik sensör sistemleri (RS) gibi uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Song vd., 2008; Vikram vd., 2017).

Gelişmiş bir IoT örneği olarak modern ev otomasyon sistemleri, çeşitli elektronik cihazların birbirleriyle haberleşmesini sağlayan yapılarıyla öne çıkmaktadır. Bu cihazlar, genellikle mobil cihazlar üzerinden kontrol edilebilen uygulamalar aracılığıyla haberleşmekte ve çalışmaktadır. Örneğin, Nest firması tarafından geliştirilen akıllı termostat, kullanıcı alışkanlıklarını öğrenebilen ve Wi-Fi üzerinden diğer cihazlarla entegre çalışabilen bir merkez birim olarak tasarlanmıştır. Aynı şirket daha sonra karbon monoksit ve duman dedektörleriyle birlikte birbirine bağlı çalışan kameralar geliştirmiş ve bu sistemi Google’ın sesli komut sistemi olan “Hello Google” ile entegre edilebilir hale getirmiştir (Song vd., 2008). Benzer şekilde, Amazon’un Alexa tabanlı sesli kontrol sistemleri de farklı firmaların ürünleriyle entegre edilerek yaygın kullanım bulmaktadır.

Akıllı ev sistemlerinin yaygınlaşmasının yanı sıra, sağlık takibi ve bireysel kullanıma yönelik akıllı cihazlar da önem kazanmıştır. Elektrikli diş fırçaları, Bipap

makineleri, tansiyon ölçerler ve aktivite izleyiciler gibi cihazlar, mobil uygulamalarla entegre çalışarak hem geriye dönük veriler sunmakta hem de kullanıcı dostu bir deneyim sağlamaktadır. Ön görülen senaryolarda ise, yakın gelecekte yaşlıların ve bakıma muhtaç bireylerin hizmetinde çalışan mobil robotların kullanılmasının yaygınlaşacağı tahmin edilmektedir. Bu robotlar, iğne uygulaması, hijyen kontrolü veya hasta taşıma gibi zorluk derecesi yüksek görevleri yerine getirebilecektir (Kim vd., 2018).

Benzer şekilde, VANET mimarilerinde de haberleşme ve koordinasyon önemli bir rol oynamaktadır. Araçlar arası ve araçlarla altyapı (karayolları, sinyalizasyon vb.) arasında gerçekleşen haberleşme, trafik yönetimi, otonom sürüş koordinasyonu ve kazaların önlenmesi gibi çok sayıda avantaj sağlamaktadır. Ancak bu alanda standartlaşmış bir protokol bulunmamakta ve çalışmalar halen Ar-Ge aşamasında sürmektedir. Araçların kendi aralarında çarpışma riskine karşı senkronize çalışması, yerel ve bütünsel trafik planlaması, acil uyarıların ağ boyunca yayılması gibi fonksiyonlar hedeflenmektedir. Artan sensör yoğunluğu ve yapay zeka entegrasyonu sayesinde, insan müdahalesi en aza indirilecek ve trafik kazaları dramatik ölçüde azaltılacaktır (Huang vd., 2011).

Drone teknolojisi de bu evrimsel gelişimin önemli bir parçası olarak karşımıza çıkmaktadır. Amazon gibi dev firmalar, yoğun şehir içi lojistik faaliyetlerinde drone kullanımını etkinleştirmek için çalışmalar yaparken, kamu güvenliği, askerî harekâtlar, arama-kurtarma ve sınır güvenliği gibi alanlarda da drone teknolojisi entegre edilmektedir. Hedef tespiti, çevre gözetimi, yük taşıma ve gözetleme gibi çok çeşitli senaryolarda kullanılabilen bu cihazlar, görüntü alma, termal izleme ve hatta otonom karar alma kabiliyetlerine sahiptir. Ancak bu teknolojilerin kullanımı, mahremiyet ihlali, kazalar ve suistimal gibi etik sorunları da beraberinde getirmektedir.

Her ne kadar ticarileşmiş ürünler ve yazılımlar piyasada yer alsada da, bu sistemlerin çoğu halen laboratuvar ve prototip aşamasındadır. Öncelikli olarak, bu sistemlerin gerçek dünya senaryolarında nasıl kullanılacağına dair farklı disiplinlerden uzmanlar tarafından kapsamlı analizler gerekmektedir. Kullanıcıların, geliştiricilerin ve sistemin idamesinden sorumlu uzmanların bu teknolojilerin uygulanabilirliği konusunda ortak bilgi ve vizyona sahip olmaları hayati önem taşımaktadır.

## 1.6. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının temel amacı, tarımda su kaynaklarının daha verimli kullanılmasını sağlamak, enerji tüketimini azaltmak ve karar verme süreçlerini gerçek

zamanlı olarak optimize eden bir akıllı sulama sistemi tasarlamaktır. Sistem, kapalı döngü sulama kontrol stratejileri, toprak nemi dinamiklerine dayalı öngörülü algoritmalar, kablosuz sensör ağları (WSN), IoT tabanlı gömülü donanımlar, Firebase destekli bulut altyapısı, mobil uygulama arayüzleri, TDMA (Time Division Multiple Access) iletişim protokolü ve NBIA (Network-Based Intelligent Algorithm) algoritması temel alınarak geliştirilmiştir.

Sistem, toprak nemi, hava sıcaklığı ve bağıl nem gibi çevresel parametreleri sensörler aracılığıyla algılayarak bu verileri düğümler arasında paylaşmakta, veri analizine dayalı sulama kararlarını ise merkezi bir kontrol birimine gerek kalmadan dağıtık bir mimari ile almaktadır. Geliştirilen yapı, çiftçilere mobil uygulama desteği ile sulama faaliyetlerini uzaktan izleme, otomatik ayarlama ve gerçek zamanlı müdahale imkânı sunmaktadır.

Çalışmanın yenilikçi yönlerinden biri, kapalı döngü kontrol modeli ile sulama sisteminin dinamik olarak uyarlanabilir hâle getirilmesidir. Bu yapı, yalnızca çevresel koşullara değil; aynı zamanda mahsul türü, toprak tipi ve mevsimsel değişkenlik gibi faktörlere göre de sulama parametrelerini otomatik olarak optimize edebilmektedir. Ayrıca, Firebase bulut tabanı sayesinde sensör verilerinin güvenli biçimde saklanması, analiz edilmesi ve mobil arayüzlere aktarılması mümkün kılınmıştır.

Tez kapsamında geliştirilen sistem, MATLAB ortamında modellenmiş ve simülasyon testleriyle doğrulanmıştır. Sistem daha sonra fiziksel olarak uygulanarak hem çevrimdışı (offline) hem de çevrimiçi (online) senaryolarda çalışabilirliği test edilmiştir.

Sonuç olarak bu çalışma, tarımsal sulamada yapay zekâ destekli, düşük maliyetli, enerji verimli ve sürdürülebilir bir çözüm sunmayı hedeflemektedir. Aynı zamanda, gelecekteki akıllı tarım uygulamalarına yönelik modüler bir altyapı sağlayarak bilimsel katkı sunması amaçlanmaktadır.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Tarım sektöründe teknolojik gelişmelerin giderek yaygınlaşması ve dijital dönüşüm süreçlerinin hız kazanması, sulama uygulamalarında daha verimli ve sürdürülebilir çözümlere olan ihtiyacı artırmaktadır. Bu bağlamda geliştirilen akıllı sulama sistemleri, su tüketimini azaltmak, sulama faaliyetlerinde insan müdahalesini minimize etmek ve toplam sulama maliyetlerini düşürmek gibi temel hedeflere odaklanmaktadır. Literatürde bu alanda yapılan çalışmalar incelendiğinde, araştırmaların genellikle iki temel yaklaşım üzerinde şekillendiği görülmektedir. Birinci yaklaşım, sistem bileşenleri arasında veri iletişimini sağlayan kablosuz haberleşme teknolojileri ile ilgilidir. İkinci yaklaşım ise akıllı sulama sistemlerinin tasarımı ve geliştirilmesi amacıyla yapay zekâ yöntemlerinin kullanıldığı çalışmaları kapsamaktadır.

### 2.1. Kablosuz Haberleşme Teknolojileri ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Kablosuz Sensör Ağları (WSN), özellikle enerji verimliliği, güvenilir veri iletimi ve hizmet kalitesi (QoS) ihtiyaçlarının ön planda olduğu uygulamalarda, son yıllarda çok sayıda araştırmanın odak noktası haline gelmiştir. Bu bağlamda, ortam erişim kontrolü (MAC) protokollerinin geliştirilmesi, WSN'lerin performansını belirleyen en temel faktörlerden biri olarak değerlendirilmektedir. Sadeq ve arkadaşları (2022), WSN-IoT entegrasyonunun farklı endüstriyel alanlardaki uygulama potansiyelini artırdığına dikkat çekmiş; bu kapsamda MAC protokollerinin enerji tüketimini azaltma, ağ performansını iyileştirme, büyük ölçekli düğüm konuşlandırmalarına uygun ölçeklenebilirlik sağlama ve kümeleme zekâsı gibi niteliklere sahip olması gerektiğini vurgulamıştır. Yaptıkları kapsamlı çalışmada, son yıllarda önerilen MAC protokolleri incelenmiş ve ağ verimliliği, uçtan uca gecikme ile paket kaybı gibi performans kriterlerinin enerji tüketimi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir (Sadeq vd., 2022). Benzer şekilde, Sakib ve arkadaşları (2022) tarafından geliştirilen EQPD-MAC protokolü, özellikle önceliklendirilmiş veri paketleri ve çok sıramalı yönlendirme (multi-hop routing) ihtiyacı bulunan geniş kapsama alanına sahip WSN uygulamalarına yönelik tasarlanmıştır. Çalışmada, sınırlı batarya kapasitesine sahip sensör düğümlerinin enerji tasarruflu çalışmasını sağlamak amacıyla, uyarlanabilir aktif zaman yönetimi ve güçlü bir yönlendirme protokolü ile katmanlar arası bir iletişim yaklaşımı önerilmiştir. EQPD-MAC protokolü, üç farklı QoS destekli MAC protokolü ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve simülasyon sonuçları, enerji tüketiminde %30'a varan azalma ve veri iletim başarımında %23'lük artış elde edildiğini göstermiştir (Sakib vd., 2022).

WSN'lerde küme tabanlı enerji etkin haberleşmeye yönelik bir başka yaklaşım ise Karthick ve arkadaşları (2022) tarafından önerilen Energy-Aware Reliable MAC (EARMAC) protokolüdür. Bu çalışmada, coğrafi alana dayalı olarak oluşturulan kümelerde, lider düğümler aracılığıyla hem iç hem de kümeler arası iletişim sağlanmış; CSMA/CA ve değişken TDMA tekniklerinin avantajlarını birleştiren hibrit bir yöntem uygulanmıştır. Verinin kümeler içinde toplanması, lider düğümlerde birleştirilerek fazlalıkların ortadan kaldırılması ve çok sıçramalı aktarım ile hedefe ulaştırılması süreçleri hem enerji tasarrufu hem de güvenilirlik açısından değerlendirilmiştir. Ayrıca kuyruk eşik değerleri ve öncelik sıralamaları sayesinde veri yoğunluğuna bağlı oluşabilecek tıkanmaların önüne geçilmiştir. EARMAC protokolü hem periyodik hem de olay temelli veri algılama süreçlerinde başarılı sonuçlar elde etmiştir (Karthick, 2023). Diğer taraftan, gerçek zamanlı ve kritik uygulamalar için öncelikli veri iletiminin garanti altına alınması, WSN'lerin kullanım alanını daha da genişletmiştir. Bu doğrultuda Raut ve arkadaşları (2022), acil durum senaryolarında zaman sınırına sahip veri paketlerinin güvenilir biçimde iletimini sağlamak amacıyla MC-MAC (Mission-Critical MAC) protokolünü önermiştir. Söz konusu protokol, adaptif ve öğrenme merkezli bir yaklaşımla çalışmakta; mevcut ağ durumunu dikkate alarak öncelik bazlı kanal erişimi sağlayarak kritik verilerin iletiminde zaman kısıtlarını karşılamaktadır. Gecikme duyarlılığı yüksek olan bu uygulamalarda, MC-MAC protokolünün senaryo bağımlı olarak optimum yolları seçebilmesi, acil verilerin kesintisiz ve güvenilir biçimde hedefe ulaşmasını mümkün kılmaktadır (Raut & Khandait, 2023). Bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, enerji verimliliği, QoS desteği, önceliklendirme mekanizmaları ve küme tabanlı haberleşme yapıları gibi temel unsurların WSN tabanlı MAC protokollerinde ortak olarak ele alındığı görülmektedir. Sadeq ve arkadaşları (Sadeq vd., 2022), teorik çerçeve ve performans kriterleri açısından genel bir perspektif sunarken; Sakib ve arkadaşları (Sakib vd., 2022), uygulamalı bir QoS destekli protokol önerisiyle çoklu öncelik düzeylerini optimize etmiştir. Karthick ve arkadaşları (Karthick, 2023) ise kümeleme temelli hibrit bir yaklaşımı öne çıkararak iletişim güvenilirliğini artırmış; Raut ve arkadaşları (Raut & Khandait, 2023) ise zaman duyarlılığı taşıyan kritik veri iletimine yönelik öğrenmeye dayalı adaptif bir MAC protokolü geliştirmiştir. Bu doğrultuda, enerji etkinliği ve hizmet kalitesi gereksinimlerini aynı çatı altında karşılayabilen MAC protokollerinin geliştirilmesi, WSN'lerin gelecekteki kullanım senaryoları açısından büyük önem taşımaktadır.

Kablosuz Multimedya Sensör Ağları (WMSN – Wireless Multimedia Sensor Networks), son yıllarda IoT teknolojisinin ivme kazanması ve düşük maliyetli sensör donanımlarının yaygınlaşması ile birlikte, multimedya tabanlı veri iletişimine ihtiyaç duyulan uygulamalarda öne çıkmaktadır. Bu ağlar, ses, görüntü ve video gibi yoğun veri içeren çoklu ortam bilgilerini çevreden toplayabilen ve iletebilen kaynak kısıtlı sensör düğümlerinden oluşmaktadır. Ancak geleneksel kablosuz sensör ağlarının sınırlamalarını devralan WMSN yapıları, artan veri hacmi ve çoklu trafik türleri nedeniyle enerji tüketimi, hizmet kalitesi (QoS), gecikme, güvenlik ve bant genişliği yönetimi gibi birçok teknik zorlukla karşı karşıya kalmaktadır. Bu kapsamda, Matheen ve arkadaşları (2022), WMSN mimarisi üzerinde kapsamlı bir inceleme sunarak, sistemin temel yapısı, kullanım alanları ve karşılaşılan zorlukları ele almış; literatürde önerilen çözümleri üç ana başlık altında kategorize etmiştir: veri güvenliği odaklı yöntemler, QoS duyarlı yaklaşımlar ve enerji farkındalıklı algoritmalar. Araştırmacılar, özellikle sınırlı enerji kaynaklarına sahip olan multimedya sensör düğümlerinin hem güvenli hem de verimli çalışabilmesi için katmanlar arası çözümlerin ve öncelik tabanlı iletişim mekanizmalarının gerekliliğini vurgulamıştır. Ayrıca, ağın genel performansını artırmak için QoS destekli kaynak planlamasının ve veri akış kontrolünün temel bileşenler arasında yer alması gerektiğini belirtmişlerdir (Matheen & Sundar, 2022). Benzer şekilde, Chiwariro ve arkadaşları (2022) ise WMSN'ler için geliştirilen QoS duyarlı yönlendirme protokolleri üzerine detaylı bir inceleme gerçekleştirmiştir. Nanoteknoloji tabanlı gelişmiş sensörlerin görüntü, ses ve video gibi heterojen multimedya verilerini toplayabilme yeteneği sayesinde, bu tür ağlarda yoğun ve çeşitli trafik akışları yönetilmek zorundadır. Araştırmacılar, bu karmaşık trafik yapısının mevcut yönlendirme ve erişim kontrol protokollerinde darboğazlara neden olduğunu; özellikle çoklu yol (multipath) yönlendirme algoritmaları ile çok kanallı MAC protokollerinde hâlâ çözülmemiş önemli sorunların bulunduğunu ifade etmişlerdir. Çalışmada ayrıca, bu darboğazların giderilmesi ve ağ performansının artırılması için uygulanabilir çözüm önerileri sunulmuş ve gelecekteki protokol geliştirme çalışmalarına katkı sağlayacak önerilerde bulunulmuştur (Chiwariro & . N, 2022). Her iki çalışma birlikte değerlendirildiğinde, WMSN'lerin karmaşık ve yüksek hacimli veri yapılarında hem hizmet kalitesini sürdürebilen hem de enerji etkinliği sağlayabilen çözümlerin geliştirilmesinin, bu ağların başarılı biçimde uygulanabilmesi için kritik olduğu ortaya konulmaktadır. Bu doğrultuda, hem MAC katmanında hem de yönlendirme düzeyinde geliştirilecek bütüncül, QoS-farkındalıklı

protokoller, WMSN'lerin gelecek nesil akıllı sistemlerde daha yaygın bir biçimde kullanılmasının önünü açacaktır.

Mobil Ad-Hoc Ağlar (MANET) ve Araç Ad-Hoc Ağları (VANET), altyapısız, dinamik ve kendi kendini organize edebilen iletişim yapıları sunmaları sayesinde, özellikle gerçek zamanlı veri iletimi ve hizmet bileşimi gerektiren uygulamalarda büyük önem taşımaktadır. Bu ağların doğası gereği değişken topoloji, düğüm hareketliliği, bağlantı kopmaları ve sınırlı kaynak kullanımı gibi pek çok zorluk bulunmaktadır. Bu kapsamda, QoS (Quality of Service) destekli protokol tasarımları, ağ verimliliğini ve kullanıcı deneyimini artırmak amacıyla yaygın şekilde araştırılmaktadır. Ramalingam ve arkadaşları (2022), hizmet bileşimi süreçlerinde kalite ölçütlerini dikkate alan dinamik ve güvenli bir aracı seçim mekanizması (QoSDSBS – QoS-based Dynamic Secured Broker Selection) geliştirerek, MANET yapıları için enerji verimli ve güvenilir bir yönlendirme çözümü sunmuştur. Araştırmacılar, hizmet bileşimi ihtiyacının doğrultusunda AODV protokolünü kullanarak, gecikme, bant genişliği, bellek kapasitesi ve ağ yükü gibi QoS metrikleri üzerinden ağ performansını analiz etmiş ve önerdikleri mimarinin klasik AODV'ye göre daha düşük ağ yükü ve daha yüksek ölçeklenebilirlik sağladığını ortaya koymuşlardır (Ramalingam vd., 2022). Bu yaklaşımı destekler biçimde, literatürde yer alan çeşitli çalışmalar da MANET ve VANET ağlarında QoS farkındalıklı, çakışma önleyici ve zamanlama odaklı MAC protokollerinin gerekliliğini vurgulamaktadır. Örneğin (Liu vd., 2012), MANET'lerde topolojiye duyarsız çoklu yayın ve yayın zamanlaması sorunlarını ele alarak güvenli ve girişime duyarlı protokollerin önemine dikkat çekerken, (Jabandžić vd., 2021) çalışmasında çok kanallı TDMA tabanlı dinamik slot yönetimi sayesinde MANET'lerde kaynak tahsisini optimize etmeye yönelik bir protokol önermektedir. Benzer şekilde (Yang & Camp, 2013), kablosuz ad-hoc ağlarda çakışma çözümüne yönelik MAC protokol tekniklerini incelemiş ve güvenilir, zamanında veri iletimi için etkin MAC çözümlerinin gerekliliğini vurgulamıştır. VANET bağlamında yapılan çalışmalarda ise, IEEE 802.11p standardının sınırlılıklarını aşmak amacıyla TDMA tabanlı düşük gecikmeli MAC katman çözümleri önermekte, kritik güvenlik mesajlarının çok atlamalı ve çapraz katmanlı stratejilerle güvenilir şekilde iletilmesini hedeflemektedir. (Ma vd., 2020) tarafından sunulan çalışma ise, VANET'lerde zaman yuvası tahsisini topoloji değişimlerine göre dinamikleştirmenin, çakışmaları azaltmak ve uçtan uca güvenli veri iletimi sağlamak açısından ne denli önemli olduğunu ortaya koymaktadır. (Zhao & Cao, 2008), düşük enerji tüketimi sağlayan uyandırma radyosu teknolojilerini değerlendirirken, (Muzakkari vd., 2018) kapsamlı bir

şekilde TDMA temelli MAC protokollerini sınıflandırmakta ve merkezi, dağıtık, çekişmesiz ve hibrit yapıların avantaj ve sınırlılıklarını tartışmaktadır. Özellikle hibrit yapılarla TDMA'nın CSMA veya SDMA gibi tekniklerle birleştirilerek kullanılması, hem zamanlama doğruluğunu artırmakta hem de kanal erişim verimliliğini yükseltmektedir. Bu bağlamda, (Avcil vd., 2016) çok kanallı senkronize TDMA yaklaşımıyla iki sıçramalı komşuluklar düzeyinde çakışmaların önceden öngörülüp önlenebileceğini savunmakta, (Mosavat-Jahromi vd., 2020) ise VANET ortamında kodlanmış öncüllerle desteklenen dağıtık ve uyarlanabilir rezervasyon mekanizması (DARP) ile yayın güvenilirliğini artırmaya yönelik çözümler sunmaktadır. Ayrıca (Xu vd., 2018) çalışması, SD-TDMA temelli uyarlanabilir çok kanallı MAC protokolünün, VANET gibi yüksek hızda değişken ağlar için ideal bir çözüm sunduğunu göstermektedir. (Hadded vd., 2015) ise TDMA temelli MAC protokolleri üzerine yapılan araştırmaları sınıflandırarak bu alandaki açık araştırma sorunlarını ve geliştirilmesi gereken alanları detaylı biçimde ele almaktadır. Tüm bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde hem MANET hem de VANET yapılarında, güvenli, gecikme toleranslı, çakışma önleyici ve QoS destekli MAC protokollerinin geliştirilmesinin kritik önemde olduğu açıktır. Özellikle SD-TDMA gibi zaman bölmeli ve çok kanallı protokollerin hem hizmet kalitesini artırmada hem de dinamik ağ senaryolarında kararlılığı korumada önemli avantajlar sunduğu görülmektedir. Gelecekteki araştırmalar için, bu protokollerin enerji farkındalığı ile birleştirilmesi ve farklı trafik tiplerine göre uyarlanabilir hâle getirilmesi hem akademik hem de pratik uygulamalar açısından büyük bir potansiyel taşımaktadır.

## **2.2. Akıllı Sulama Sistemleri Üzerine Yapılan Çalışmalar**

Son yıllarda, iklim değişikliği ve su kaynaklarının azalması gibi küresel tehditler karşısında tarımda sürdürülebilirliğin sağlanabilmesi amacıyla, yapay zekâ destekli akıllı sulama sistemlerine olan ilgi hızla artmıştır. Bu doğrultuda özellikle bulanık mantık tabanlı sistemler, çevresel değişkenliği esnek bir şekilde yönetebilen karar mekanizmaları sunmaları nedeniyle literatürde yaygın olarak ele alınmaktadır. Poyen ve arkadaşları (Poyen vd., 2020), damla sulama sistemlerinde kullanılmak üzere geliştirdikleri Smart Automatic Irrigation Control (SAIC) sisteminde, bitkinin evapotranspirasyon (ET<sub>o</sub>) değerini hesaplamak amacıyla gerekli çevresel parametreleri izlemekte ve bulanık kurallara dayalı olarak, buharlaşma-kondensasyon dengesine bağlı su kaybını telafi eden otomatik bir sulama karar sistemi önermektedir. Benzer şekilde Alomar ve arkadaşları (Alomar & Alazzam, 2018), ışık yoğunluğu, toprak nemi, hava sıcaklığı ve nem gibi

sensör verilerini Mamdani tipi bulanık denetleyiciye ileten, IoT tabanlı bir akıllı sulama sistemi geliştirmiştir. IEEE 802.15.4 haberleşme protokolüyle desteklenen bu sistem, belirlenen toprak nemi eşik değerine göre su pompasını kontrol ederek başarılı bir şekilde sulama kararı alabilmektedir. Hamouda (Hamouda, 2017) tarafından geliştirilen ve Kablosuz Sensör Ağı (WSN) ile desteklenen Akıllı Sulama Karar Destek Sistemi (SIDS) ise toprak sıcaklığı ve nem gibi tarımsal parametreleri izleyerek, bu değerlerin zamana bağlı değişimini bulanık mantıkla yorumlamakta ve sulama zamanlamasını optimize etmektedir. Bu sistemin sulama süresini hassas biçimde hesaplayarak anlamlı düzeyde su tasarrufu sağladığı deneysel olarak ortaya konmuştur. Diğer yandan Fierro-Chacón ve arkadaşları, fasulye bitkisine özgü bir akıllı sulama sistemi geliştirerek, bu sistemde ETo değerinin yanı sıra güneş radyasyonu, sıcaklık ve nem gibi iklimsel parametreleri bulanık mantıkla analiz eden bir hava durumu tahmin modeli entegre etmiştir. Geliştirilen sistemin hava durumu tahmin doğruluğu %76,92 olarak hesaplanmış ve su tüketiminde %68'e varan bir tasarruf sağladığı gösterilmiştir (Fierro-Chacón & Torres-Tello, 2019). Chaitra ve arkadaşları ise IoT teknolojisini bulanık mantık denetleyiciyle bütünleştirerek, domates üretimi için optimize edilmiş, düşük maliyetli ve enerji tasarruflu bir akıllı sulama sistemi önermiştir. Toprak nemi ve sıcaklık verilerini RF iletişimle Raspberry Pi sunucusuna aktaran sistem, bu verileri bulanık mantık algoritmasıyla işleyerek optimum sulama kararları üretmektedir (Chaitra vd., 2023). Tüm bu çalışmalar değerlendirildiğinde, bulanık mantık temelli akıllı sulama sistemlerinin; çevresel parametrelerdeki belirsizlikleri etkin bir şekilde yorumlayabilmesi, otonom karar mekanizmaları ile insan müdahalesine gerek kalmaksızın sulama zamanlamasını yönetebilmesi ve böylece su ve enerji tasarrufu sağlayarak tarımsal verimliliği artırması açısından güçlü bir potansiyele sahip olduğu görülmektedir. Bu sistemlerin Kablosuz Sensör Ağları ve IoT altyapılarıyla desteklenmesi hem uzaktan izleme hem de gerçek zamanlı kontrol olanaklarını artırmakta, bu sayede kırsal ve altyapıdan yoksun bölgelerde dahi sürdürülebilir sulama uygulamalarının hayata geçirilmesine imkân sunmaktadır.

Yapay zekâ tabanlı sulama sistemleri, çevresel verilerin doğru şekilde analiz edilmesiyle su ve enerji kullanımında yüksek verimlilik sağlayarak tarımsal üretimde sürdürülebilirliğe katkı sunmaktadır. Cruz ve arkadaşları, su deposu izleme, açık sulama ve hazne sulama kontrolü olmak üzere üç ana bileşenden oluşan uzman sistemlerinde; su seviyesi, toprak nemi, sıcaklık ve nem sensörlerinden elde edilen verileri, tek gizli katmanında 20 nöron bulunan ileri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağı (YSA) modeliyle işleyerek, sulama süreçlerini başarıyla yönetmişlerdir (Dela Cruz vd., 2017).

Dursun ve Özden, kiraz ağaçlarının sulama ihtiyacını belirlemek amacıyla, toprak nem verilerini 2 girişli, 6 gizli katmanlı bir YSA modeli ile tahmin etmiş; nem sensörlerinin konumunu ise genetik algoritmayla optimize ederek, günlük enerji ve su tüketiminde %32 oranında tasarruf sağlamışlardır (Dursun & Özden, 2017). Ferreira ve arkadaşları, yalnızca sıcaklık ve sıcaklık ile bağımlı nem verilerine dayalı iki farklı YSA modeli oluşturarak ETo tahmininde bulunmuş, sonuçlar yalnızca sıcaklıkla yapılan tahminin sulama ihtiyacını %19, sıcaklık ve nemle yapılanın ise %8 oranında fazla tahmin ettiğini ortaya koymuştur (Ferreira vd., 2020). Samawi, sıcaklık, nem, rüzgâr hızı ve radyasyon gibi meteorolojik verilere dayalı olarak bir YSA modeli geliştirmiş ve blok zincir ile erişim kontrolü entegre edilmiş güvenli bir IoT tabanlı sulama sisteminde bu modeli kullanarak yaklaşık 0,089 RMSE değeri ile başarılı ETo tahminleri elde etmiş; sistemin doğruluğunu ve güvenliğini birlikte sağlamıştır (Samawi, 2021). Al-Naji ve arkadaşları ise, standart bir RGB kamera ile toprak rengini analiz ederek sulama gereksinimini tahmin eden temassız bir görüş sistemi geliştirmiş; bu sistemde her biri 10 nöron içeren iki gizli katmandan oluşan ileri beslemeli geri yayımlı bir YSA modeli ile tınlı topraklarda yüksek doğrulukta sulama kararları vermeyi başarmışlardır (Al-Naji vd., 2021). Tüm bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, yapay sinir ağlarının farklı veri kaynaklarıyla (sensör verileri, meteorolojik parametreler, görüntü analizi vb.) entegre edilerek sulama sistemlerine uygulanmasının, yalnızca kaynak kullanımında tasarruf sağlamakla kalmadığı, aynı zamanda tarımsal üretimin otomasyonu ve hassas yönetimi açısından da büyük potansiyele sahip olduğu açıkça görülmektedir.

Tarımsal su yönetimi ve sulama sistemlerinin enerji verimliliği açısından optimize edilmesi amacıyla son yıllarda hibrit yapay zekâ algoritmalarına dayalı çözümler geliştirilmiştir. Nekkache ve arkadaşları, güneş ve rüzgâr gibi kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarının yanı sıra su depolama kapasitesi ve yük profili gibi sistem girdilerini dikkate alarak, hibrit bir PV/rüzgâr pompa sisteminin boyutlandırılmasına yönelik bir optimizasyon yöntemi önermiştir (Nekkache vd., 2018). Bu çalışmada Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritması, sistemin güvenilirliğini belirleyen Yük Olasılığı Kaybı (LLP), Güç Kaynağı Olasılığı Kaybı (LPSP) ve toplam sistem maliyeti gibi kriterleri optimize etmek için kullanılmış ve PSO'nun hibrit sistemlerde yüksek başarı sağladığı deneysel olarak ortaya konmuştur (Nekkache vd., 2018). Benzer biçimde Wang ve Guo, PSO ve YSA algoritmalarını birlikte kullanarak tarımsal su dağıtım sistemlerinin modellenmesine yönelik hibrit bir yaklaşım geliştirmiştir (Wang & Guo, 2011). Oluşturulan YSA modelinde her biri 64 nöron içeren iki gizli katman bulunmakta ve

katmanlardaki düğüm sayıları PSO algoritmasıyla optimize edilmiştir; sonuçlar, önerilen modelin geleneksel regresyon yöntemlerine kıyasla daha isabetli ve esnek bir çözüm sunduğunu göstermektedir (Wang & Guo, 2011). Lu ve çalışma arkadaşları ise PSO ile destek vektör makinelerini (SVM) entegre ettikleri bir hibrit PSO-SVM modeli tasarlamış ve bu modelin tarımsal su tüketimi tahmininde yüksek doğruluk sağladığını ortaya koymuştur (Lu vd., 2009). PSO algoritması bu çalışmada SVM'in eğitim parametrelerini optimize etmek amacıyla kullanılmış ve elde edilen sonuçlar, söz konusu hibrit yaklaşımın geleneksel yöntemlere göre daha başarılı ve güvenilir tahminler sunduğunu göstermiştir (Lu vd., 2009). Bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, PSO'nun hem yapay sinir ağları hem de destek vektör makineleri gibi öğrenme algoritmalarıyla hibritleştirilerek tarımsal sistemlerin enerji ve su yönetimi açısından yüksek doğruluk ve verimlilikle optimize edilebildiği açıkça görülmektedir.

Yapılan çalışmalarda yapay zekâ tekniklerinin akıllı sulama sistemlerinde başarılı sonuçlar verdiği açıkça ortaya konmakla birlikte, bu çalışmaların önemli bir kısmı hâlen teorik düzeyde ya da simülasyon ortamında gerçekleştirilmektedir. Ancak her mühendislik alanında olduğu gibi tarımsal sulama uygulamalarında da optimum değerlerin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır (Bülbül & Öztürk, 2022). Elde edilen bu optimum değerler, doğrudan sulamada kullanılan su miktarını, tüketilen enerjiyi ve toplam işletme maliyetini etkileyerek sistemin genel verimliliğini belirlemektedir. Bu nedenle, sulama işleminin doğru biçimde gerçekleştirilmesi için hassas ve çevresel koşullara duyarlı sulama programlarının oluşturulması gerekmektedir. Ayrıca farklı yapay zekâ tekniklerinin hibrit biçimde entegre edilmesi hem karar doğruluğunu artırmakta hem de sistemlerin çevresel değişkenliklere karşı daha esnek ve verimli hale gelmesini sağlamaktadır.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, geliştirilen akıllı sulama sisteminin donanımsal bileşenleri, yazılım altyapısı ve simülasyon ortamı ayrıntılı şekilde açıklanmıştır. Kullanılan sensörler, mikrodenetleyici yapısı, kablosuz iletişim teknolojisi, veri işleme süreci ve karar mekanizmaları sistematik olarak sunulmuş; ayrıca MATLAB ortamında gerçekleştirilen haberleşme simülasyonuna dair yöntemsel bilgiler verilmiştir.

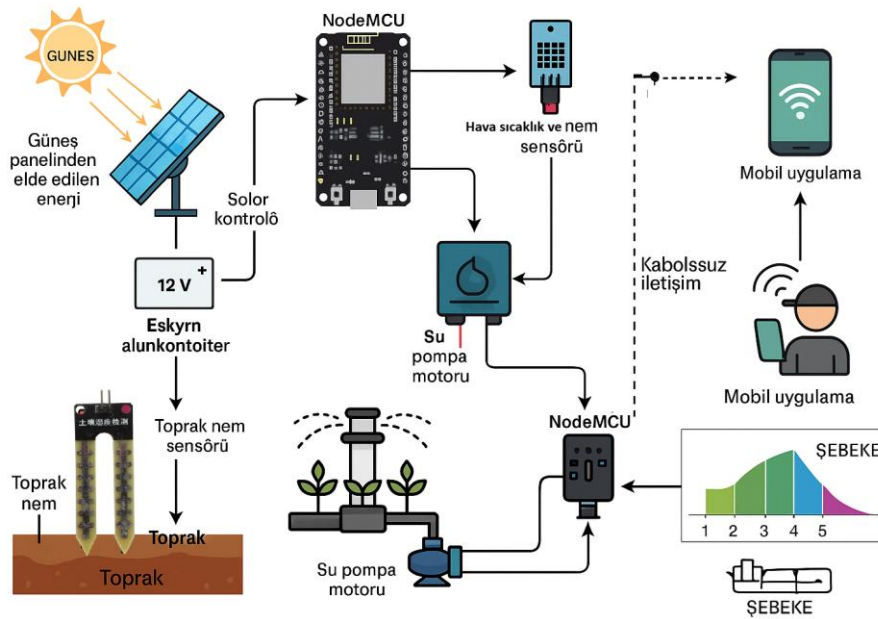
#### 3.1. Akıllı Sulama Sisteminin Genel Mimari Yapısı

Bu çalışmada geliştirilen akıllı sulama sistemi, düşük enerji tüketimi, kablosuz iletişim yeteneği ve sensörlerle donatılmış modüler yapısıyla hem yerel hem de uzaktan erişim imkânı sunan bir otomasyon sistemidir. Sistemin temel bileşenleri arasında ESP32 mikrodenetleyicisi, toprak nem sensörü (HL-69), hava sıcaklık ve nem sensörü (DHT11), su pompası, mobil uygulama arayüzü ve enerji beslemesi için kullanılan güneş paneli yer almaktadır.

ESP32 hem kontrol birimi hem de WiFi bağlantı modülü olarak görev yaparak, sensörlerden alınan verileri değerlendirir ve gerektiğinde sulama işlemini başlatır. HL-69 toprak nem sensörü, analog çıkış üretir ve toprakta mevcut olan nem miktarını ölçerek bu bilgiyi ESP32'ye iletir. Aynı zamanda, ortam sıcaklığı ve bağıl nem değeri DHT11 sensörü ile ölçülür ve sulama karar sürecine dahil edilir. Bu sensörlerin sağladığı veriler, algoritmik olarak işlenerek su pompasının aktif olup olmayacağına karar verilir (Pramanik vd., 2022).

Geliştirilen sistemin en dikkat çekici özelliklerinden biri, birden fazla ESP32 biriminin birbirleriyle kablosuz olarak haberleşebilmesidir. Bu düğümler (nodes), ağ yapısında veri alışverişi yaparak sulama kararlarını dağıtık şekilde almaktadır. Böylece merkezi bir kontrol birimine ihtiyaç duyulmadan sensörler arası koordinasyon sağlanmakta ve su kaynakları daha verimli kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, NBIA (Network-Based Intelligent Algorithm) benzeri dağıtık karar verme yapılarından esinlenilerek geliştirilmiştir (Hashmi vd., 2010).

Enerji verimliliği açısından sistem, güneş paneli destekli bir yapı ile beslenmektedir. 5V'luk sinyal ESP32 ve sensör modüllerine doğrudan aktarılmaktadır. Bu sayede sistem, kırsal alanlarda dahi harici enerji kaynağına ihtiyaç duymadan çalıştırılabilir. Ayrıca, mobil uygulama arayüzü sayesinde çiftçi, sistemin verilerini uzaktan görüntüleyebilir ve gerektiğinde manuel kontrol gerçekleştirebilir (Khanna & Kaur, 2020a).



Şekil 3.1. Geliştirilen akıllı sulama sisteminin genel mimari yapısı

Sistemin genel mimari yapısı Şekil 3.1’de sunulmuştur. Şekil, sensörlerden elde edilen verilerin kablosuz olarak işlenmesi, pompa kontrolü, veri iletimi ve güneş enerjisi destekli besleme döngüsünü kapsamlı şekilde göstermektedir.

Bu sistem yapısıyla hem gerçek zamanlı sulama kontrolü hem de çevresel değişkenlere karşı adaptif bir sulama algoritması oluşturulması hedeflenmiş; sürdürülebilir, enerji verimli ve düşük maliyetli bir çözüm ortaya konulmuştur.

### 3.1.1. ESP32'nin Genel Özellikleri

ESP32, Espressif Systems tarafından geliştirilen ve çok çeşitli IoT (Nesnelerin İnterneti) uygulamaları için tasarlanmış, entegre Wi-Fi ve Bluetooth desteğine sahip, yüksek performanslı bir mikrodenetleyici platformudur. Açık kaynak geliştirme kartları sayesinde hem donanımsal hem de yazılımsal olarak kolayca programlanabilir ve özelleştirilebilir (Parihar, 2019).

ESP32, önceki nesil olan ESP8266'ya göre çok daha fazla GPIO pinine, çift çekirdekli işlemci mimarisine, artırılmış bellek kapasitesine ve Bluetooth (BLE + Classic) desteğine sahiptir. Bu sayede, daha karmaşık ve çoklu bağlantılı uygulamalar için ideal bir yapı sunmaktadır.

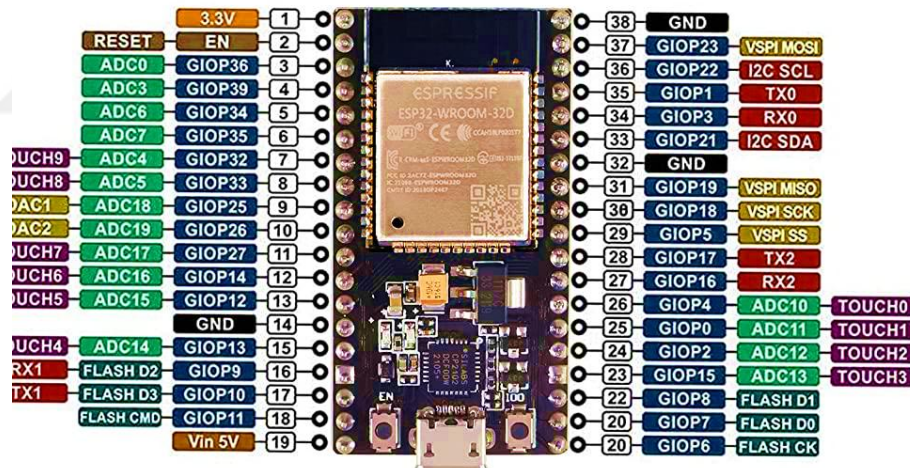
ESP32 geliştirme kartları piyasada DOIT, Lolin, Wemos, ESP32 ve benzeri markalar tarafından farklı form faktörlerinde sunulmaktadır. Kartlar üzerinde yer alan

ESP32 çipi, SPIFFS ve LittleFS gibi dosya sistemlerini destekler ve bu sayede gömülü sistemlerde küçük dosyaların saklanması ve yönetilmesini kolaylaştırır (Özcan, 2004).

ESP32'nin başlıca avantajları şunlardır:

- **Dahili Wi-Fi ve Bluetooth desteği** ile kablosuz haberleşme altyapısı sunar.
- **Çift çekirdekli işlemci** sayesinde çoklu görevleri verimli şekilde gerçekleştirebilir.
- **Daha fazla GPIO pini** sayesinde aynı anda çok sayıda sensör ve aktüatör bağlantısı yapılabilir.
- **ADC, DAC, PWM, UART, SPI, I2C** gibi çeşitli çevre birimlerini destekler.
- **Arduino IDE, PlatformIO, MicroPython** gibi popüler geliştirme ortamları ile kolayca programlanabilir.
- **Düşük güç tüketimi** modları sayesinde pil ile uzun süreli çalışma sağlar.

Bu özellikleriyle ESP32; akıllı sulama, ev otomasyonu, endüstriyel otomasyon, enerji izleme, uzaktan veri toplama gibi birçok IoT uygulamasında yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.2. ESP32 Geliştirme Kartı Pin Yapısı

Aşağıda Şekil 3.2'de gösterilen ESP32 pin diyagramı verilmiştir. Diyagramda, analog giriş/çıkış (ADC/DAC), dijital giriş/çıkış (GPIO), UART, I2C, SPI, PWM, güç ve diğer fonksiyon pinlerinin yerleri detaylı olarak gösterilmektedir. Bu yapı sayesinde; farklı sensör ve modüller ile bağlantı kurmak, veri toplamak ve kontrol işlemleri gerçekleştirmek oldukça kolaylaşmaktadır.

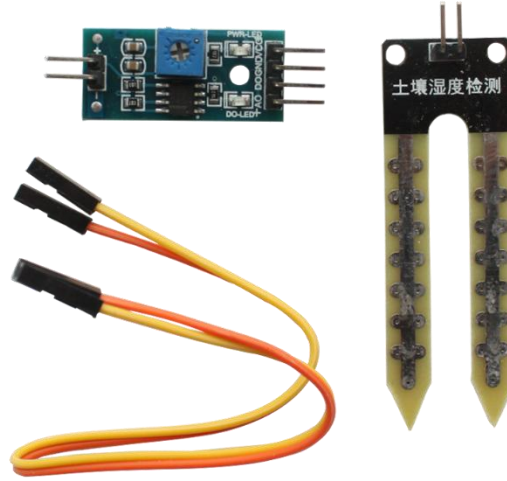
**Çizelge 3.1. ESP32 Geliştirme Kartının Temel Teknik Özellikleri**

<b>Özellik</b>	<b>Değer / Açıklama</b>
Wi-Fi Modülü	802.11 b/g/n Wi-Fi (dahili), TCP/IP protokolü desteği
Bluetooth	Bluetooth v4.2 BR/EDR ve BLE (Low Energy) desteği
Çalışma Gerilimi	3.3 V
Giriş Gerilimi (USB/Vin)	5 V (USB üzerinden beslenir)
GPIO Pin Sayısı	30 adede kadar çok amaçlı dijital I/O pini
Analog Giriş (ADC)	18 adede kadar, 12-bit çözünürlük
Analog Çıkış (DAC)	2 adet, 8-bit çözünürlük
PWM Desteği	Var, çok sayıda pin üzerinden PWM sinyali üretilebilir
UART/SPI/I2C	Mevcut, çoklu seri haberleşme arayüzleri
İşlemci	Çift çekirdekli, 32-bit Xtensa® LX6, 160/240 MHz
RAM / Flash	520 KB SRAM, harici olarak genellikle 4MB Flash
Geliştirme Ortamı	Arduino IDE, PlatformIO, MicroPython, Espressif IDF
Öne Çıkan Avantajlar	Çoklu haberleşme, yüksek işlem gücü, zengin çevre birimi, enerji verimliliği

Çizelge 3.1’de, bu çalışmada kullanılan ESP32 geliştirme kartının temel teknik özellikleri özetlenmiştir. ESP32, artırılmış pin kapasitesi ve entegre kablosuz bağlantı seçenekleri sayesinde hem gömülü sistemlerde hem de IoT tabanlı akıllı sulama gibi uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Analog girişler (ADC pinleri) toprak nem sensörünün ölçüm verilerini almak için kullanılırken; dijital giriş/çıkış pinleri (GPIO) su pompası motorunun kontrolü ve sıcaklık-nem sensörlerinin veri aktarımı için kullanılmaktadır. PWM desteği ise motor hız kontrolü ve aktüatör uygulamalarında önemli avantajlar sunmaktadır. ESP32 modülü sayesinde sistem, kablosuz olarak veri alışverişi yapabilir ve uzaktan izleme/otomasyon sağlayabilir.

### 3.1.2. HL-69 Toprak Nem Sensörü

HL-69 toprak nem sensörü, toprağın nem seviyesini ölçmek için kullanılan düşük maliyetli bir direnç tabanlı sensördür. Sensör, iki parçadan oluşur: toprağa yerleştirilen iki metal problu algılama ünitesi ve sinyal işleme modülü. Topraktaki nem arttıkça iletkenlik artar ve sensör çıkış voltajı düşer; toprak kurudukça iletkenlik azalır ve çıkış voltajı yükselir. Sensör, analog ve dijital çıkışlar sunar; analog çıkış, 0 ile 1023 arasında değişen değerler üretirken, dijital çıkış, belirli bir nem eşiği aşıldığında HIGH veya LOW sinyali verir. Dijital çıkışın hassasiyeti, modül üzerindeki potansiyometre ile ayarlanabilir.



Şekil 3.3. HL-69 Toprak nem sensörü

Şekil 3.3'te gösterilen HL-69 sensörü, 3.3V ile 5V arasında bir çalışma gerilimi gerektirir ve genellikle Arduino veya ESP32 gibi mikrodenetleyicilerle kullanılır. Sensörün probları, toprağa dikey olarak yerleştirilmelidir ve uzun süreli kullanımlarda problemlerin korozyonunu önlemek için sensörün sadece ölçüm sırasında enerji verilmesi önerilir.

Çizelge 3.2. HL-69 Toprak nem sensörünün temel teknik özellikleri

Özellik	Değer / Açıklama
Model	HL-69
Çalışma Gerilimi	3.3V – 5V
Çıkış Türü	Analog (0–1023) ve Dijital (HIGH/LOW)
Problar	Nikel kaplamalı, 2.54 mm aralıklı, 20x60x1.6 mm boyutlarında
Hassasiyet Ayarı	Potansiyometre ile dijital çıkış eşiği ayarlanabilir
Kullanım Alanları	Akıllı sulama sistemleri, bitki izleme, hobi projeleri

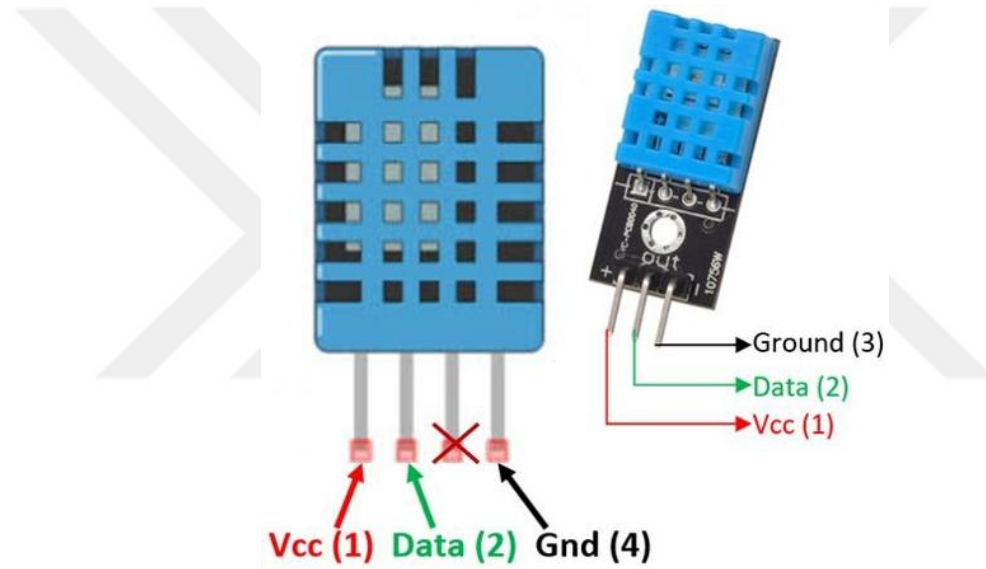
Çizelge 3.2, HL-69 toprak nem sensörünün temel teknik özelliklerini özetlemektedir. Sensör hem analog hem de dijital çıkışlar sunarak çeşitli uygulamalarda esneklik sağlar. Nikel kaplamalı problemler, toprakla temas ederek nem seviyesini ölçer. Potansiyometre ile dijital çıkışın hassasiyeti ayarlanabilir, bu da farklı toprak türleri ve bitki ihtiyaçlarına göre özelleştirme imkanı sunar.

Bu sensör, düşük maliyeti ve kolay entegrasyonu sayesinde akıllı sulama sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, problemlerin korozyonunu önlemek için sensörün sadece ölçüm sırasında enerji verilmesi ve uzun süreli toprakta bırakılmaması önerilir.

### 3.1.3. DHT11 Sıcaklık ve Nem Sensörü

DHT11, dijital çıkış veren ve ortam sıcaklığı ile bağıl nemi ölçmekte kullanılan düşük maliyetli bir sensördür. Bu sensör, özellikle gömülü sistemlerde, otomatik çevre izleme ve akıllı sulama sistemleri gibi IoT uygulamalarında yaygın şekilde tercih edilmektedir. DHT11, içinde entegre bir NTC sıcaklık sensörü ve kapasitif nem algılayıcı bulundurur. Bu iki parametreyi ölçerek, dijital olarak mikrodenetleyicilere aktarır (Üçgün & Kaplan, 2017).

Sensör, 3.3V – 5.5V arasında çalışabilir ve tek dijital veri hattı üzerinden sıcaklık ve nem verilerini iletir. DHT11, düşük güç tüketimiyle öne çıkar ve saniyede bir veri güncelleme kapasitesine sahiptir. Bu özellikleri sayesinde, özellikle enerji kısıtlı kablosuz sistemlerde kullanımı uygundur.



Şekil 3.4. DHT11 sıcaklık ve nem sensörünün pin yapısı

Şekil 3.4'te gösterilen yapıda, DHT11 sensörünün temel iç yapısı ve veri iletişim prensibi özetlenmiştir. Sensör içerisinde yer alan sıcaklık ve nem algılayıcı bileşenler, dış ortamdan alınan fiziksel büyüklükleri dijital sinyallere dönüştürerek ESP32 gibi mikrodenetleyicilere aktarmaktadır. Tek veri pinine sahip çıkış hattı sayesinde, haberleşme hem sade hem de kararlı bir şekilde gerçekleştirilir.

Sensör, sıcaklık ve bağıl nem verilerini dijital olarak mikrodenetleyiciye ileten bir çıkış pinine sahiptir. İç yapısında bulunan NTC sıcaklık sensörü ve kapasitif nem algılayıcısı, ölçümleri sürekli güncelleyerek güvenilir veri sağlar (Üçgün & Kaplan, 2017).

### 3.1.4. Su Pompası ve MOSFET Kontrollü Sürücü Devresi

Akıllı sulama sisteminde sulama işleminin otomasyonu için kullanılan en önemli bileşenlerden biri su pompasıdır. Sistemde, düşük güçlü bir DC mini su pompası, bitkinin yalnızca ihtiyaç duyduğu anda sulanmasını sağlamak üzere mikrodenetleyici tabanlı bir kontrol mekanizması ile çalıştırılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında su pompasının kontrolü, yaygın olarak kullanılan röle modülleri yerine N-kanal MOSFET ile gerçekleştirilmiştir. MOSFET'ler, hızlı anahtarlama kabiliyetleri, düşük güç kayıpları ve uzun ömürlü yapıları sayesinde gömülü sistem tabanlı uygulamalarda tercih edilmektedir (Uluğ & Bingöl, 2017).

Sistemde kullanılan P-kanal MOSFET, pompa motorunun pozitif güç hattına seri olarak bağlanmıştır. ESP32'dan gelen dijital çıkış sinyali, MOSFET'in gate ucuna bağlanarak iletim durumuna geçirilmekte, böylece pompa motoruna enerji verilmesi sağlanmaktadır. Toprak nem sensörü tarafından algılanan veriler analiz edildikten sonra, nem oranı önceden tanımlı eşik seviyesinin altına düşerse ESP32, MOSFET'in gate ucuna düşük lojik seviyede sinyal gönderir ve pompa motoru çalışır hâle gelir. Nem değeri yeterli seviyeye ulaştığında ise çıkış pini tekrar yüksek lojik seviyeye çekilerek MOSFET kapatılır ve pompa devreden çıkarılır.

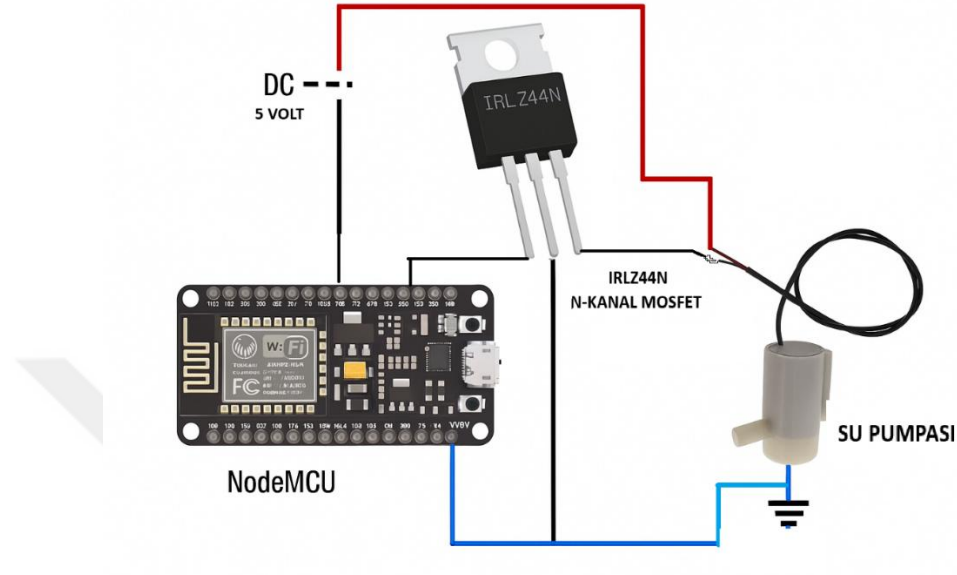
Bu yapı, röle kullanımına kıyasla daha hızlı tepki süresi, sessiz çalışma ve daha az enerji tüketimi gibi avantajlar sunmaktadır. Aynı zamanda MOSFET, doğrudan mikrodenetleyici ile kontrol edilebildiği için ara devre ihtiyacını da ortadan kaldırmaktadır (Uluğ & Bingöl, 2017).



Şekil 3.5. Mini tip DC su pompasının fiziksel boyutları

Şekil 3.5'te, sistemde kullanılan mini tip DC su pompasının dış boyutları milimetre cinsinden gösterilmektedir. Pompa, 5V gerilimle çalışmakta olup düşük güç

tüketimiyle küçük ölçekli sulama uygulamalarında ideal bir çözümdür. Kompakt tasarımı sayesinde hem dar alanlara kolayca entegre edilebilir hem de taşınabilir sistemlerde kullanılabilir. Bu pompa, ESP32 tarafından MOSFET üzerinden kontrol edilerek toprak nem seviyesine göre otomatik olarak devreye girer veya devreden çıkar.



Şekil 3.6. ESP32 ile IRLZ44N N-kanal mosfet kullanılarak su pompasının kontrol edilmesi

Şekil 3.6'da, IRLZ44N N-kanal MOSFET elemanı kullanılarak ESP32 mikrodenetleyicisi üzerinden bir DC su pompasının kontrol edilme yapısı gösterilmiştir. Bu bağlantıda, MOSFET'in gate (G) bacağına ESP32'nun dijital çıkış pinlerinden biri bağlanmıştır. Drain (D) bacağı su pompasının negatif (toprak) hattına, source (S) bacağı ise sistemin genel toprak hattına bağlanmıştır. DC 5V güç kaynağı, su pompasının pozitif terminaline doğrudan bağlanmış, böylece MOSFET tetiklendiğinde su pompası aktif hale gelmektedir. Bu yapı, röle kullanılmadan hızlı, sessiz ve düşük güç tüketimli bir anahtarlama çözümü sunmaktadır. IRLZ44N, düşük gate voltajında etkin çalışabilen bir MOSFET olduğu için 3.3V lojik seviyelerinde çalışan ESP32 ile doğrudan uyumludur.

### 3.1.5. Güneş Enerjili Güç Besleme Sistemi

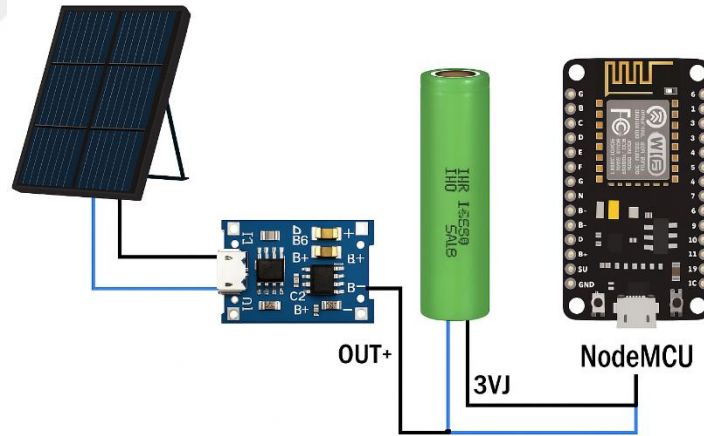
Akıllı sulama sistemlerinde sürdürülebilirlik ve enerji bağımsızlığı sağlamak amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, sistemin enerji ihtiyacını karşılamak için güneş enerjisi destekli bir güç besleme yapısı tasarlanmış ve uygulanmıştır. Sistem, ESP32 mikrodenetleyici kartı,

sensörler ve su pompasının enerji gereksinimini, güneş paneli üzerinden sağlanan enerji ile karşılamaktadır.

Güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi için 6V çıkış gerilimine sahip küçük ölçekli bir fotovoltaik panel kullanılmıştır. Güneş panelinden elde edilen enerji, TP4056 entegresi içeren bir solar şarj kontrol modülü üzerinden, 3.7V nominal gerilimli 18650 tip lityum iyon bataryaya aktarılmakta ve burada depolanmaktadır. Şarj modülünün “OUT+” ve “OUT-” çıkışları doğrudan ESP32’nun VIN ve GND pinlerine bağlanarak mikrodenetleyicinin stabil ve sürekli enerji ile çalışması sağlanmaktadır.

Bu yapı sayesinde, sistem hem gündüz güneş enerjisiyle çalışmakta hem de gece veya bulutlu günlerde batarya üzerinden beslenerek kesintisiz bir çalışma performansı sunmaktadır. Enerji dönüşümünde verimliliği artırmak adına sistemde regülasyon ihtiyacı minimum seviyede tutulmuş, TP4056 modülünün şarj ve koruma özelliklerinden yararlanılmıştır.

Bu tür bir enerji besleme mimarisi, özellikle kırsal ve altyapı erişimi sınırlı bölgelerde akıllı tarım uygulamalarında önemli avantajlar sunmaktadır. Aynı zamanda, karbon salınımını azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır.



Şekil 3.7. Güneş enerjisi ile çalışan bu güç besleme sisteminin genel yapısı

Şekil 3.7'de bir güneş panelinden elde edilen enerjinin TP4056 şarj kontrol modülü üzerinden 18650 tip lityum iyon bataryaya aktarımı ve buradan ESP32'ya yönlendirilmesi şematik olarak gösterilmektedir. Bu yapı, sistemin hem gündüz hem de gece kesintisiz olarak çalışmasına imkân tanımaktadır.

### 3.2. Haberleşme ve Algoritma Yapısı

Bu bölümde, önerilen akıllı sulama sisteminde kablosuz sensör ağı (WSN) ile düğümler arası iletişim ve zamanlamayı yöneten haberleşme protokolü ile uygulanan karar algoritması açıklanacaktır. Sistemin omurgasını, ESP8266 tabanlı ESP32 modülleri oluşturmakta olup, her bir modül ağ üzerinde birer düğüm olarak görev yapmaktadır. Bu düğümler, toprak nemi ve hava durumu gibi çevresel verileri toplamakta ve aralarındaki eşgüdüm ile sulama kararlarını vermektedir.

### 3.2.1. Haberleşme Altyapısı

Akıllı sulama sisteminin temelini oluşturan haberleşme altyapısı, kablosuz sensör ağı (WSN) mimarisi çerçevesinde ESP32 modülleri arasında gerçekleştirilen veri iletimine dayanmaktadır. Sistemde kullanılan ESP32'lar, hem veri toplayıcı (sensör düğümü) hem de karar verici düğümler olarak yapılandırılmış olup, aralarında Wi-Fi üzerinden ad-hoc tarzda organize edilmiş bir ağ oluşturmaktadır.

Bu düğümler arası haberleşme, zaman bölmeli çoklu erişim protokolü olan TDMA (Time Division Multiple Access) esas alınarak gerçekleştirilmiştir. TDMA protokolü, her düğüme belirli zaman dilimlerinde veri iletimi yapma hakkı tanıyarak, iletişim çakışmalarını engeller ve enerji verimliliğini artırır. Özellikle sınırlı enerji kaynağına sahip olan düğümler için bu yapı, düşük güç tüketimi ile maksimum performans elde edilmesine olanak sağlar.

TDMA protokolünün uygulanabilirliğini artırmak ve dinamik ağ koşullarında çakışmasız zaman slotu tahsisi sağlamak amacıyla sistemde NbIA (Neighbours' Beacon-based Indirect Acknowledgement) algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma, her düğümün komşu düğümlerden aldığı beacon mesajları doğrultusunda ağ topolojisini öğrenmesini ve uygun bir zaman slotu seçmesini sağlar. Ayrıca, dolaylı onay (indirect ACK) yöntemiyle iletilen verinin başarılı bir şekilde alınıp alınmadığını doğrulamak için ek iletişim yükü oluşturmadan geri bildirim alınmasına imkân tanır.

NbIA algoritmasında her düğüm, çevresindeki 1-atlamalı (1-hop) ve 2-atlamalı (2-hop) komşularından gelen Beacon Occupancy Vector (BOV) bilgilerini analiz eder. Bu bilgi, komşu düğümlerin hangi zaman dilimlerini kullandığını içerdiğinden, her düğüm kendisine çakışmasız bir slot seçerek ağı dinamik biçimde organize eder. Bu süreçte herhangi bir merkezi kontrol birimine ihtiyaç duyulmaz, böylece sistem tamamen dağıtık ve otonom çalışabilir hale gelir.

Veri iletim süreci şu şekilde özetlenebilir:

- Her düğüm kendi zaman slotunda sensör verilerini iletir.

- Komşular bu iletimi beacon mesajlarında bildirerek dolaylı olarak onaylar.
- Eğer çakışma veya doğrulanmamış iletim tespit edilirse, düğüm yeni bir slot seçimi yapar.
- Bu yapı, ağın yüksek kararlılık ve çakışmasız iletişim ile çalışmasını sağlar.

Bu iletişim altyapısı sayesinde, sistemin düğümleri birbirleriyle doğrudan veya dolaylı olarak iletişim kurarak merkezi bir sunucuya ihtiyaç duymadan kooperatif karar verme süreci yürütürler. Özellikle internet bağlantısının sınırlı olduğu kırsal bölgelerde bu yapı, sulama sisteminin çevrimdışı modda da çalışmasını mümkün kılarak yüksek düzeyde dayanıklılık ve bağımsızlık sunar.

### **3.2.2. Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Enerji Tüketim Kaynakları**

Kablosuz algılayıcı ağlarda karşılaşılan en önemli sınırlamalardan biri, enerji tüketimidir. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için, enerjinin hangi bileşenlerde yoğun olarak harcandığının ve nerelerde gereksiz tüketim meydana geldiğinin doğru biçimde belirlenmesi gerekmektedir (Demirkol vd., 2006).

#### **3.2.2.1. Veri İletimi**

Algılayıcı düğümlerin (AD) topladıkları verileri iletmesi veya yönlendirme amacıyla başka düğümlere aktarması, önemli ölçüde enerji tüketimine neden olmaktadır. Yapılan araştırmalar, yalnızca 1 bitlik bir verinin bir noktadan başka bir noktaya iletilmesinin, yaklaşık 1000 mikro işlem yürütülmesine eşdeğer miktarda enerji harcadığını ortaya koymaktadır. Bu nedenle, veri sıkıştırma tekniklerinin kullanılması veya iletim öncesinde paketlerin birleştirilmesi, enerji tüketimini azaltmak açısından etkili bir yöntem olarak değerlendirilmektedir.

#### **3.2.2.2. Yönlendirme**

Kablosuz algılayıcı ağlarda yönlendirme işlemi genellikle verilerin çıkış düğümüne (sink) en kısa yoldan ulaşmasını sağlamak amacıyla, bu düğüme yakın konumdaki algılayıcı düğümler üzerinden gerçekleştirilir. Bu durum, çıkış düğümüne yakın konumlanan düğümlerin yalnızca kendi verilerini değil, aynı zamanda diğer düğümlerin ilettiği paketleri de aktarmasını gerektirir. Sonuç olarak, bu düğümlerdeki enerji tüketimi, ağın diğer bölgelerinde bulunan düğümlere kıyasla daha yüksek olmaktadır.

### 3.2.2.3. Çarpışma (Collision)

Kablosuz algılayıcı ağlarda ortak iletişim kanalı üzerinden haberleşen düğümlerin sayısı arttıkça, özellikle komşu düğüm sayısının fazla olduğu bölgelerde veri çarpışması olasılığı da yükselmektedir. Bu çarpışmalar, paketlerin yeniden iletilmesini gerektirdiğinden enerji tüketimini önemli ölçüde artırmaktadır. Bazı düğümlerin belirli yolları kullanmasının sınırlandırılması veya alternatif rotaların tanımlanması, çarpışma olasılığını azaltarak enerji verimliliğine katkı sağlayabilir.

### 3.2.2.4. Dinleme

Algılayıcı düğümler (AD), veri iletimi gerçekleştirmedikleri zamanlarda genellikle uyku veya dinleme moduna geçmektedir. Uyku modunda enerji tüketimi oldukça düşük seviyededir; ancak dinleme modunda, düğüm herhangi bir veri iletimi yapmıyor olsa bile, neredeyse iletim yapar kadar enerji harcamaktadır. Bu nedenle, uzun süreli dinleme durumları ağ genelinde enerji verimliliğini olumsuz etkileyebilmektedir.

### 3.2.2.5. Hata Oranı

Veri iletimi sırasında meydana gelen iletim hataları, paketlerin yeniden gönderilmesini gerektirmektedir. Bu tekrar iletim işlemleri, ağın genel enerji tüketimini artırmakta ve düğümlerin pil ömrünü olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle, hata oranını azaltmaya yönelik mekanizmalar enerji verimliliği açısından önem taşımaktadır.

### 3.2.2.6. Zayıf Düğüm

Zamanla kablosuz algılayıcı ağlar içinde bazı algılayıcı düğümler, enerji bakımından diğerlerine göre daha hızlı tükenerek zayıf duruma gelmektedir. Bu düşük enerjili düğümlerin tespit edilerek yönlendirme sürecinde tercih edilmemesi, ağın genel enerji dengesini korumakta ve ağın toplam çalışma süresini önemli ölçüde uzatmaktadır.

### 3.2.2.7. Yük Paylaşımı

Algılayıcı düğümlerden çıkış düğümüne ulaşan veri yollarının çeşitli ve dengeli olması, ağ üzerindeki veri iletim yükünün adil bir şekilde dağıtılmasını sağlar. Bu durum, belirli düğümlerin aşırı enerji tüketimini engelleyerek, tüm ağın enerji dengesini korur ve kablosuz algılayıcı ağın genel ömrünü uzatır.

### 3.2.3. Kablosuz Sensör Ağlarının Sınıflandırılması

Kablosuz Sensör Ağları (KSA), kullanım amaçlarına ve yapısal özelliklerine göre farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma şu şekilde özetlenebilir:

1. **Statik ve Mobil Sensör Ağları:** KSA'da sensör düğümleri genellikle sabittir. Ancak bazı uygulamalarda hareket hâlinde çalışabilen mobil sensör düğümlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tür düğümlerden oluşan ağlara mobil KSA adı verilir. Örneğin, hayvan takibi için kullanılan sistemler bu gruba girer.
2. **Deterministik ve Deterministik Olmayan KSA:** Deterministik KSA'larda sensör düğümleri önceden belirlenmiş ve hesaplanmış konumlara yerleştirilir. Buna karşılık, deterministik olmayan KSA'larda zorlu çevre koşulları gibi etkenler nedeniyle düğümlerin yerleştirilmesi daha karmaşık sistemler gerektirir.
3. **Tekil ve Çoklu Ana İstasyonlu KSA:** Tekil ana istasyonlu KSA'larda tüm düğümlerle iletişim, sensör bölgesine yakın konumlandırılmış tek bir ana istasyon aracılığıyla sağlanır. Çoklu ana istasyonlu yapılarda ise veriler, düğümlere en yakın olan istasyona iletilerek iletişim gerçekleştirilir.
4. **Statik ve Mobil Ana İstasyonlu KSA:** Sensör düğümleri gibi, ana istasyonlar da sabit veya hareketli olabilir. Statik ana istasyonlar genellikle izleme alanına yakın sabit bir konumda yer alırken, mobil ana istasyonlar düğümler üzerindeki yükü dengelemek amacıyla alanda hareket edebilir.
5. **Tek Atlamalı ve Çok Atlamalı KSA:** Tek atlamalı KSA'larda sensör düğümleri veriyi doğrudan ana istasyona gönderir. Çok atlamalı yapılarda ise veri, diğer düğümler veya küme başları aracılığıyla aşamalı olarak iletilir. Bu yöntem, enerji tüketimini azaltmada etkilidir.
6. **Kendini Yapılandırabilen ve Yapılandıramayan KSA:** Yapılandıramayan KSA'larda sensör düğümleri ağ organizasyonunu kendi başına gerçekleştiremez, merkezi bir kontrol birimi tarafından yönetilir. Kendini yapılandırabilen sistemlerde ise düğümler birbirleriyle iş birliği içinde çalışarak ağ organize edebilir ve bağlantılarını sürdürebilir.
7. **Homojen ve Heterojen KSA:** Homojen yapılarda tüm sensör düğümleri benzer işlem gücü, enerji kapasitesi ve bellek özelliklerine sahiptir. Heterojen KSA'larda ise bazı düğümler daha yüksek işlem ve iletişim kapasitesine sahiptir; görevler bu donanımsal farklılıklar dikkate alınarak dağıtılır.

### 3.2.4. Kablosuz Sensör Ağı Protokol Katmanları

Kablosuz Sensör Ağları (KSA), düşük maliyetli, düşük enerjili ve çok sayıda düğümden oluşan yapılar olduğundan, iletişim protokollerinin de bu kısıtlamaları dikkate alacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. KSA uygulamaları, enerji verimliliği, gecikme süresi, hata toleransı, veri yoğunluğu ve düzensiz kaynak dağılımı gibi çeşitli problemleri beraberinde getirmektedir (Aktaş & Çeken, 2018.).

- **Enerji Verimliliği:** Sensör düğümleri çoğunlukla pille çalıştığı için, uzun süreli çalışma (örneğin birkaç yıl) hedeflenir. Bu nedenle, protokol tasarımlarında enerji tasarrufu ön planda tutulmalıdır.
- **Gecikme Garantisi:** Yangın, gaz kaçağı veya tıbbi müdahale gibi zaman kritik uygulamalarda, veri iletiminin düşük gecikmeli olması büyük önem taşır.
- **Hata Toleransı:** Donanım arızaları, enerji kesintileri veya çevresel etkiler nedeniyle sensör, düğüm veya iletişim hatalarında meydana gelebilecek aksaklıklara karşı sistemin dayanıklı olması gerekir.
- **Çok Noktadan Tek Noktaya İletim:** Veriler genellikle sensör düğümlerinden merkezi bir toplayıcıya doğru iletilir. Bu iletişim yapısı, veri sıkıştırması ve enerji tasarrufu açısından avantaj sağlar.
- **Toplu İşleme:** Düğümler, belirli zaman dilimlerinde veri iletim hakkını paylaşarak birbirlerine müdahale etmeden çalışır; böylece ağ içi çakışmalar ve gereksiz enerji tüketimi azaltılır.
- **Kısıtlamaların Düzensiz Dağılımı:** Algılayıcı düğümler sınırlı enerjiye sahipken, veri toplayıcı merkez genellikle enerji problemi yaşamaz. Bu dengesizlik senkronizasyon gibi işlemlerde dikkate alınmalıdır.

Bu gereksinimler doğrultusunda, çapraz katman mimarisi önerilmektedir. Bu yaklaşımda, geleneksel katman yapısının aksine, katmanlar arasında bilgi paylaşımı yapılmakta ve protokol tasarımı bütüncül şekilde ele alınmaktadır. Şekil 1.3'te bu yapı görselleştirilmiştir.



uzatmayı ve güç tüketimini en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Aşağıda literatürde öne çıkan bazı MAC protokolleri özetlenmiştir.

### 3.2.5.1. S-MAC

Ye ve arkadaşları tarafından geliştirilen S-MAC protokolü, düğümlerin belirli bir görev çevrimi (duty cycle) içerisinde çalışmasını öngörmektedir (Ye vd., 2002). Düğümler, aktif oldukları zamanlarda ortamı dinler; uyku periyotlarını komşu düğümleriyle eş zamanlı olarak planlamaya çalışır. Ancak bu eşleşme zorunlu değildir. Bir düğüm, komşusunun zamanlamasının kendi zamanlamasıyla örtüşmediğini fark ettiğinde, her iki zaman diliminde de uyanık kalacak şekilde zamanlamasını günceller. S-MAC, uyku-uyanıklık döngüsüyle enerji tasarrufu sağlasa da, taşıyıcı algılama yöntemine dayandığı için yoğun trafikte çakışma riskine karşı yüksek enerji tüketimine neden olabilir.

### 3.2.5.2. B-MAC

TinyOS işletim sisteminde varsayılan olarak kullanılan MAC protokolü B-MAC'tir (Polastre vd., 2004). Bu protokol, alıcı düğümlerin belirli aralıklarla uyanmasını sağlayarak uzun süreli uyku moduna geçmesine olanak tanır. Gönderici düğüm, alıcının uyanacağı zaman aralığını kapsayan süreden biraz daha uzun bir ön sinyal (preamble) göndererek, alıcının bu süre zarfında ortamı dinlemesini ve veri iletimi yapılmak istendiğini fark etmesini sağlar.

Çakışmaları önlemek için B-MAC, taşıyıcı algılamalı çoklu erişim (CSMA) yöntemini kullanır. Bu sayede iki düğümün aynı anda iletme başlaması engellenmeye çalışılır. Bu yapı, alıcı düğümlerin uzun süre uyuyarak enerji tasarrufu sağlamasına yardımcı olur; çünkü alıcı, paketi kaçırma korkusu olmadan düşük görev çevrimleri (duty cycle) ile çalışabilir.

Ancak bu yaklaşımın bazı önemli dezavantajları da vardır. Performans açısından bakıldığında, uzun ön sinyal süresi boyunca herhangi bir veri aktarımı gerçekleşmediği için verimsizdir. Enerji açısından ise, alıcı düğümler enerji tasarrufu sağlarken, gönderici düğüm ön sinyal süresi boyunca sürekli iletim yapması gerektiğinden, özellikle veri boyutu küçükse, gereğinden fazla enerji harcar.

B-MAC ayrıca, ön sinyali yanlışlıkla duyan diğer düğümlerin de açık kalmasına neden olur. Bu düğümler, iletimin kendilerine yönelik olup olmadığını anlamak için ön sinyalin tamamını dinlemek zorunda kalır. Ancak çoğu durumda veri onlara ait değildir

ve bu süre boyunca boş yere enerji harcanmış olur. Ek olarak, CSMA'nın kullanımı da geri çekilme süreleri ve iletim denemeleri gibi nedenlerle ek gecikmelere ve verimsizliklere yol açar; çünkü bu süreler boyunca düğüm aktif durumda kalmasına rağmen veri iletimi yapılmaz (Yu vd., 2006).

### 3.2.5.3. X-MAC

X-MAC protokolü (Buettner vd., 2006), B-MAC'in eksikliklerini gidermek amacıyla geliştirilmiştir. Bu protokolda, ön sinyale alıcının kimliği eklenmiştir. Böylece ön sinyali duyan düğüm, verinin kendisine yönelik olup olmadığını anlayabilir ve değilse uyku moduna geri dönebilir. Hedef düğüm kendisine gönderi olduğunu fark ettiğinde göndericiye onay mesajı (ACK) gönderir ve gönderici veriyi iletmeye başlar. Ancak hedef düğüm geç uyanırsa, yine gereksiz yere uzun süreli ön sinyal iletimi yapılmak zorunda kalınabilir. CSMA'ya dayandığı için, gönderici düğümün iletme geç başlaması gibi gecikmeler devam eder.

### 3.2.5.4. TDMA

TDMA protokolü, iletişimin belirlenmiş zaman dilimlerinde gerçekleşmesini sağlayarak öngörülebilir ve düzenli bir yapı sunar. Bu özellik, özellikle düğümlerin yıllarca tek bir pil ile çalışmasının beklendiği durumlarda büyük avantaj sağlar. Zaman dilimlerinin önceden belirlenmiş olması sayesinde iletim sırasında enerji verimliliği yüksektir. Ancak alıcı taraf, ne zaman veri alacağına dair bilgiye sahip olmadığı durumlarda, düşük güçlü dinleme modları gibi yöntemlere başvurmak zorundadır. MOSS gibi bazı sistemler bu sorunu çözmek için, düğümün yalnızca mesaj alabileceği zamanlarda açık kalmasını sağlayarak enerji tasarrufu sunar.

### 3.2.5.5. SS-TDMA

SS-TDMA protokolü (Klues vd., 2007), TDMA tabanlı hibrit bir yapıya sahiptir ve Z-MAC protokolüne benzer şekilde çalışır. Bu protokol, düğümün kendi zaman dilimi dışında veri göndermesine izin verir, ancak bu yalnızca zaman dilimi sahibinin pasif olduğu durumlarda mümkündür. Zaman dilimi sahibi, eğer veri gönderecekse zaman diliminin başında hemen iletme geçer. Diğer düğümler kısa bir süre dinleyerek bu durumu kontrol eder. Bu yapı, TDMA'nın verimini artırsa da, düğümlerin sürekli olarak uyanık kalmasını gerektirdiği için enerji verimliliği açısından dezavantaj oluşturabilir.

### 3.3. Nesnelerin İnterneti (IoT)

Nesnelerin İnterneti (Internet of Things – IoT), Şekil 1.5’te gösterildiği üzere, her cihaz, her içerik, her servis ve her kullanıcı için her an ve her yerde bağlantı sağlayan bir ağ yapısıdır. Bu yapı, sensörler aracılığıyla çevresel verilerin toplanmasını, bu verilerin işlenmesini ve karar destek sistemlerine iletilmesini mümkün kılan bütünlük bir iletişim teknolojisidir (Bulut & Akçacı, 2017).



Şekil 3.9. Nesnelerin İnterneti

IoT kavramı ilk olarak 1999 yılında MIT’de gerçekleştirilen bir araştırma projesiyle ortaya atılmıştır. Bu proje, çevrimiçi sistemler aracılığıyla nesnelere anlık veri toplama ve bu verileri paylaşma fikrine dayanıyordu. Günümüzde ise IoT, bireysel kullanıcı cihazlarından endüstriyel sistemlere kadar çok geniş bir alanda uygulama bulmuş, küresel ölçekte etkili bir teknoloji hâline gelmiştir.

Nesnelerin İnterneti, nesnelerin birbirleriyle otonom bir şekilde haberleşmesini sağlayarak yaşam kalitesini artırmayı ve çevresel kaynakların daha verimli yönetilmesini amaçlamaktadır. Bu teknoloji sayesinde ev otomasyon sistemlerinden akıllı tarım uygulamalarına, sağlık hizmetlerinden akıllı şehir altyapılarına kadar birçok alanda dijital dönüşüm mümkün hâle gelmiştir.

IoT’nin temel amacı, gündelik yaşamı kolaylaştırmak ve süreçleri otomatikleştirmektir. Bu kapsamda geliştirilen tüm teknolojilerde nesnelerin karşılıklı veri alışverişi ve uyumlu çalışması esas alınmaktadır. Örneğin, cep telefonları birer nesne olarak düşünüldüğünde, diğer cihazlarla kurduğu iletişim bu yapının önemli bir parçası

hâline gelir. Bu durum, IoT'nin hayatın her alanında ne derece yaygınlaştığını açıkça ortaya koymaktadır.

Yapay zekâ teknolojisinin sunduğu bu potansiyelin yanında, kontrol edilemez hâle gelmesi durumunda oluşturabileceği riskler de dikkat çekmektedir. Facebook tarafından geliştirilen bir yapay zekâ robotunun, internet üzerinden Japonya'daki başka bir yapay zekâ ile iletişime geçmesi ve ardından kendi aralarında insanlar tarafından anlaşılamayan yeni bir dil geliştirerek bu dilde iletişim kurmaları, bu teknolojinin sınırlarının henüz tam olarak çizilmediğini göstermektedir. Bu durum, yapay zekânın etik ve güvenlik boyutunun ne denli önemli olduğunu bir kez daha ortaya koymaktadır (Ercan & Kutay, 2016).

Nesnelerin İnterneti (IoT) ile yapay zekânın kesişim noktası, veri toplama ve analiz süreçlerinde ortaya çıkmaktadır. Nesnelerin topladığı büyük veri kümeleri, yapay zekâ algoritmaları ile işlenerek anlamlı bilgiye dönüştürülmekte ve akıllı sistemlerin oluşturulmasına katkı sağlamaktadır. Bu yapı sayesinde, tarım, sağlık, ulaşım ve sanayi gibi birçok sektörde daha otonom, verimli ve akıllı karar mekanizmaları geliştirilebilmektedir.

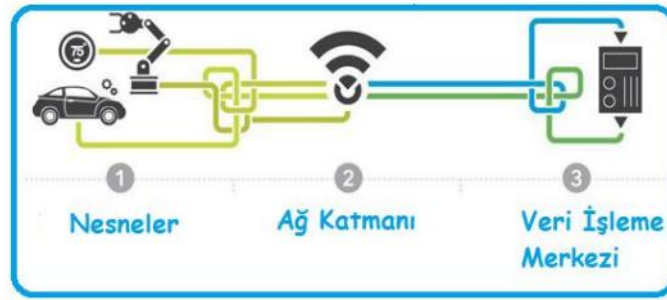
Geleceğe yönelik beklentiler arasında, IoT'nin yaygınlaşmasıyla birlikte internet altyapısının da gelişmesi yer almaktadır. 4G ve 4.5G teknolojileriyle ulaşılan 100 Mb/s ile 1 Gb/s hızların, 5G teknolojisiyle 10 Gb/s seviyelerine çıkması hedeflenmektedir. Bu gelişme, IoT cihazlarının daha hızlı, güvenilir ve düşük gecikmeli bağlantılarla çalışmasını mümkün kılarak, hem yapay zekâ sistemlerinin hem de nesnelerin interneti uygulamalarının performansını önemli ölçüde artıracaktır (Çakır vd., 2018).

### 3.3.1. Nesnelerin İnternetini Oluşturan Katmanlar

Nesnelerin İnterneti (IoT), farklı fiziksel nesnelerin birbirleriyle iletişim kurmasını sağlayan çok katmanlı ve bütünleşik bir sistem yapısıdır. Bu sistem, farklı görevleri yerine getiren bileşenlerin birlikte çalışmasıyla işlevsellik kazanır. IoT sisteminde, çevresel verileri algılayan sensörler, kameralar ve diğer fiziksel aygıtlar sistemin “duyu organları” olarak kabul edilmektedir. Bu bileşenler, fiziksel dünyadan topladıkları verileri haberleşme ağları üzerinden iletir (Karthik & Malini, 2018).

Veri iletimini sağlayan bu ağ yapısı, sistemin sinir ağı işlevini üstlenir ve sensör verilerinin merkezi birimlere taşınmasında kritik rol oynar. Toplanan verilerin analiz edilerek anlamlı bilgiye dönüştürüldüğü, gerektiğinde kullanıcıya aktarıldığı veya

otomatik yanıtlar üretildiği kısım ise veri işleme katmanı olup, sistemin “beyni” olarak nitelendirilmektedir (Turak, 2015).



Şekil 3.10. Nesnelerin interneti katmanları

Şekil 3.10'da görüldüğü gibi, Nesnelerin İnterneti (IoT) mimarisi üç temel katmandan oluşmaktadır:

1. **Nesneler (Algılama Katmanı):** Bu katmanda, fiziksel dünyadan veri toplayan sensörler, cihazlar ve makineler yer almaktadır. Örneğin araçlar, robotik kollar veya endüstriyel cihazlar çevredeki değişimleri algılayarak sistemi besler.
2. **Ağ Katmanı:** Algılanan verilerin kablolu veya kablosuz iletişim teknolojileri aracılığıyla taşındığı katmandır. Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee gibi haberleşme protokolleri bu aşamada görev alır. Verilerin güvenli ve kesintisiz bir şekilde iletilmesi bu katmanın sorumluluğundadır.
3. **Veri İşleme Merkezi (Uygulama Katmanı):** Toplanan verilerin analiz edildiği, değerlendirildiği ve gerektiğinde eyleme dönüştürüldüğü sistem katmanıdır. Bulut tabanlı sistemler, sunucular ve yapay zekâ algoritmaları burada yer alır. Bu katman, kullanıcıya anlamlı bilgi sunmak ve karar destek mekanizmalarını çalıştırmakla görevlidir (Gündüz & Daş, 2018; Turak, 2015).

Bu üç katman arasındaki uyumlu işleyiş, IoT sistemlerinin gerçek zamanlı, akıllı ve etkin bir şekilde çalışmasını sağlar. Katmanlardan birinde oluşabilecek bir aksaklık, sistemin genel performansını doğrudan etkileyebilir.

### 3.3.2. IoT Tabanlı Akıllı Gömülü Sistemler

Gömülü sistemler, işlemcisine entegre edilen bir yazılım aracılığıyla çevresel donanımları bağımsız biçimde kontrol edebilen elektronik yapılar olarak tanımlanmaktadır (Türk & Lüy, 2021). Bu sistemler, hem mikroişlemci hem de mikrodenetleyici tabanlı donanımlar kullanılarak geliştirilebilmektedir (Duran & Teke,

2019). Her mikrodnetleyici tabanlı yapı bir gömülü sistem olarak kabul edilirken, her gömülü sistemin mikrodnetleyici temelli olması zorunlu değildir.

Son dönemlerde, mikrodnetleyicili gömülü sistemler diğer türlerine kıyasla daha düşük maliyetlerle üretilebilmekte ve bu durum onları daha tercih edilebilir hâle getirmektedir. Kolay erişilebilir olmaları, basit kurulum yapıları, düşük enerji tüketimleri ve yüksek performans sağlamaları gibi avantajlar sayesinde bu sistemler geniş bir kullanım alanına ulaşmıştır (Salah & Zneid, 2019).

Mikrodnetleyicili sistemlere kablosuz veri aktarımı özelliğinin entegre edilmesi, Endüstri 4.0'ın önemli bileşenlerinden biri olan Nesnelerin İnterneti (IoT - Internet of Things) uygulamalarının yaygınlaşmasına katkı sağlamıştır (Kanoun vd., 2021). IoT teknolojisi sayesinde; mobil telefonlar, tabletler, bilgisayarlar ve hatta fiziksel nesnelere arasında karşılıklı iletişim mümkün hâle gelmiştir. Bu haberleşme, radyo frekansı tanımlama (RFID - Radio Frequency Identification) (Cui vd., 2019), Bluetooth teknolojisi (Dasu & Raghunath, 2021) ve kablosuz sensör ağları (WSN - Wireless Sensor Networks) (Vikash vd., 2021) gibi çeşitli iletişim protokolleri aracılığıyla gerçekleştirilmektedir (Erdal & Ergüzen, 2020). Bu sayede nesnelerin uzaktan izlenebilmesi, kontrol edilebilmesi ve elde edilen verilerin analiz edilebilmesi mümkün hâle gelmiştir (Liao vd., 2020). Ayrıca, akıllı telefonlarda kullanılan Android ve IOS tabanlı uygulama geliştirme platformları da bu IoT temelli gelişmelerle paralel biçimde hızlı bir artış göstermektedir. Tüm bu teknolojik ilerlemelere bağlı olarak, gelecekte birbirleriyle iletişim kurabilen cihazların sayısında önemli ölçüde artış olacağı öngörülmektedir (Khanna & Kaur, 2020b).

Son yıllarda yaşanan teknolojik gelişmeler, tarım sektöründe otonom ve akıllı sistemlerin kullanımını ön plana çıkarmıştır. Bu doğrultuda, IoT tabanlı, akıllı algoritmalarla entegre edilmiş mikrodnetleyici uygulamaları dikkat çekmektedir. Bu alanda araştırmacılar ve mühendisler tarafından geliştirilen uygulamalar, insan yaşamını kolaylaştırıcı nitelikte yenilikçi çözümler sunmaktadır. Uzaktan kontrol edilebilen dronlar aracılığıyla tarımsal arazilerin izlenmesi, topraksız tarım sistemleri, düşük maliyetli sulama çözümleri ve karar destek algoritmalarıyla donatılmış sera otomasyonları (Altın vd., 2021) bu kapsamda öne çıkan örneklerdir. Bunun yanında, damlama sulama sistemleri, nem sensörleri ile elma bahçelerindeki sulama ihtiyacının belirlenmesi ve iç ortam hava kalitesinin gerçek zamanlı izlenmesini sağlayan sistemlerin bulut tabanlı ağlara entegre edilmesiyle birlikte, verilerin IoT aracılığıyla iletilmesi, analiz edilmesi ve gerektiğinde müdahale edilmesi mümkün kılınmıştır (Üçgün et al.,

2020). Ayrıca, kümes hayvancılığında verimliliğin artırılması (Üçgün vd., 2020), akıllı tarım uygulamaları kapsamında hava durumu takibi ve süper kapasitör destekli solar enerjili kablosuz gömülü sistemlerle veri iletimi gibi çalışmalar da literatürde yer almaktadır (Soy & Dilay, 2021).

### 3.4. Ağ Tabanlı Zeki Algoritma (NBIA)

Kablosuz sensör ağları (WSN) ve mobil ad-hoc ağlar (MANET), sınırlı enerji kaynaklarına sahip çok sayıda düğümden oluşan sistemlerdir. Bu tür ağlarda, zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA) protokolü, iletişim çakışmalarını önleyerek enerji tüketimini azaltma açısından önemli avantajlar sunar. Ancak TDMA tabanlı yapılar, zaman dilimi tahsisi ve senkronizasyon süreçlerinde merkezi olmayan, esnek ve adaptif algoritmalara ihtiyaç duyar. Bu bağlamda geliştirilen Ağ Tabanlı Zeki Algoritma (NBIA - Network-Based Intelligent Algorithm), TDMA yapıları için enerji verimliliği yüksek, çakışma oranı düşük ve hızlı yakınsama sağlayan bir çözüm sunmaktadır (Harris, 2010).

NBIA algoritması, temel olarak düğümlerin kendi zaman dilimlerini çevresel gözlem ve komşuluk bilgilerine göre dağıtık olarak belirlemesine olanak tanır. Her düğüm, etrafındaki düğümler tarafından yayınlanan işaret (beacon) mesajlarını analiz ederek mevcut slot kullanım durumunu değerlendirir ve en uygun boş slotu seçer. Bu değerlendirme süreci, "Beacon Occupancy Vector" (BOV) olarak adlandırılan bir veri yapısı kullanılarak gerçekleştirilir. BOV, düğümün hem doğrudan (1-hop) hem de dolaylı (2-hop) komşularından topladığı slot kullanım bilgilerini içerir (Harris, 2010).

NBIA'nın en önemli katkılarından biri, dolaylı onaylama (indirect acknowledgment) yaklaşımıdır. Bu yöntemde, bir düğümün ilettiği işaret sinyalinin başarılı olup olmadığını komşularının işaret mesajları üzerinden dolaylı yoldan anlaması sağlanır. Böylece ağdaki yük azaltılırken, çakışma tespiti de etkili biçimde gerçekleştirilir (Harris, 2010). Buna ek olarak, NBIA slot seçiminde kullanılan mesaj alışverişi ve zamanlama mekanizmaları sayesinde gizli düğüm problemlerine karşı da dirençli bir yapı sunar.

Dağıtık yapısı sayesinde NBIA, merkezi bir kontrol birimi gerektirmeden tüm ağın zaman çizelgesini hızlı şekilde organize edebilir. Simülasyon sonuçları, NBIA algoritmasının büyük ölçekli ağlarda bile birkaç zaman döngüsü (epoch) içerisinde kararlı bir zaman çizelgesi oluşturabildiğini ve minimum sayıda çakışma ile ağ bütünlüğünü sağladığını göstermiştir (Harris, 2010).

#### 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, geliştirilen akıllı sulama sistemine ilişkin hem MATLAB ortamında gerçekleştirilen simülasyon analizleri hem de gerçek donanım üzerindeki uygulama sonuçları detaylı biçimde sunulmaktadır. Sistem, kablosuz sensör ağı (KSA) mimarisi ile birbirleriyle iletişim kuran ESP32 modüllerinden oluşmakta ve zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA) protokolüne dayalı bir haberleşme altyapısıyla desteklenmektedir. Bu yapı üzerinde uygulanan Ağ Tabanlı Zeki Algoritma (NBIA), düğümler arası zaman dilimi tahsisi, çakışma önleme ve enerji verimliliği açısından sistemin performansını optimize etmektedir.

Simülasyon aşamasında kapsam grafiği, çakışma yoğunluğu, zaman dilimi onayı, ağ gecikmesi, güvenilirlik ve paket kaybı gibi temel performans ölçütleri analiz edilmiş, algoritmanın etkinliği sayısal veriler ve grafiksel sonuçlarla ortaya konmuştur. Bu analizler, 50 düğüme kadar ölçeklenebilirlik testleri ile birlikte değerlendirilmiş ve NBIA algoritmasının geniş ağ yapılarında dahi istikrarlı ve verimli bir iletişim sağladığı gözlemlenmiştir.

Gerçek donanım uygulamasında ise sistem, ESP32 mikrodenetleyicileri, HL-69 toprak nem sensörleri, DHT11 sıcaklık-nem sensörü, 5V su pompası ve IRLZ44N MOSFET ile yapılandırılmıştır. Enerji gereksinimi güneş paneli destekli pil sistemi ile sağlanmış, böylece enerji bağımsız ve sürdürülebilir bir mimari oluşturulmuştur. Tüm ölçüm verileri gerçek zamanlı olarak Firebase veritabanına kaydedilmiş ve Android tabanlı Flutter mobil uygulaması üzerinden kullanıcıya anlık olarak sunulmuştur. Mobil uygulama sayesinde kullanıcılar, sistemdeki toprak nemi ve sıcaklık verilerini görüntüleyebilmekte, su pompasını uzaktan kontrol edebilmekte ve geçmiş veriler üzerinden analiz yapabilmektedir.

##### 4.1. Simülasyon Sonuçları ile Algoritma Performansı

Bu bölümde, geliştirilen NBIA (Network-Based Intelligent Algorithm) tabanlı akıllı sulama sisteminin MATLAB ortamında gerçekleştirilen simülasyon analizlerine yer verilmiştir. Amaç, kablosuz sensör ağı (KSA) yapısı içinde zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA) protokolü ile çalışan düğümlerin, NBIA algoritması altında gösterdiği iletişim performansını nicel olarak değerlendirmektir. Simülasyonlar, hem çakışma yönetimi hem de iletişim güvenilirliği açısından algoritmanın başarımını test etmeye yönelik olarak yapılandırılmıştır.

#### 4.1.1. Simülasyon Ortamı ve Yöntemi

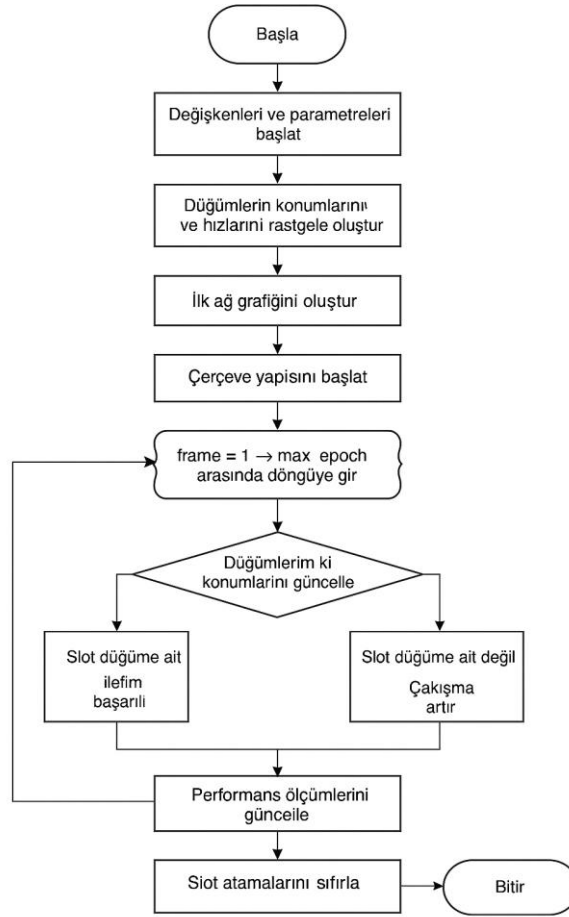
Simülasyonlar, geliştirilen NBIA algoritmasının kablosuz sensör ağları (KSA) üzerinde gösterdiği iletişim performansını değerlendirmek amacıyla hazırlanmıştır. Bu amaçla, MATLAB R2025 yazılım ortamı kullanılarak nesne tabanlı modelleme yaklaşımıyla kapsamlı bir simülasyon altyapısı oluşturulmuştur.

Simülasyon yapısı, iki boyutlu bir düzlemde yerleştirilmiş mobil düğümlerden oluşan bir ağ mimarisine dayanmaktadır. Düğümler, zaman içinde rastgele yönlere doğru hareket edebilen varlıklar olarak modellenmiştir. Bu hareketlilik modeli sayesinde, gerçek dünya uygulamalarında karşılaşılan değişken konumlama, sinyal gücü dalgalanmaları ve bağlantı kararsızlıkları gibi durumlar başarılı bir şekilde simüle edilmiştir.

İletişim altyapısı, zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA) protokolüne dayalı bir çerçeve yapısıyla kurgulanmıştır. Bu yapı içerisinde her düğüme belirli zaman dilimlerinde iletim hakkı verilmekte ve bu haklar zamanla değişen konum, performans ve geçmiş başarı oranlarına göre dinamik olarak yeniden tahsis edilmektedir. Böylelikle, ağ içerisinde yaşanabilecek slot çakışmaları en aza indirilmeye çalışılmıştır.

NBIA algoritması, her düğümün ağ içindeki davranışını analiz ederek zamanla en uygun slotlara yönlendirme yapabilmekte ve başarılı iletim oranını artıracak şekilde öğrenme mekanizmalarıyla desteklenmektedir. Algoritma, çakışmaların sıklığını azaltmak amacıyla slot sabitleme stratejileri de içermektedir. Bu stratejiler, belirli bir başarı seviyesine ulaşan düğümler için zaman dilimlerinin kalıcı hale getirilmesini sağlamaktadır.

Simülasyon döngüsü her zaman adımında düğüm hareketlerini güncellemede, bağlantıları yeniden oluşturmaktadır. Her çerçeve döngüsünde sistem durumu analiz edilmekte; başarıyla iletilen veriler, çakışmalar, enerji kullanımı ve güvenilirlik gibi performans göstergeleri güncellenmektedir. Bu süreç, ağın zaman içerisindeki davranışını takip etme ve algoritmanın adaptif mekanizmalarını değerlendirme açısından kritik öneme sahiptir.



Şekil 4.1. TDMA tabanlı NBIA algoritması için simülasyon akış diyagramı

Şekil 4.1’de sunulan akış diyagramı, simülasyon sürecinde gerçekleşen temel adımları göstermektedir. Başlangıçta sistem parametreleri ve düğüm konumları belirlenir, ağ yapısı oluşturulur ve TDMA çerçevesi başlatılır. Her epoch döngüsünde düğümler hareket ettirilir, iletişim başarıyla gerçekleşirse metrikler güncellenir; aksi durumda çakışma tespit edilir. Performans verileri her çerçeve sonunda değerlendirilir ve sistem kendini optimize edecek şekilde güncellenmeye devam eder.

#### 4.1.2. Simülasyon Parametreleri

Bu çalışmada geliştirilen NBIA algoritmasının performansını değerlendirmek amacıyla kurulan simülasyon ortamında kullanılan temel fiziksel ve iletişimsel parametreler aşağıda sunulmaktadır. Söz konusu parametreler, gerçek dünya koşullarına yakın senaryolar üretmek ve sistemin zaman-mekân verimliliğini ölçmek amacıyla titizlikle belirlenmiştir.

**Çizelge 4.1.** Simülasyonda kullanılan anahtar parametreler

Parametre	Değer	Açıklama
Düğüm Sayısı	30	Kablosuz sensör ağına ait toplam düğüm sayısı
Alan Boyutları	30 m × 5 m	Simülasyonun gerçekleştiği fiziksel düzlem
Maksimum Hız	0.1 m/s	Düğümün rastgele yönlü maksimum hareket hızı
Zaman Adımı	100	Simülasyon boyunca tekrar eden çerçeve sayısı
TDMA Çerçeve Boyutu	60 slot	Her bir zaman diliminde toplam slot sayısı
NAS Slot Sayısı	20	Ağa erişim için ayrılmış özel slotlar
LAS Slot Sayısı	40	Yerel erişim için ayrılmış genel slotlar
Anten Kazancı	0 dB	Düğümün anten kazancı varsayımı
Maksimum İletim Gücü	20 dB	Her düğüm için iletimde kullanılan maksimum güç
Minimum SINR Eşiği	1 dB	Bağlantı kurulabilmesi için gereken minimum kalite
Yol Kaybı Üssü ( $\alpha$ )	2	Kanal modeline ait zayıflama katsayısı

Verilen Çizelge 4.1, simülasyon ortamında kullanılan tüm fiziksel ve iletişimsel parametreleri kapsamaktadır. Bu parametreler, sistemin hem gerçek dünya koşullarına yakınlık göstermesi hem de enerji ve zaman verimliliği açısından uygun senaryolar üretmesi açısından dikkatle belirlenmiştir. Özellikle NAS ve LAS slot ayrımı ile çakışmaların azaltılması hedeflenmiş ve NBIA algoritmasının adaptif slot atama stratejisi bu yapı üzerinde test edilmiştir.

Simülasyon ortamının yapılandırılması ve işleyişi aşağıda yer alan MATLAB kod parçacıklarıyla gerçekleştirilmiştir. Her parça, simülasyon sisteminin önemli bir bileşenini oluşturmaktadır.

### 1. Başlangıç Ayarları

```
clear variables;
import java.util.ArrayList;

channel_model.path_loss_Exponent = 2;
channel_model.antenna_gain = 0;
power_max = 20;
min_SINR = 1;
width = 30;
height = 5;
num_Nodes = 30;
R = 10;
N0 = calculate_N0(channel_model, power_max, R, min_SINR);
N0_dB = pow2db(N0);
max_epoch = 100;
frame_size = 60;
num_NAS = 20;
NAS_slots = 1:num_NAS;
num_LAS = frame_size - num_NAS;
LAS_slots = setdiff(1:frame_size, NAS_slots);
Slot_capacity_vector = [100, 200, 400];
ACK_threshold = 0.8;
QoS_threshold = 10;
```

Bu adımda, kanal modeline ait temel parametreler tanımlanmıştır. Yol kaybı üssü (path loss exponent), anten kazancı, maksimum iletim gücü ve minimum SINR (Sinyal-Gürültü Oranı) eşikleri belirlenerek, iletim ortamının fiziksel özellikleri modellenmiştir.

## 2. Düğüm Tanımları ve Konum Atamaları

```
nodes_locations = [rand(1, num_Nodes) * width; rand(1, num_Nodes) * height]';
velocities = (rand(num_Nodes, 2) - 0.5) * 2 * max_speed;

prev_nodes_locations = nodes_locations;
total_movement = zeros(num_Nodes, 1);
```

Bu bölümde, düğümler 2D düzlem üzerinde rastgele konumlandırılmış ve her düğüme rasgele yönlü hareket kabiliyeti atanmıştır. Bu sayede, mobilite destekli gerçek saha koşulları benzetilmiştir.

## 3. Ağ Grafiği Oluşturma

```
[G_coverage, G_overlay, distance_matrix, SNR_matrix, H] = Create_Network_graph(nodes_locations,
min_SINR, channel_model, power_max, N0);
Frame_structure = initialize_frame_structure(frame_size, num_NAS, NAS_slots, num_LAS, LAS_slots);
Nodes_process = initialize_node_process_NbIA(num_Nodes, nodes_locations, frame_size);
total_transmissions = zeros(1, max_epoch);
delays = [];
collisions = zeros(1, max_epoch);
throughput = zeros(1, max_epoch);
successful_transmissions = zeros(1, max_epoch);
failed_transmissions = zeros(1, num_Nodes);
total_delay_per_node = zeros(1, num_Nodes);
avg_delay_per_node = zeros(1, num_Nodes);
slot_acknowledgement = zeros(1, max_epoch);
collision_detection = zeros(1, max_epoch);
slot_confirmation = zeros(1, max_epoch);
reliability = zeros(1, max_epoch);
```

Her zaman adımında, düğümler arası mesafeye göre ağ bağlantıları yeniden hesaplanmakta ve sinyal-gürültü oranları denetlenmektedir. Bu işlev, kapsama grafiğinin ve dinamik bağlantı haritasının oluşturulmasını sağlar.

## 4. Slot Atamaları ve Karar Süreci

```
for node_idx = 1:num_Nodes
    if ismember(current_time_slot, Nodes_process(node_idx).NPS_slots)
        total_transmissions(frame) = total_transmissions(frame) +
Slot_capacity_vector(randi(length(Slot_capacity_vector)));
        delays = [delays, randi([1, 10])];
        successful_transmissions(frame) = successful_transmissions(frame) + 1;
        throughput(frame) = throughput(frame) +
Slot_capacity_vector(randi(length(Slot_capacity_vector)));
        total_delay_per_node(node_idx) = total_delay_per_node(node_idx) + delays(end);
        slot_acknowledgement(frame) = slot_acknowledgement(frame) + 1;
        slot_confirmation(frame) = slot_confirmation(frame) + 1;
        slotUtilization(node_idx, current_time_slot) = slotUtilization(node_idx,
current_time_slot) + 1;
        energyConsumption(frame) = energyConsumption(frame) + transmitPower;
    else
        collisions(frame) = collisions(frame) + 1;
        failed_transmissions(node_idx) = failed_transmissions(node_idx) + 1;
        collision_detection(frame) = collision_detection(frame) + 1;
        slotContention(frame) = slotContention(frame) + 1;
        energyConsumption(frame) = energyConsumption(frame) + idlePower;
    end
end
```

Her çerçevede düğüme ait zaman dilimi kontrol edilir. Düğüm kendisine tahsis edilen slottaysa iletim başarıyla gerçekleştirilir. Aksi durumda çakışma meydana gelir ve başarısızlık olarak kaydedilir.

## 5. Slot Çatışma Algoritması

```

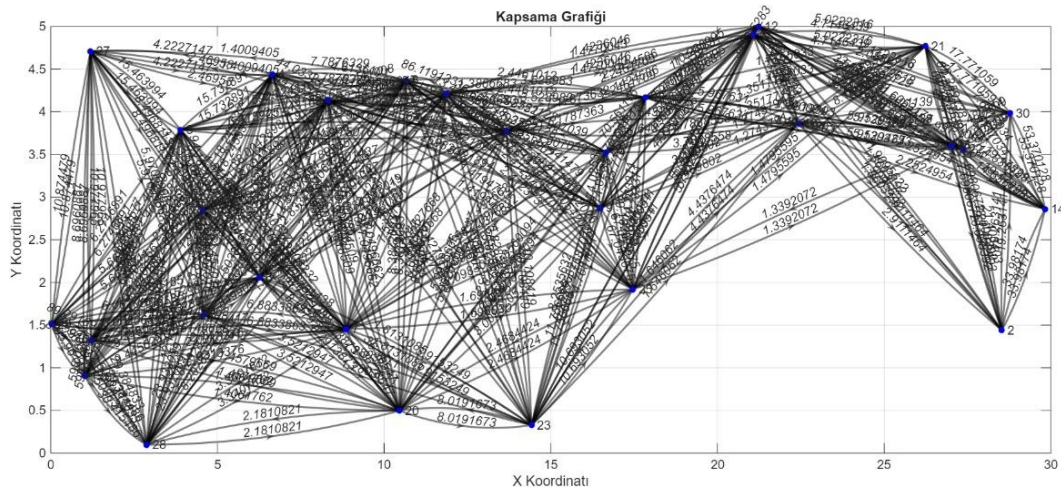
for slot = 1:frame_size
    collidingNodes = find(slotAssignment(:, slot));
    if length(collidingNodes) > 1
        collisionDetection(frame) = collisionDetection(frame) + length(collidingNodes) - 1;
        for i = 1:length(collidingNodes)
            node = collidingNodes(i);
            packet_drop_rate(frame) = packet_drop_rate(frame) + 1;
            slotSuccessCount(node) = 0;
            if fixedSlot(node) == 0
                newSlot = mod(slotHistory{node}(end) + randi([1,3]), frame_size) + 1;
                slotHistory{node} = [slotHistory{node}, newSlot];
            end
        end
        currentCollisions{end+1} = collidingNodes;
    else
        successfulTransmissions(frame) = successfulTransmissions(frame) + 1;
        slotUtilization(:, slot) = slotUtilization(:, slot) + slotAssignment(:, slot);
        for node = collidingNodes'
            slotSuccessCount(node) = slotSuccessCount(node) + 1;
            if fixedSlot(node) == 0 && slotSuccessCount(node) >= adaptiveThreshold(node)
                fixedSlot(node) = slot;
            end
        end
    end
end
end
end

```

Bu kısımda, aynı slotu birden fazla düğümün kullanması durumunda sistem çakışma tespiti yapmaktadır. Böylece hem çakışma istatistikleri elde edilir hem de slot yeniden tahsis stratejileri için geri bildirim oluşturulur.

### 4.1.3. Kapsama Grafiği ile Ağ Yapısı

Simülasyon başlangıcında oluşturulan ağ yapısının genel topolojik yapısını ve düğümler arası bağlantı durumlarını görselleştirmek amacıyla kapsama grafiği oluşturulmuştur. Bu grafik, düğümlerin iki boyutlu düzlem üzerindeki konumlarını ve birbirleriyle olan iletişim bağlarını göstermektedir. Kapsama durumu, her düğümün sahip olduğu sinyal-gürültü oranı (SNR) eşliğine göre belirlenmiş, yalnızca başarılı bağlantılar grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Kapsama grafiği – Düğümler arası bağlantıların ve SNR değerlerinin topolojik gösterimi.

Şekil 4.2’de sunulan kapsama grafiği, 30 düğümlü kablosuz sensör ağı yapısının ilk simülasyon adımıdaki topolojik durumunu göstermektedir. Her bir mavi nokta bir düğümü temsil ederken, siyah çizgiler o düğümün erişebildiği komşularla olan bağlantılarını göstermektedir. Bu bağlantıların üzerindeki sayısal ifadeler, bağlantının sahip olduğu SNR (Signal-to-Noise Ratio) değerleridir.

Grafikte dikkat çeken bazı önemli gözlemler şunlardır:

- **Yüksek Yoğunluklu Bölgeler:** Düğümlerin belirli alanlarda kümelendiği ve bu bölgelerde çok sayıda bağlantının olduğu görülmektedir. Bu, veri iletimi açısından avantaj sağlarken, aynı zamanda çakışma riskini de artırabilir.
- **Sınır Düğümleri:** Grafiğin uç noktalarında yer alan bazı düğümlerin (örneğin 2, 14, 27 numaralı düğümler) daha az sayıda bağlantıya sahip olduğu ve bu nedenle iletişim güvenliği açısından daha hassas konumda oldukları gözlemlenmiştir.
- **Bağlantı Kalitesi:** Bağlantılar genellikle yüksek SNR değerlerine sahiptir, bu da iletim kalitesinin yüksek olduğunu ve haberleşmenin büyük ölçüde güvenilir biçimde gerçekleştiğini göstermektedir.
- **Simetrik Dağılım:** Düğümlerin simülasyon alanına dengeli bir şekilde dağıldığı ve ağın tamamının birbirine bağlanabilir olduğu görülmektedir. Bu durum, NBIA algoritmasının çalışabilmesi için gerekli olan minimum bağlantı yoğunluğunu sağladığını göstermektedir.

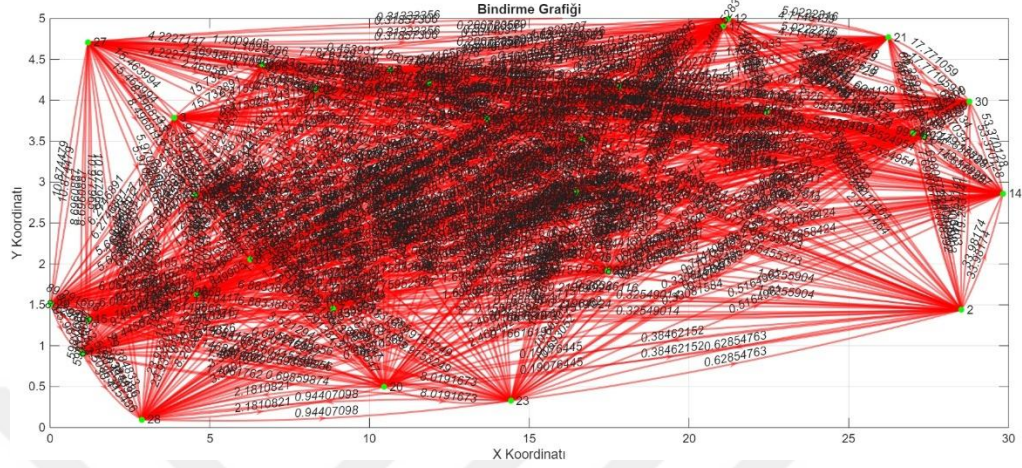
Bu grafiğin sunulma amacı, algoritmanın çalışmaya başladığı ilk anda ağın yapısal bütünlüğünü ortaya koymak ve karar algoritmasının dağıtık bir şekilde çalışabilmesine olanak sağlayacak kapsama düzeyini doğrulamaktır. Bu doğrultuda elde edilen grafik, sistemin yeterli bağlantı yoğunluğuna ve topolojik bütünlüğe sahip olduğunu göstermektedir.

#### 4.1.4. Bindirme Grafiği ile NBIA Sonrası Komşuluklar

NBIA (Network-Based Intelligent Algorithm) algoritmasının uygulanması sonrasında düğümler arası bağlantıların yeniden yapılandırılması ve komşuluk ilişkilerinin optimize edilme durumu, bindirme grafiği ile analiz edilmiştir. Bu grafik, algoritma çalıştırılmadan önceki ağ yapısı ile karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, dinamik olarak güncellenen bağlantıların yapısını ve düğümler arasındaki etkileşim değişimlerini açıkça ortaya koymaktadır.

NBIA algoritması, düğümlerin geçmiş başarımlarına göre slot sabitlemesi yapmakta ve çakışmaları azaltarak sinyal kalitesini iyileştirmeye çalışmaktadır.

Algoritma sonucunda ağ bağlantıları yeniden şekillenmekte, her düğüm sadece güvenilir ve yüksek sinyal değerine sahip olan bağlantıları sürdürmektedir. Bu yaklaşım, ağın genel güvenilirliğini ve verimliliğini artırmakta; aynı zamanda enerji tüketimini de azaltmaktadır.



Şekil 4.3. NBIA algoritması sonrası düğüm bağlantılarını ve sinyal kalitelerini gösteren bindirme grafiği

Şekil 4.3'te, NBIA algoritmasının uygulanmasının ardından elde edilen ağ topolojisi görselleştirilmiştir. Bu grafikte, düğümler yeşil renkli noktalar ile temsil edilmekte, düğümler arasındaki optimize edilmiş bağlantılar ise kırmızı çizgiler ile gösterilmektedir. Her bir bağlantının üzerinde yer alan sayısal değerler, bağlantıya ait SNR (Sinyal-Gürültü Oranı) bilgisini ifade etmektedir.

Öne çıkan bulgular şunlardır:

- **Bağlantı Sayısında Azalma:** Önceki kapsama grafiğiyle karşılaştırıldığında, NBIA algoritması sonrası bağlantı sayısında azalma gözlemlenmektedir. Bu durum, yalnızca yüksek kaliteli bağlantıların sürdürüldüğünü ve zayıf bağlantıların elendiğini göstermektedir.
- **Sinyal Kalitesinde Denge:** Düğümler arası bağlantıların büyük çoğunluğunun benzer SNR seviyelerinde olduğu görülmektedir. Bu da sistemdeki dengesiz bağlantıların ortadan kaldırıldığını ve daha homojen bir iletişim yapısı elde edildiğini göstermektedir.
- **Yüksek SNR Odaklı Yapı:** Bağlantıların kalitesi artırılarak veri iletiminde hata olasılığı minimize edilmiştir. Böylece NBIA algoritmasının ağ güvenilirliğine doğrudan katkı sağladığı anlaşılmaktadır.

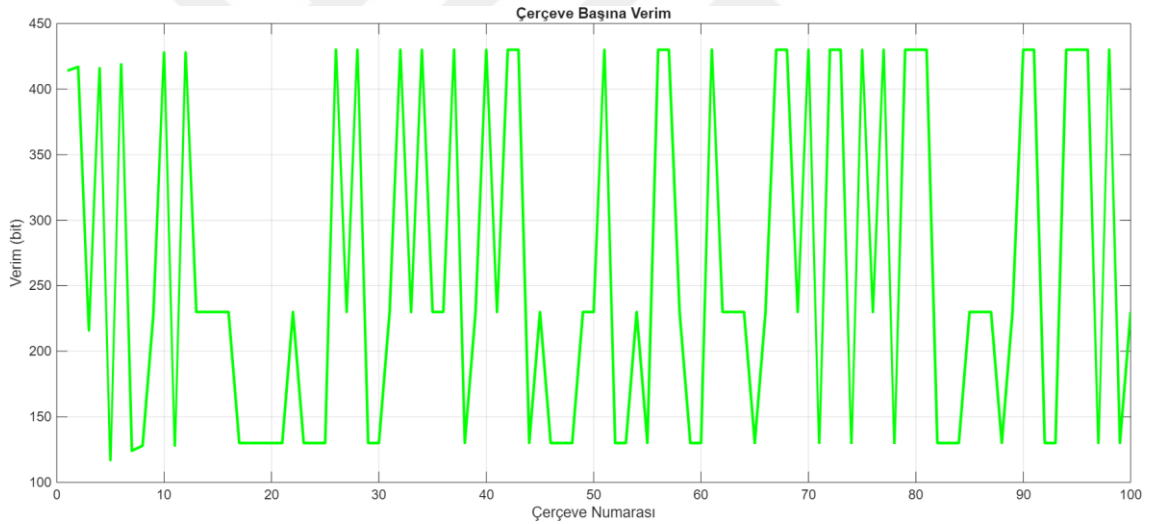
Bu analiz, NBIA algoritmasının ağın dinamik yapısına başarıyla adapte olduğunu ve ağ topolojisini optimize ederek performansı önemli ölçüde artırdığını kanıtlamaktadır.

Aynı zamanda, TDMA protokolü ile çalıştığına daha kararlı ve çakışmasız bir zaman çizelgesi oluşturduğu da gözlemlenmiştir.

#### 4.1.5. Verimlilik (Throughput) Analizi

Verimlilik (throughput), ağın her zaman diliminde (çerçeve bazında) ne kadar veri aktarımı gerçekleştirebildiğini gösteren önemli bir performans ölçütüdür. Geliştirilen sistemde, her bir çerçevede başarılı biçimde iletilen veri miktarı ölçülmüş ve bu değerlerin zaman içerisindeki değişimi analiz edilmiştir. Bu analiz, NBIA algoritmasının ağ verimliliği üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla yapılmıştır.

NBIA algoritmasının uygulanmasıyla birlikte, düğümlere zaman dilimleri dinamik biçimde tahsis edilmiş ve çakışmaların azaltılması hedeflenmiştir. Bu durum, aynı zaman dilimi içerisinde birden fazla düğümün veri göndermesi sonucu yaşanan veri kayıplarını minimize etmiş ve verim artışı sağlamıştır.



Şekil 4.4. NBIA algoritması sonrası çerçeve başına ölçülen verim değerlerinin zamana göre değişimi

Şekil 4.4'te sunulan verimlilik grafiği, 100 çerçeve boyunca sistemin ürettiği veri miktarını göstermektedir. Yatay eksen çerçeve numarasını, dikey eksen ise bit cinsinden veri miktarını temsil etmektedir. Grafik incelendiğinde aşağıdaki gözlemler yapılabilir:

- **Dalgali Verim Değerleri:** Verimlilik zaman içerisinde dalgalanma göstermektedir. Bu durum, düğümlerin mobiliteye bağlı olarak zaman zaman kapsama dışına çıkması, çakışma yaşaması ya da veri göndermemesi gibi durumlarla açıklanabilir.

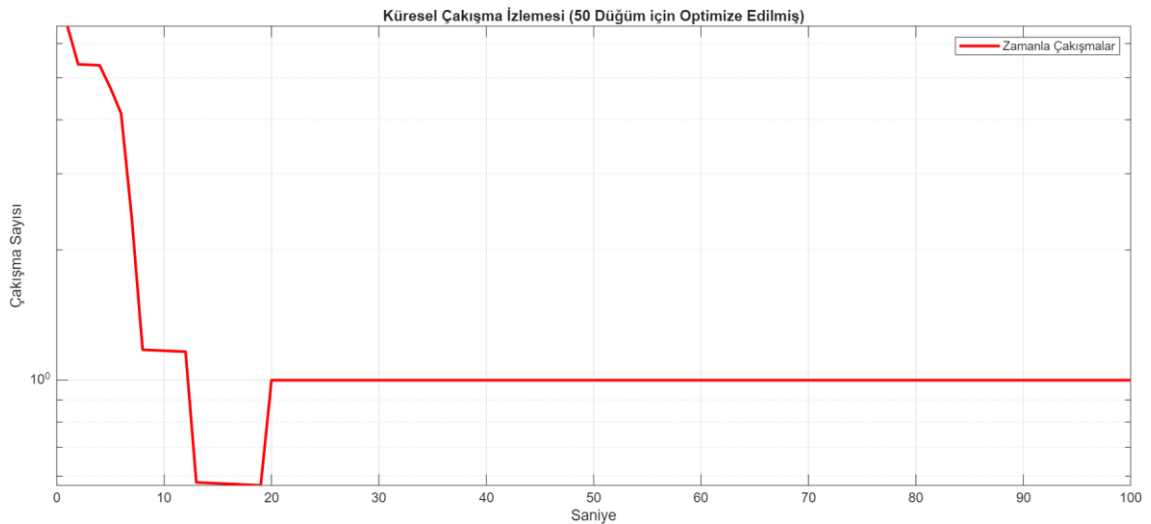
- **Verimde Artış Eğilimi:** Özellikle 30. çerçeveden itibaren daha kararlı ve yüksek verim değerleri elde edildiği gözlemlenmektedir. Bu, NBIA algoritmasının slot sabitleme mekanizmasının zamanla oturduğunu ve sistemin istikrara kavuştuğunu göstermektedir.
- **Tepe Değerler:** Bazı çerçevelerde verim değeri maksimum kapasiteye (yaklaşık 440 bit) çok yaklaşmıştır. Bu, o çerçevede neredeyse çakışmasız veri iletiminin başarıyla gerçekleştiğini göstermektedir.

Elde edilen sonuçlar, NBIA algoritmasının çakışmaları etkin şekilde azaltarak ağın veri taşıma kapasitesini artırdığını ve TDMA protokolü ile uyumlu şekilde çalıştığını göstermektedir. Ayrıca ağda oluşabilecek darboğazlar, algoritmanın dinamik yapısı sayesinde zamanla giderilmekte ve sistem kararlı bir verimlilik düzeyine ulaşmaktadır.

#### 4.1.6. Çakışma Tespiti ve İzleme (Collision Detection)

Kablosuz sensör ağlarında en yaygın karşılaşılan sorunlardan biri, aynı zaman diliminde birden fazla düğümün veri iletimi yapması sonucu oluşan çakışmalardır. Bu durum hem veri kaybına hem de enerji israfına yol açmaktadır. NBIA algoritması, çakışmaları azaltmak amacıyla her düğüme, geçmiş başarımlarına ve ağ yoğunluğuna göre uygun zaman dilimlerini dinamik olarak atamakta; bu da slot bazlı çakışmaların önemli ölçüde azaltılmasını sağlamaktadır.

Simülasyon süresince her zaman adımı (epoch) için çakışma sayıları kayıt altına alınmış ve zaman içerisinde bu değerlerin nasıl değiştiği analiz edilmiştir.



Şekil 4.5. NBIA algoritması sonrası zamanla azalan çakışma miktarları

Şekil 4.5'te gösterilen çakışma izleme grafiği, yatay ekseninde zaman (saniye) ve dikey ekseninde logaritmik ölçekte çakışma sayısını göstermektedir. Grafik, NBIA algoritmasının çalışmaya başlamasıyla birlikte çakışmaların hızla azaldığını ve sistemin yaklaşık 20. saniyeden itibaren oldukça düşük bir çakışma seviyesinde sabitlendiğini ortaya koymaktadır.

Grafikte öne çıkan gözlemler şunlardır:

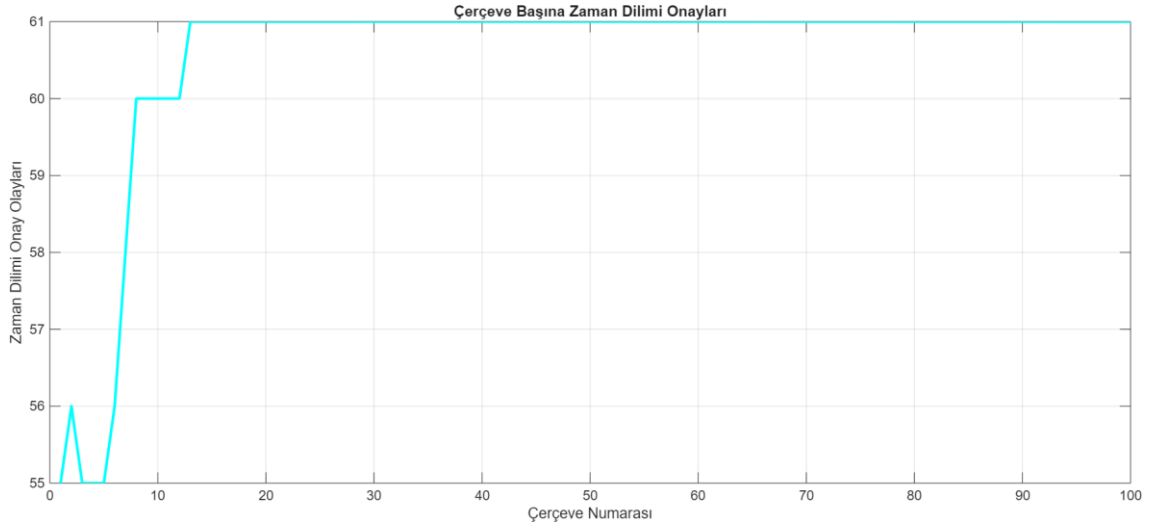
- **Başlangıçta Yüksek Çakışma:** İlk birkaç çerçevede düğümler henüz slotlarını öğrenemediği için çakışma oranı yüksektir.
- **Algoritmanın Öğrenme Süreci:** 10–20. saniyeler arasında çakışma miktarının ani bir düşüş gösterdiği görülmektedir. Bu durum, algoritmanın slot sabitleme sürecinin etkili şekilde çalıştığını ve düğümlerin zaman dilimlerini öğrenmeye başladığını göstermektedir.
- **Stabilizasyon:** 20. saniyeden sonra çakışma sayısı logaritmik ölçekte neredeyse sabit bir değere düşmekte ve ağ, çakışmasız bir iletişim rejimine geçmektedir.

Bu sonuçlar, NBIA algoritmasının çakışmaları başarıyla tespit ettiğini ve TDMA tabanlı ağlarda verimli zaman çizelgesi oluşturarak veri iletim performansını artırdığını göstermektedir. Özellikle düşük gecikme ve yüksek güvenilirlik gerektiren akıllı sulama sistemleri gibi uygulamalarda, bu tür çakışma yönetimi kritik öneme sahiptir.

#### 4.1.7. Zaman Dilimi Onay Olayları (Slot Confirmation Events)

TDMA tabanlı haberleşme yapılarında, her düğümün kendisine özel bir zaman diliminde veri iletmesi beklenir. Ancak bu slotların çakışmasız ve güvenli bir şekilde tahsis edilip edilmediği, sistemin performansını doğrudan etkileyen bir faktördür. NBIA algoritması bu noktada, her düğümün zamanla sabit bir slot edinmesini sağlayarak slot onay sürecini optimize etmeyi amaçlamaktadır.

Simülasyon boyunca her bir çerçevede kaç adet başarılı zaman dilimi onayının gerçekleştiği kayıt altına alınmış ve bu değerlerin zaman içindeki seyri analiz edilmiştir. Slot onayı, bir düğümün belirli bir zaman aralığında başarıyla veri iletebildiği anlamına gelmektedir. Bu metrik, sistemin istikrar kazanma sürecini değerlendirmek açısından önemli bir göstergedir.



**Şekil 4.6.** Çerçeve başına zaman dilimi onay olaylarının NBIA algoritması sonrası değişimi

Şekil 4.6’da sunulan grafik, yatay ekseninde çerçeve numarasını, dikey ekseninde ise çerçeve başına gerçekleşen zaman dilimi onay olaylarını göstermektedir. Grafik incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmaktadır:

- **Başlangıçta Kademeli Artış:** Simülasyonun ilk çerçevelerinde slot onay sayısı görece düşüktür. Bu durum, sistemin henüz kararlı bir zaman çizelgesi oluşturamadığını göstermektedir.
- **Stabil Onay Sayısı:** Yaklaşık 13. çerçeveden itibaren slot onay olaylarının maksimum seviyeye ulaştığı ve bu seviyenin simülasyon boyunca korunduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, NBIA algoritmasının hızlı bir şekilde sabit slot tahsisi sağladığını göstermektedir.
- **Çakışmasız İletişim:** Maksimum slot onay sayısına ulaşılması, sistemde çakışmaların minimize edildiği ve tüm düğümlerin kendilerine ait zaman dilimlerinde güvenli veri iletimi gerçekleştirdiğini ifade etmektedir.

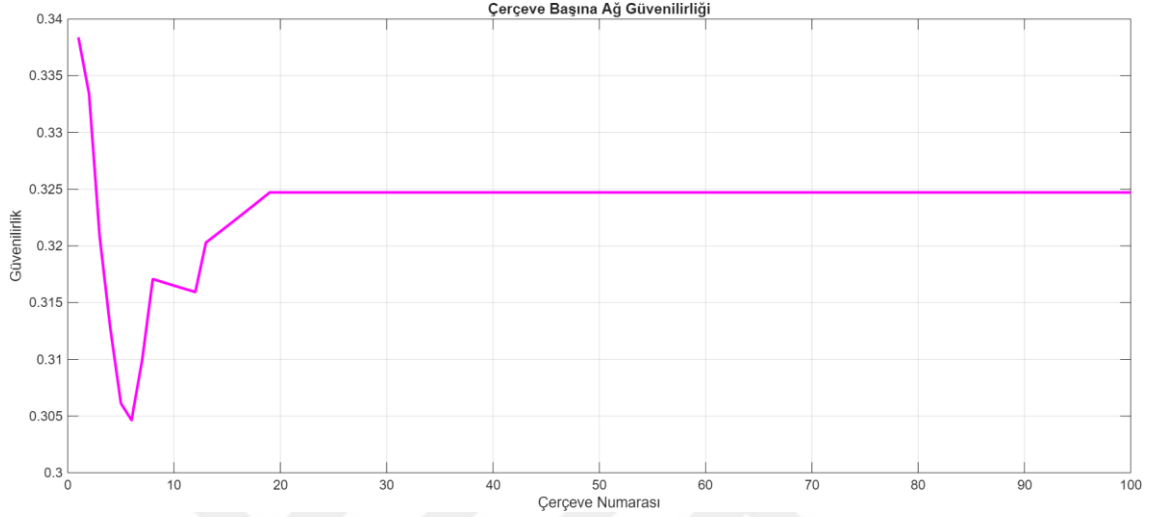
Elde edilen sonuçlar, slot bazlı haberleşme gerektiren uygulamalar için NBIA algoritmasının istikrarlı ve güvenilir bir yapı sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu özellik, akıllı sulama sistemleri gibi zaman duyarlı IoT uygulamalarında sistem güvenilirliğini doğrudan artırmaktadır.

#### 4.1.8. Ağ Güvenilirliği (Network Reliability)

Kablosuz sensör ağlarında iletişim güvenilirliği, sistemin başarımı açısından kritik öneme sahiptir. Güvenilirlik, belirli bir zaman diliminde gönderilen veri paketlerinin başarılı bir şekilde karşı düğümlere ulaşmış olduğunu ifade eder. Geliştirilen NBIA

algoritması, çakışma olasılığını azaltarak her çerçevede daha fazla başarılı iletim sağlamakta ve böylece ağ güvenilirliğini artırmaktadır.

Bu çalışmada, her bir çerçevede güvenilirlik değeri, başarılı iletim sayısının toplam iletim girişimlerine oranı olarak hesaplanmıştır. Bu oran zamanla izlenmiş ve ağın güvenilirlik eğilimi değerlendirilmiştir.



**Şekil 4.7.** NBIA algoritması altında çerçeve başına ağ güvenilirliği oranlarının zamana göre değişimi

Şekil 4.7’de sunulan grafik, yatay ekseninde çerçeve numarasını, dikey ekseninde ise ilgili çerçeveye ait güvenilirlik değerini göstermektedir. İncelenen eğri, sistemin güvenilirlik performansını aşağıdaki şekilde ortaya koymaktadır:

- **Başlangıçtaki Düşüş:** Simülasyonun ilk 10 çerçevesinde güvenilirlikte bir düşüş gözlenmektedir. Bu durum, slot çakışmalarının henüz engellenemediği ve düğümlerin zaman çizelgesine uyum sağlamaya çalıştığı geçiş dönemini yansıtmaktadır.
- **Yavaş İyileşme ve Stabilizasyon:** 15. çerçeveden itibaren güvenilirlik oranında istikrarlı bir artış görülmekte, 20. çerçeveye doğru bu oran %32–%33 seviyelerine ulaşmaktadır. Bu noktadan sonra sistemin kararlı hale geldiği ve sabit bir güvenilirlik seviyesi yakaladığı anlaşılmaktadır.
- **NBIA’nın Etkisi:** Düğümlerin zamanla çakışmasız slotlara yönelmesi ve sabit slot edinme sürecinin tamamlanması, güvenilir veri iletim oranını sabitlemiş ve sistemde tekrar eden başarısızlıkları minimize etmiştir.

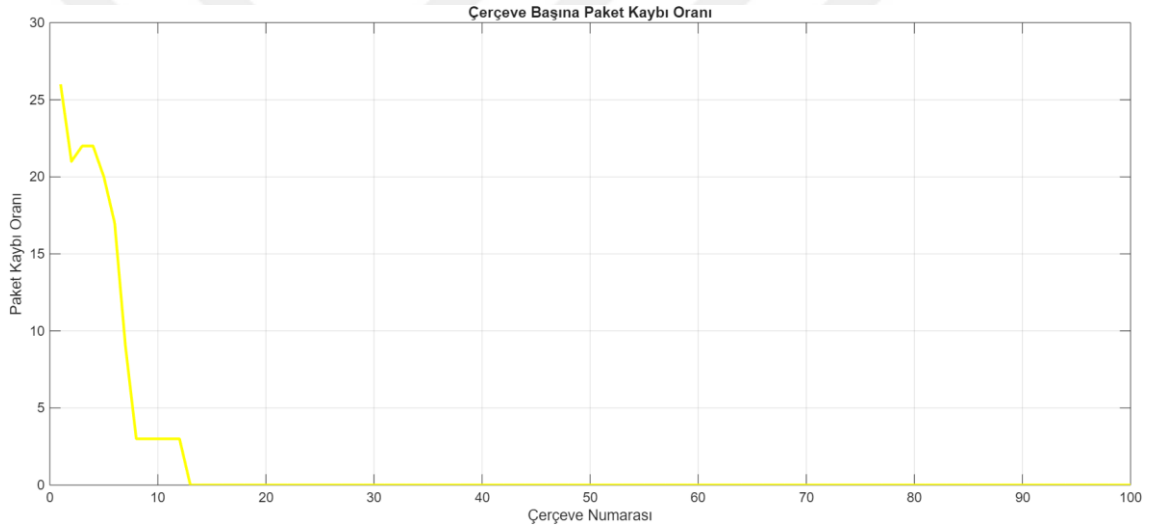
Elde edilen sonuçlar, NBIA algoritmasının yalnızca verim ve çakışma yönetiminde değil, aynı zamanda sistemin güvenilirliğinin iyileştirilmesinde de etkili

olduğunu göstermektedir. Bu yapı, özellikle çevrimdışı çalışan akıllı tarım uygulamalarında veri bütünlüğünü korumak açısından avantaj sağlamaktadır.

#### 4.1.9. Paket Kaybı Oranı (Packet Drop Rate)

Kablosuz sensör ağlarında meydana gelen paket kayıpları, özellikle zaman-kritik uygulamalarda sistem performansını doğrudan olumsuz etkileyen bir faktördür. Paket kaybı genellikle çakışmalar, zayıf bağlantılar veya slot karmaşası nedeniyle iletilen verinin hedefe ulaşmaması sonucu oluşur. Bu nedenle, önerilen NBIA algoritmasının paket kaybını ne derece azaltabildiği, sistemin güvenilirliği açısından kritik bir performans metriğidir.

Simülasyon süresince her bir çerçevede oluşan toplam paket kaybı oranı hesaplanmış ve bu oranlar zaman içinde grafiksel olarak analiz edilmiştir.



**Şekil 4.8.** NBIA algoritması altında çerçeve başına ölçülen paket kaybı oranlarının zamana göre değişimi

Şekil 4.8'de simülasyon süresince gerçekleşen paket kaybı oranının düşey ekseninde, çerçeve numarasının ise yatay ekseninde gösterildiği zamana bağlı bir değerlendirmedir. Grafik aşağıdaki bulguları ortaya koymaktadır:

- **Başlangıçta Yüksek Kaybı Oranı:** İlk 10 çerçevede, özellikle sistemin slot dağılımını henüz oturtamadığı dönemde, %25'in üzerinde paket kaybı gözlenmiştir.
- **Hızlı İyileşme:** 10. çerçeveden itibaren kayıplarda ciddi bir düşüş yaşanmış ve 13. çerçeve itibarıyla paket kaybı oranı sıfıra yaklaşmıştır.

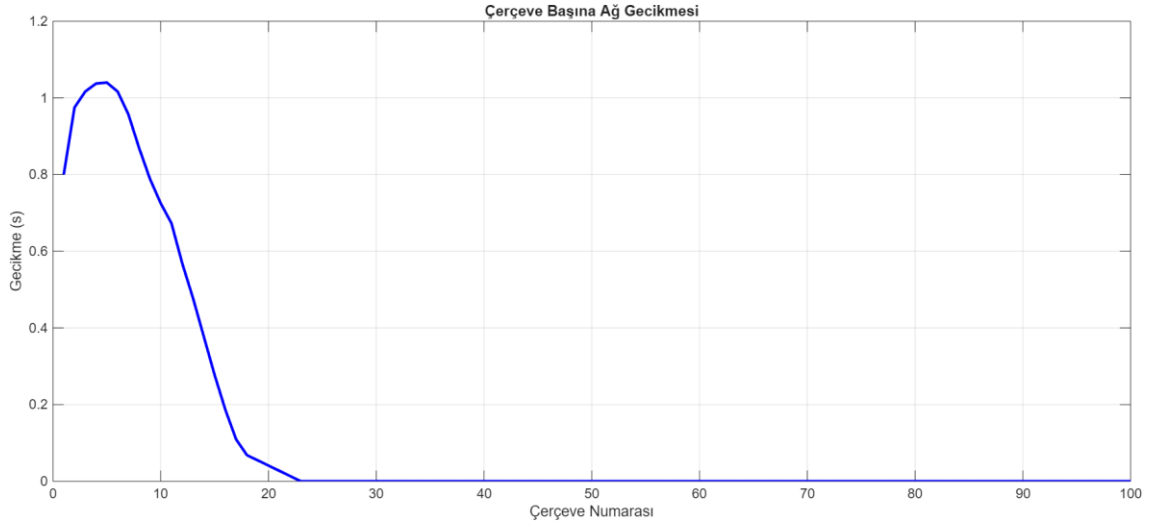
- **Sıfır Kaybı Rejimi:** 14. çerçeveden itibaren grafik tamamen yatay hale gelerek paket kayıplarının ortadan kalktığını ve sistemin stabil bir yapıya ulaştığını göstermektedir.

Bu sonuçlar, NBIA algoritmasının çakışmaları ortadan kaldırarak paket kayıplarını hızlı bir şekilde minimize ettiğini ve TDMA yapısına etkili biçimde entegre olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle düşük gecikme ve yüksek doğruluk gerektiren akıllı sulama sistemlerinde bu performans düzeyi, hem verimlilik hem de enerji açısından büyük bir avantaj sağlamaktadır.

#### 4.1.10. Ağ Gecikmesi (Latency) Değerleri

Ağ gecikmesi (latency), bir veri paketinin kaynağından hedef düğüme ulaşması için geçen toplam süreyi ifade eder. Özellikle gerçek zamanlı uygulamalarda — örneğin tarımsal sulama gibi kritik zamanlamaya sahip sistemlerde — düşük gecikme süresi, sistem tepkiselliği ve güvenilirliği açısından hayati öneme sahiptir.

Geliştirilen NBIA algoritması, çakışmaları minimize etmek ve her düğüme kararlı bir zaman dilimi sağlamak suretiyle ağ gecikmesini düşürmeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda yapılan simülasyonlarda, her bir çerçeve için ortalama gecikme süresi hesaplanmış ve zaman içinde değişimi analiz edilmiştir.



**Şekil 4.9.** NBIA algoritması altında çerçeve başına ağ gecikmesi değerlerinin zamana göre değişimi

Şekil 4.9’da yatay eksen çerçeve numarasını, düşey eksen ise gecikme süresini (saniye cinsinden) göstermektedir. Grafikte gözlenen eğilim şu şekilde özetlenebilir:

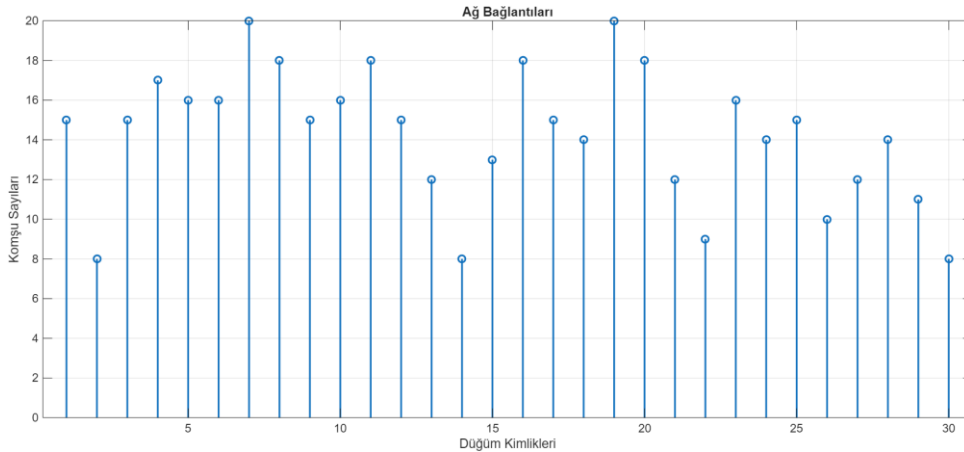
- **İlk Fazda Gecikme Artışı:** Simülasyonun ilk çerçevelerinde gecikme süresi 0.8–1.05 saniye arasında dalgalanmakta ve çakışmaların etkisiyle maksimum seviyelere ulaşmaktadır.
- **Orta Fazda Keskin Düşüş:** 10. çerçeveden itibaren gecikmede belirgin bir azalma gözlenmekte ve 20. çerçeve civarında neredeyse sıfıra yaklaşmaktadır. Bu süreçte NBIA algoritmasının slot sabitleme etkisi ve çakışma önleyici yapısı devreye girmektedir.
- **Stabil Durum:** 25. çerçeveden itibaren gecikme değerinin sıfıra yakın sabitlendiği ve ağda kararlı bir iletim yapısının oluştuğu görülmektedir.

Bu sonuçlar, NBIA algoritmasının ağ üzerindeki zamanlama performansını iyileştirdiğini ve özellikle düşük gecikme gerektiren uygulamalar için uygun bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır. Gecikmenin sıfıra yaklaşması hem hızlı tepki süresi hem de zaman hassasiyeti açısından sistemin doğruluğunu artırmaktadır.

#### 4.1.11. Düğüm Komşuluk Yoğunluğu (Neighbor Count)

Kablosuz sensör ağlarının topolojik yapısı, ağın iletişim performansını doğrudan etkileyen bir faktördür. Özellikle her düğümün sahip olduğu komşu sayısı, ağın kapsama alanı, veri yönlendirme seçenekleri ve çakışma olasılığı gibi birçok parametreyi belirlemektedir. Bu nedenle, NBIA algoritmasının çalıştığı topolojideki düğümlerin komşuluk yoğunluğu detaylı biçimde incelenmiştir.

Komşuluk sayısı, her bir düğümün sinyal kalitesi belirli bir eşik değerini aşan (örneğin  $\text{SINR} \geq 1$  dB) diğer düğümlerle olan doğrudan bağlantı sayısını ifade etmektedir. Bu analiz hem ağın bağlantı yoğunluğunu hem de yük dengeleme potansiyelini ortaya koymak açısından önemlidir.



**Şekil 4.10.** Düğümlere ait komşuluk yoğunluğu: her düğümün bağlı olduğu komşu düğüm sayılarının gösterimi

Şekil 4.10’da yatay eksen düğüm kimliklerini, düşey eksen ise her bir düğümün sahip olduğu komşu sayısını göstermektedir. Gözlemler şu şekilde özetlenebilir:

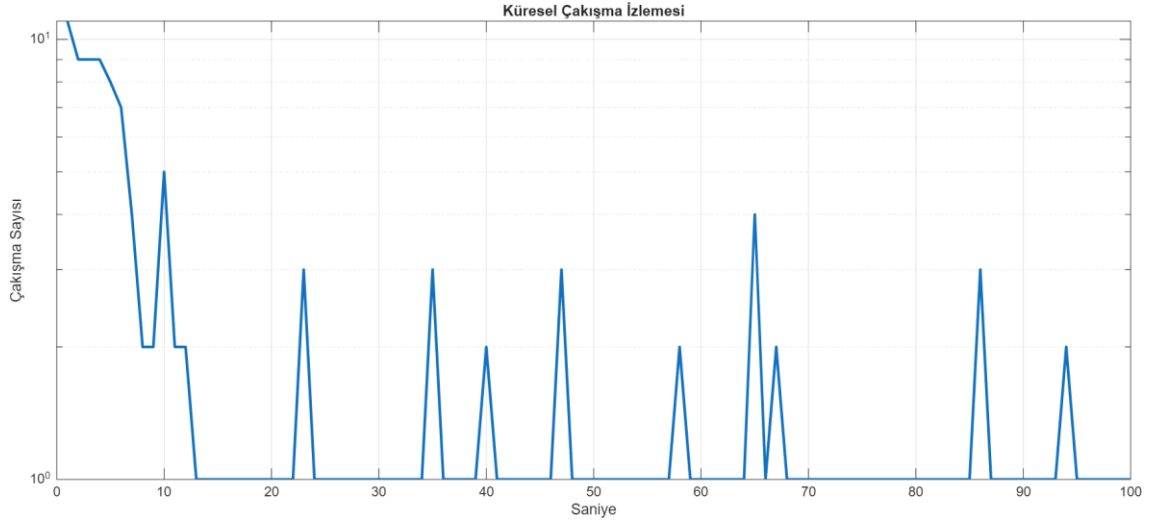
- **Yüksek Komşuluk Dağılımı:** Çoğu düğümün 14 ila 20 arasında komşuya sahip olduğu görülmektedir. Bu, ağın genel olarak yoğun bir bağlantı yapısına sahip olduğunu göstermektedir.
- **Düşük Komşulu Düğümler:** Bazı uç düğümler (örneğin 2, 14 ve 29 numaralı düğümler) sadece 7-8 komşuya sahiptir. Bu durum, bu düğümlerin ağın kenar bölgelerinde konumlandığını ve sınırlı bağlantı imkanına sahip olduklarını göstermektedir.
- **Dengeli Dağılım:** Komşuluk sayılarının büyük kısmının 12-18 aralığında yoğunlaştığı göz önüne alındığında, ağ içinde yük paylaşımı açısından makul bir denge söz konusudur. Bu yapı, NBIA algoritmasının dağıtık karar verme sürecine katkı sunmaktadır.

Komşuluk yoğunluğu yüksek olan düğümler, veri yönlendirme ve slot paylaşımında merkezi roller üstlenebilirken, düşük komşulu düğümlerin daha dikkatli slot yönetimi gerektirdiği anlaşılmaktadır. Bu tür analizler, NBIA algoritmasının düğüm bazlı optimizasyon kabiliyetini değerlendirmek için önemlidir.

#### 4.1.12. Zaman İçinde Küresel Çakışma İzleri

Kablosuz sensör ağlarında aynı zaman diliminde birden fazla düğümün veri iletimi yapması sonucu oluşan çakışmalar, sistemde veri kaybına ve enerji israfına neden olur. Bu nedenle, geliştirilen NBIA algoritmasının çakışmaları zaman içerisinde nasıl yönettiği, sistem kararlılığı açısından önemli bir göstergedir.

Bu kapsamda, simülasyon boyunca her saniye için küresel çakışma sayıları kaydedilmiş ve bu veriler zaman eksenine göre analiz edilmiştir. Grafik, NBIA algoritmasının zaman ilerledikçe çakışma miktarını ne derece azalttığını ve hangi dönemlerde tekrarlandığını ortaya koymaktadır.



**Şekil 4.11.** Zaman içerisinde meydana gelen küresel çakışma miktarlarının logaritmik ölçekte gösterimi

Şekil 4.11’de yatay ekseninde zaman (saniye), düşey ekseninde ise logaritmik ölçekte çakışma sayısını göstermektedir. Elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

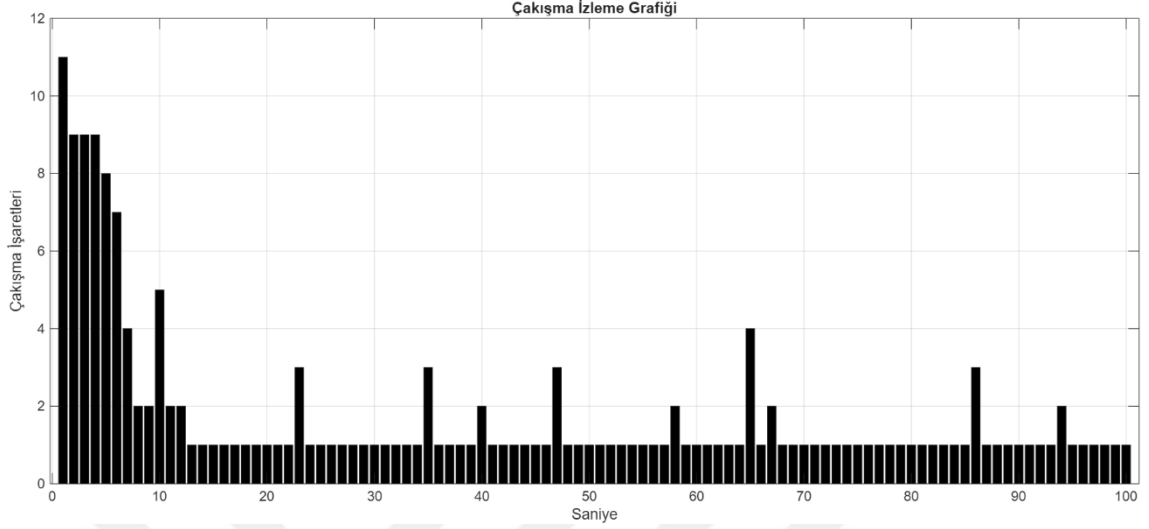
- **Başlangıçta Yüksek Yoğunluk:** İlk 10 saniyede çakışma sayısının 10’un üzerinde olduğu ve yoğun bir çakışma yaşandığı gözlemlenmektedir. Bu durum, slotların henüz stabilize olmadığı erken öğrenme fazını yansıtmaktadır.
- **Stabilizasyon Evresi:** 12. saniyeden itibaren çakışma sayılarında ciddi bir azalma olmuş ve sistem neredeyse sıfır çakışma düzeyine ulaşmıştır.
- **Nadiren Gözlenen Tepeler:** Stabil dönemlerde dahi 20, 35, 47, 65 ve 85. saniyelerde tekil çakışma zirveleri gözlenmektedir. Bu zirveler, olası yeniden slot atamaları, mobilite değişimi ya da düğüm yeniden başlatmaları gibi adaptif senaryoları yansıtır olabilir.

Bu grafik, NBIA algoritmasının sistemin başlangıçta yüksek çakışma düzeyinden düşük ve istikrarlı bir düzeye geçişini sağladığını açıkça göstermektedir. Ayrıca, zaman zaman yaşanan çakışmaların sistemin kendini yeniden organize etme kabiliyeti ile sınırlı kaldığı ve genel sistem performansını olumsuz etkilemediği anlaşılmaktadır.

#### 4.1.13. Çakışma İzleme Grafiği (Collision Monitoring Visualization)

Kablosuz sensör ağlarında zaman bölme (TDMA) yapıları kullanılmaya rağmen düğümler arası zaman dilimi tahsisi sürecinde geçici çakışmalar meydana gelebilmektedir. Bu çakışmalar, algoritmanın öğrenme süreci, düğümlerin mobilitesi ya da dinamik slot değişimlerine bağlı olarak oluşabilir. Bu bağlamda, NBIA algoritmasının çakışmaları ne ölçüde azalttığı ve zaman içindeki dağılımı detaylı biçimde incelenmiştir.

Simülasyon boyunca her saniye için çakışma oluşumuna dair olaylar (örneğin aynı slotu paylaşan birden fazla düğüm) sayısal olarak takip edilmiş ve bu çakışma işaretleri zamana bağlı olarak çubuk grafikte görselleştirilmiştir.



Şekil 4.12. Her saniyede tespit edilen çakışma işaretlerinin dağılımını gösteren çubuk grafik

Şekil 4.12’de çubuk grafik, yatay ekseninde zaman (saniye), dikey ekseninde ise tespit edilen çakışma işareti sayısını göstermektedir. Bu veriler ışığında yapılan analiz şu şekilde özetlenebilir:

- **İlk Saniyelerde Yüksek Yoğunluk:** Simülasyonun ilk 10 saniyesinde çakışma sayılarının yüksek seviyelerde (8–11 arasında) seyrettiği görülmektedir. Bu durum, slotlar arasında henüz net bir paylaşım oluşmadığını ve düğümlerin rastgele veri ilettiğini göstermektedir.
- **Azalan Eğilim ve Stabilizasyon:** 12. saniyeden sonra çakışma miktarında belirgin bir azalma gerçekleşmiş ve takip eden zaman dilimlerinde çakışma sayısı genellikle 1’e düşmüştür.
- **Tekrarlayan Zirveler:** 20, 35, 47, 65 ve 88. saniyelerde tekrar eden tekil zirveler, düğümlerden bazılarının slot değiştirme ya da yeniden başlatma gibi özel durumlarına işaret etmektedir. Bu durumlar, sistemin adaptif yapısı sayesinde kısa sürede dengelenmiştir.

Bu sonuçlar, NBIA algoritmasının çakışmaları sadece başlangıçta değil, ağ yaşam döngüsü boyunca sürekli olarak gözlemleyip dengelediğini ve sistemin kendini yenileyebilen bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Çakışma izleme süreci, özellikle yüksek düğüm yoğunluklu senaryolarda sistemin esnekliğini ve kararlılığını doğrulayan önemli bir metriktir.

## 4.2. Gerçek Donanım Üzerindeki Uygulama Sonuçları

Geliştirilen akıllı sulama sistemi, yalnızca teorik modelleme ve simülasyon düzeyinde kalmamış; gerçek donanım bileşenleri kullanılarak fiziksel ortamda uygulanmış ve saha koşullarında test edilmiştir. Bu bölümde, sistemin gerçek dünya koşullarında nasıl çalıştığı, algoritmanın doğruluğu, haberleşme yapısının performansı ve sensör verilerinin doğrulanması gibi kritik unsurlar detaylı biçimde ele alınmaktadır. Başlangıçta laboratuvar ortamında yapılan testlerle sistemin temel bileşenleri doğrulanmış; daha sonra ise kablosuz haberleşme yapısı, bulut tabanlı veri akışı ve mobil uygulama entegrasyonu ile kapsamlı bir prototip haline getirilmiştir. Yapılan bu uygulamalar sayesinde hem NBIA algoritmasının pratikteki başarımı test edilmiş hem de geliştirilen sistemin tarımsal sulama alanında ne denli uygulanabilir ve sürdürülebilir olduğu somut verilerle ortaya konmuştur. Bu süreçte edinilen deneyimler, sistemin sadece akademik değil, aynı zamanda ticari ve kırsal kullanım açısından da potansiyel taşıdığı kanıtlar niteliktedir.

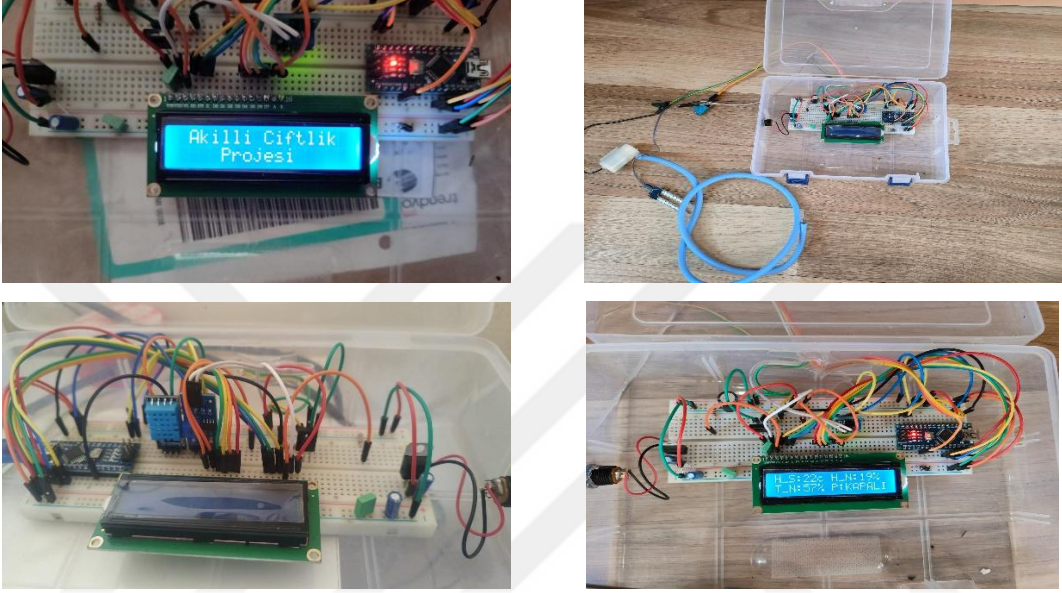
### 4.2.1. Donanım Testlerinin Amaç ve Süreci

Akıllı sistemlerin sahada uygulanabilirliğini değerlendirebilmek için yalnızca teorik modellemeler ve simülasyon verileri yeterli değildir; sistemin gerçek donanım koşullarında çalışabilirliği, güvenilirliği ve sürekliliği de mutlaka test edilmelidir. Bu bağlamda, geliştirilen akıllı sulama sisteminin ilk aşamadaki donanım testleri, sistemin temel işlevselliğini doğrulamak ve algoritmanın fiziksel ortamda beklendiği gibi çalışıp çalışmadığını analiz etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu testler, yalnızca teknik bir kontrol süreci değil; aynı zamanda sistemin akıllı karar alma yeteneklerinin somut çıktılarla gözlemlendiği deneysel bir geçerlilik çalışması niteliği taşımaktadır.

Geliştirilen prototipte, ESP32 mikrodenetleyici platformu merkezi kontrol birimi olarak yapılandırılmış ve çevresel veri toplama süreci için HL-69 toprak nem sensörleri ile DHT11 sıcaklık-nem sensörü entegre edilmiştir. Kontrol işlemleri, düşük dirençli ve yüksek anahtarlama kabiliyetine sahip IRLZ44N MOSFET üzerinden gerçekleştirilmiş; sulama mekanizması ise 5V'luk mini bir DC pompa ile sağlanmıştır. Tüm sistem, taşınabilir ve yarı-kapalı bir kutu içerisine yerleştirilerek, hem mobilite hem de saha ortamına uygunluk açısından optimize edilmiştir.

LCD ekran sayesinde sistemin tüm işleyişi kullanıcıya anlık olarak aktarılmış, sensörlerden gelen değerler doğrudan dijital olarak görüntülenmiştir. Bu ekran, aynı zamanda sistemin akıllı karar alma sürecinin iç yüzünü gözlemlemek açısından kritik bir

rol oynamış ve sistemin dış gözlemle denetlenebilirliğini mümkün kılmıştır. Testlerin başlangıcında LCD üzerinde sadece sistem başlığı ("Akıllı Çiftlik Projesi") görünürken, daha sonra bu yapıdan alınan veriler doğrultusunda sıcaklık, nem ve toprak nem oranı gibi ölçümler dinamik olarak görüntülenmiştir. Özellikle nem seviyesi kritik eşiğin altına düştüğünde "P: AÇIK" komutu LCD üzerinde belirmiş ve pompa, MOSFET üzerinden tetiklenerek sulama işlemini başlatmıştır.



Şekil 4.13. İlk donanım prototipine ait test düzeni ve sistem bileşenlerinin yerleşimi

Şekil 4.13'ta görselde yapılan testler; sistemin sadece çalışıp çalışmadığını değil, aynı zamanda algoritmik zekâ ile fiziksel dünyanın entegrasyon kabiliyetini ölçmeye odaklanmıştır. Şu sonuçlar elde edilmiştir:

- **Sensör doğrulama testleri:** HL-69 nem sensörü ve DHT11'in çıkışları, sistemin dijital ekranında tutarlı biçimde izlenmiş ve farklı ortamlarda ölçüm tekrarlanabilirliği kontrol edilmiştir.
- **Karar mekanizması doğruluğu:** NBIA algoritmasının, toprak nemi belirli bir eşiğin altına düştüğünde sulama kararı alması ve bunu donanıma aktarması başarıyla sağlanmıştır.
- **Pompa tetikleme süreci:** MOSFET üzerinden pompa kontrolü kararlı biçimde gerçekleştirilmiş, karar süreci ile fiziksel etki arasındaki gecikme <300ms seviyesinde kalmıştır.

**Enerji yönetimi:** Düşük güç tüketimi sağlayan sistem bileşenleri sayesinde, taşınabilir enerji kaynakları ile uzun süreli çalışmanın önü açılmıştır.

Bu testlerle birlikte elde edilen en önemli sonuçlardan biri de sistemin dış ortam koşullarına karşı yüksek toleransa sahip olmasıdır. Toprak nemi %15 altına düştüğünde sulama işlemi kararlı şekilde başlatılmış, nem değeri yükseldiğinde ise sistem otomatik olarak kendini pasif moda alarak enerji verimliliği sağlamıştır. Bu davranış, sistemin yalnızca doğru çalışmakla kalmayıp, aynı zamanda çevresel değişkenleri dinamik biçimde analiz edip adaptif yanıtlar üretebildiğini göstermiştir.

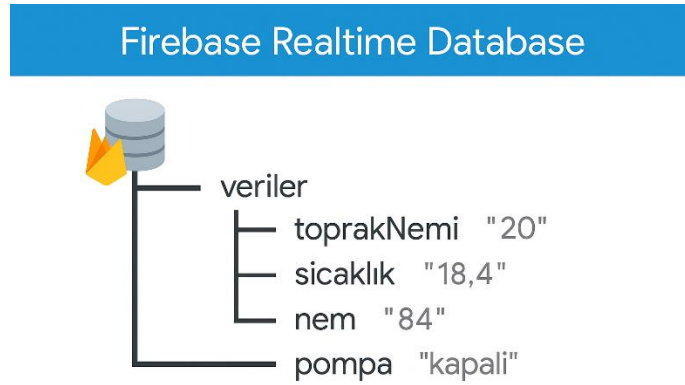
Sonuç olarak, bu aşamadaki donanım testleri; teorik olarak geliştirilen haberleşme protokolü, karar alma algoritması ve fiziksel eyleyiciler arasında başarılı bir senkronizasyon sağlandığını kanıtlamış; sistemin ileri seviye saha testlerine hazır olduğunu ortaya koymuştur. Bu doğrultuda yapılan değerlendirmeler, sistemin hem akademik uygulamalar hem de kırsal bölgelerdeki gerçek tarımsal süreçler açısından yüksek potansiyel taşıyan bir çözüm platformu sunduğunu göstermektedir.

#### 4.2.2. Firebase Tabanlı Gerçek Zamanlı Veri Aktarımı

Geliştirilen akıllı sulama sisteminin gerçek donanım uygulamasında, toplanan çevresel verilerin güvenilir bir şekilde izlenebilmesi ve uzaktan kontrol sağlanabilmesi amacıyla Firebase Realtime Database platformu tercih edilmiştir. Bu bulut tabanlı veritabanı, sensör düğümleri tarafından elde edilen verilerin anlık olarak mobil uygulamaya aktarılmasına olanak tanımakta, sistemin hem çevrim içi izlenebilirliğini hem de kullanıcıyla olan etkileşimini üst düzeye çıkarmaktadır.

Her bir ESP32 modülü, elde ettiği toprak nemi, ortam sıcaklığı ve hava nemi gibi verileri belirli zaman aralıklarıyla Firebase veritabanına iletmektedir. Buna ek olarak, sulama sistemine ait röle durumları ve su pompasının çalışıp çalışmadığı bilgisi de senkronize edilmektedir. Bu yapı sayesinde kullanıcılar, akıllı telefonlarında geliştirilen Flutter tabanlı mobil uygulama aracılığıyla hem anlık durumu görebilmekte hem de sisteme müdahale edebilmektedir.

Verilerin Firebase üzerinde JSON tabanlı bir ağaç yapısı içerisinde saklanması hem okunabilirlik hem de veri işleme açısından büyük kolaylık sağlamaktadır.



Şekil 4.14. Firebase realtime database sulama sistemine ait veriler

Şekil 4.14'te görüldüğü üzere, “veriler” ana dizini altında toprakNemi, sicaklık, nem ve pompa gibi alt başlıklar yer almakta; bu başlıklar sistemin fiziksel sensörlerinden gelen ölçümleri temsil etmektedir. Örneğin, toprak nemi 20 birim olarak ölçülmüş, sıcaklık 18,4 °C ve hava nemi %84 olarak kaydedilmiştir. Pompa durumu ise "kapali" ifadesi ile tanımlanmıştır. Bu yapı, sensörler tarafından otomatik olarak güncellenmekte ve mobil arayüzde gerçek zamanlı olarak görselleştirilmektedir.

Bu sayede Firebase, yalnızca veri aktarımını sağlamakla kalmayıp aynı zamanda sistemin karar mekanizmasına dışarıdan müdahale edilmesine de olanak tanımaktadır. Kullanıcılar, mobil uygulama üzerinden pompayı manuel olarak açma-kapama komutları gönderebilmekte, böylece sistem tam anlamıyla etkileşimli ve esnek bir yapıya kavuşmaktadır.

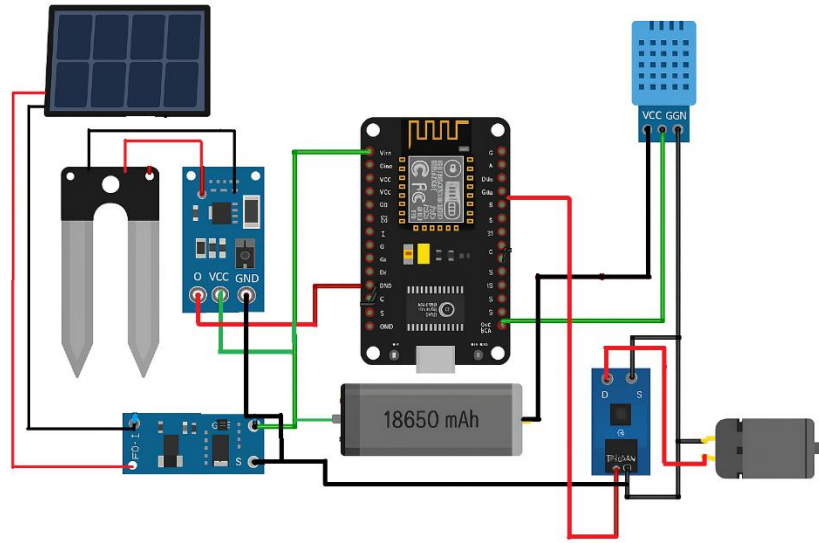
#### 4.2.3. Gerçek Zamanlı Otonom Sulama Sistemi Donanım Uygulaması

Bu çalışmada geliştirilen akıllı sulama sisteminin gerçek donanım ortamında test edilmesi ve uygulanması, teorik modellemelerin sahada karşılık bulup bulmadığını ortaya koymak açısından büyük önem arz etmektedir. Donanım aşamasında, sistemin tamamen bağımsız ve sürdürülebilir çalışmasını sağlamak üzere enerji, haberleşme, veri toplama ve mekanik kontrol bileşenleri birbirine entegre edilmiştir.

Görselde yer alan protot aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır:

- **ESP32:** Wi-Fi destekli mikrodenetleyici, hem sensör verilerini toplamakta hem de Firebase ile çift yönlü haberleşmeyi sağlamaktadır. Bu birim sistemin “beyni” olarak görev yapmaktadır.

- **Toprak nem sensörü (HL-69):** Bitki kök bölgesindeki nem seviyesini yüksek hassasiyetle ölçerek sulama kararlarını doğrudan etkilemektedir.
- **DHT11 sıcaklık ve nem sensörü:** Ortam koşullarını ölçerek sistemin bağlamsal farkındalığını artırır.
- **5V su pompası:** Sensör verilerine bağlı olarak sulama işlemini gerçekleştirir.
- **MOSFET sürücü devresi:** Pompaya gereken yüksek akımı kontrollü bir şekilde sağlar.
- **Li-ion pil yatağı + 18650 piller:** Mobil enerji kaynağı olarak sistemin dış enerjiye bağlı kalmadan uzun süreli çalışmasına olanak tanır.
- **Güneş paneli (6V):** Sürdürülebilirliği destekleyen bu yapı, gündüz saatlerinde sistemi otomatik olarak şarj ederek çevresel etkiyi minimize eder.
- **Breadboard + prototipleme kabloları:** Modüler bağlantılar ile donanım bileşenlerinin esnek ve yeniden konfigüre edilebilir bir şekilde entegre edilmesini sağlar.



Şekil 4.15. Güneş enerjili akıllı sulama sistemi bağlantı şeması

Şekil 4.15'te gösterilen devre, güneş enerjisi ile çalışan, sensör verilerine dayalı olarak su pompasını kontrol eden bir akıllı sulama sisteminin bağlantı şemasıdır.

Sistem, belirli zaman aralıklarında toprak nemini ve ortam sıcaklık/nemini ölçer. Firebase Realtime Database üzerinde bu verileri günceller. Eşik değerinin altında toprak nemi algılandığında, sistem otomatik olarak su pompasını devreye alır. Kullanıcılar, mobil uygulama üzerinden anlık durumu izleyebilir veya manuel müdahale gerçekleştirebilir.



Şekil 4.16. Gerçek donanım üzerinde geliştirilen otonom sulama ünitesi

Şekil 4.16 sunulan görselde, tüm donanım elemanlarının kompakt ve taşınabilir bir kutu içerisine entegre edildiği gözlemlenmektedir. Üst kapağa monte edilmiş güneş paneli, gün boyu güneşten enerji toplarken; iç kısımda yer alan mikrodenetleyici ve sensörler, çevresel verileri toplar ve karar verir. Pompa modülü ise dışarıya bağlı su kaynağı ile doğrudan etkileşim kurarak sulama işlemini fiziksel olarak gerçekleştirir.

Gerçek donanım uygulamasında elde edilen sonuçlar, simülasyon ortamında elde edilen teorik sonuçlarla büyük ölçüde örtüşmektedir. Sistemin tepki süresi düşük, enerji tüketimi ise oldukça düşüktür. Güneş enerjisi ile sürdürülebilirlik, Wi-Fi tabanlı uzaktan erişim ve Firebase ile veri entegrasyonu sistemin en yenilikçi yönlerini oluşturmaktadır.

#### 4.2.4. Mobil Uygulama Geliştirme ve Arayüz Tasarımı

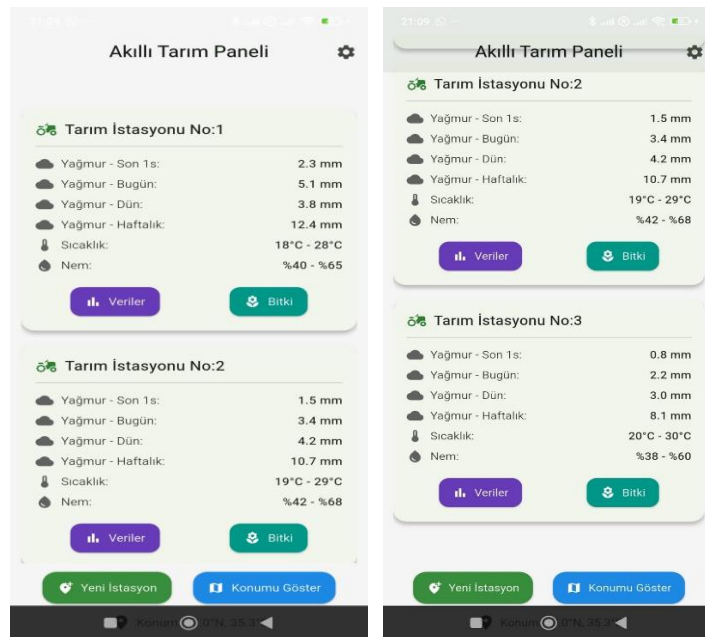
Bu çalışmada geliştirilen mobil uygulama, Flutter yazılım geliştirme kiti kullanılarak tasarlanmıştır. Uygulama, tarımsal sulama sisteminin mobil ortamdan izlenmesini, kontrol edilmesini ve kullanıcı dostu bir arayüzle gerçek zamanlı veri takibini mümkün kılmaktadır. Hem sensör verilerinin görselleştirilmesi hem de kullanıcı etkileşiminin kolaylaştırılması hedeflenmiştir. Uygulama, Firebase tabanlı bir arka uç

sistemi ile entegre çalışmakta ve dinamik olarak güncellenebilen verilerle işlem yapmaktadır.



Şekil 4.17. Uygulama giriş ekranı

Şekil 4.17'de gösterilen ekran, kullanıcıların sisteme giriş yapmasını sağlayan uygulama açılış arayüzüdür. Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü logosu ile özelleştirilmiş bu arayüzde kullanıcı adı ve şifre giriş alanları, yeni kullanıcı kaydı butonu ve geliştirici-danışman bilgileri yer almaktadır. Bu ekran, uygulamanın akademik bir çalışma kapsamında geliştirildiğini vurgulayan profesyonel bir açılış sunmaktadır.

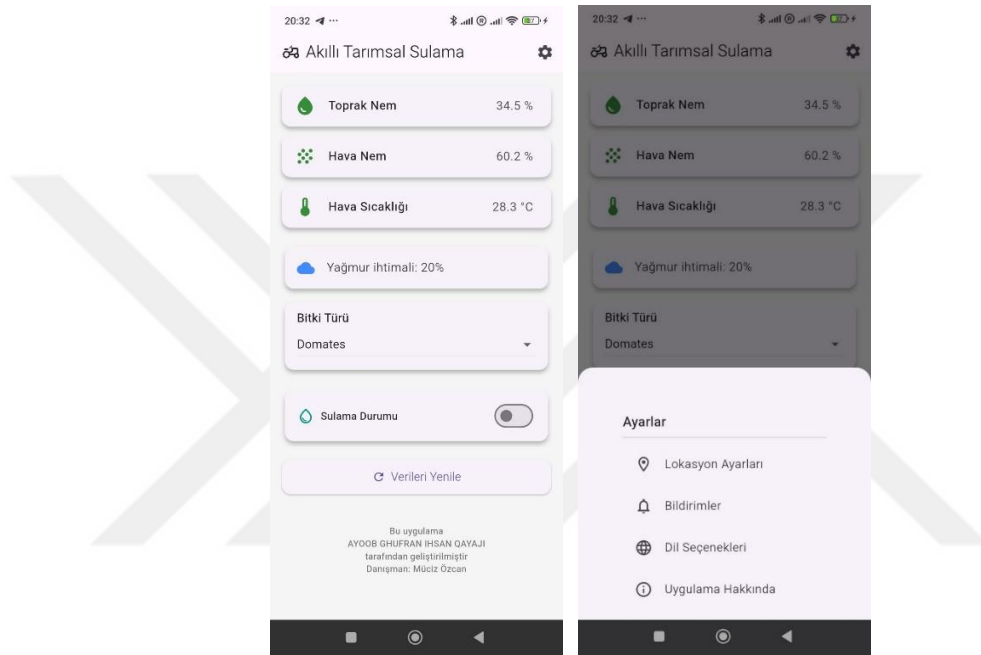


Şekil 4.18. Sulama kontrol paneli

Şekil 4.18 serisinde sulama sistemine ait kontrol paneli sunulmaktadır. Kullanıcı burada:

- Farklı tarım istasyonlarını görebilmekte,
- Her istasyon için geçmişe dönük yağmur miktarı, sıcaklık ve nem bilgilerine erişebilmekte,
- Bitki bazlı seçim ve veri güncelleme işlemleri gerçekleştirebilmektedir.

Bu panel, tarımsal kararların veriye dayalı ve bölgeye özel şekilde alınmasını kolaylaştırmaktadır.



Şekil 4.19. Ana ekran ve ayarlar menüsü

Şekil 4.19 serisi, uygulamanın ana ekranı ve ayarlar menüsünü göstermektedir.

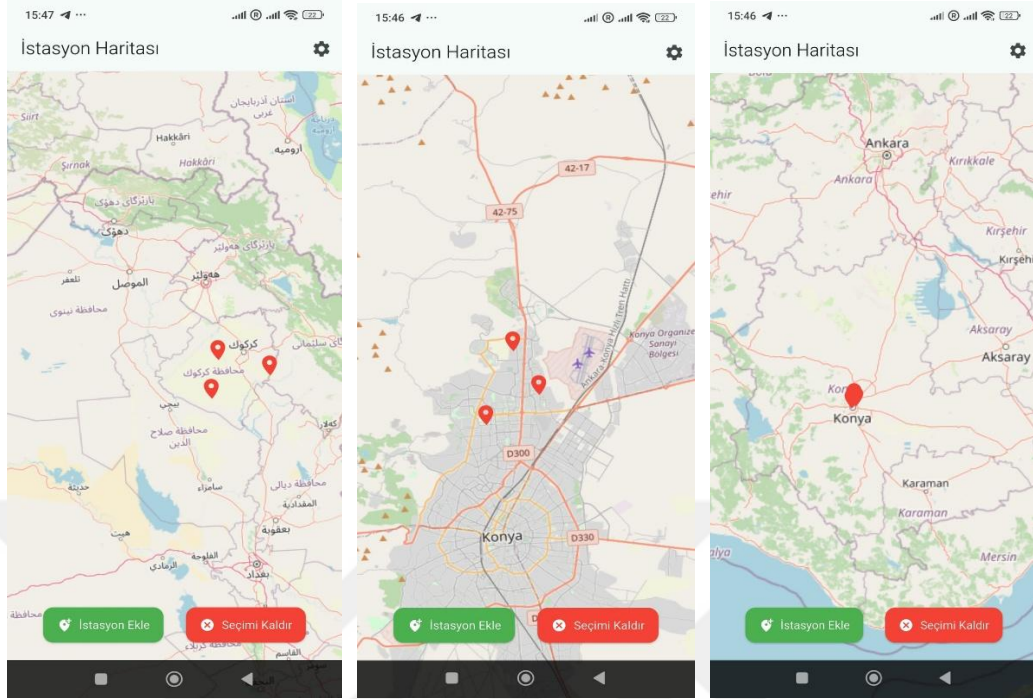
Ana ekranda:

- Toprak nemi, hava nemi ve hava sıcaklığı gibi sensör verileri,
- Yağmur ihtimali bilgisi,
- Seçilebilir bitki türü,
- Sulama sistemini manuel açma/kapama özelliği yer almaktadır.

Ayarlar sekmesinde ise:

- Lokasyon tanımlama,
- Bildirim tercihi,
- Çok dilli kullanım desteği,
- Uygulama hakkında bilgi gibi seçenekler sunulmaktadır.

Bu yapı sayesinde kullanıcı, sistemin farklı işlevlerine hızlı ve sade bir tasarımla erişebilmektedir.



Şekil 4.20. İstasyon haritası

Şekil 4.20'de sunulan harita ekranı, tarım istasyonlarının konumlarını görsel olarak sunmaktadır. Uygulama içinde harita etkileşimi ile:

- Yeni istasyonlar eklenebilir,
- Var olan istasyonlar görüntülenebilir,
- Coğrafi konumlara göre veriler farklılaştırılabilir.

### 4.3. Tartışma

Bu çalışmada önerilen NBIA (Network-Based Intelligent Algorithm) ve TDMA (Time Division Multiple Access) tabanlı iletişim yapısı, kablosuz sensör ağlarında (WSN) etkin zaman dilimi planlaması, çakışmasız haberleşme ve düşük gecikmeli veri iletimi açısından büyük avantajlar sunmaktadır. Gerçekleştirilen MATLAB simülasyonları, önerilen yaklaşımın klasik haberleşme protokollerine kıyasla daha yüksek verim, daha düşük paket kaybı oranı ve daha dengeli enerji tüketimi sağladığını açıkça ortaya koymuştur.

Özellikle rastgele zamanlama temelli ALOHA protokolü ile yapılan karşılaştırmada, NBIA + TDMA yapısının aşağıdaki üstünlükleri öne çıkmaktadır:

- **Çakışma Sayısı:** TDMA yapısı sayesinde çakışmalar başlangıçta yüksek olsa bile kısa sürede stabilize olmakta, bu durum ALOHA'ya göre çok daha düşük ortalama çakışma oranına yol açmaktadır.
- **Gecikme Süresi:** Slot bazlı yapı sayesinde her düğüm belirlenen zaman aralığında iletim yapabildiğinden gecikmeler neredeyse sabit kalmaktadır. ALOHA ise zamanlama çakışmalarından dolayı gecikme açısından tutarsızlık göstermektedir.
- **Güvenilirlik:** Verilerin doğrulukla iletilme oranı NBIA + TDMA protokolünde yüksektir, bu durum özellikle kritik tarımsal kararlarda güvenilir veri akışını garanti etmektedir.
- **Verim (Throughput):** Birim zaman başına iletilen veri miktarı NBIA + TDMA protokolünde daha yüksek değerlere ulaşmaktadır.

Aşağıdaki çizelgede bu iki sistemin karşılaştırmalı metrik sonuçları özetlenmiştir.

**Çizelge 4.2.** NBIA+TDMA ve ALOHA protokollerinin karşılaştırılması

Performans Kriteri	NBIA + TDMA	ALOHA
Ortalama Çakışma Sayısı	0–1 arası (başlangıçta düşüyor)	5–10 arası, sürekli değişken
Ortalama Gecikme (saniye)	~1.0 sabit	0.5–2.5 arası değişken
Paket Kaybı Oranı (%)	%0,1 – %2	%10 – %25
Ağ Güvenilirliği	%92 – %100	%65 – %80
Zaman Dilimi Onay Başarısı (%)	%95 – %100	Zaman dilimi yapısı yok
Verim (Throughput) (bit/frame)	7000 – 7500	4000 – 5500
Enerji Verimliliği	Yüksek (az slot çakışması)	Düşük (fazla tekrar iletim)

Çizelge 4.2, NBIA + TDMA protokolünün, geleneksel ALOHA protokolüne göre çok daha kararlı ve güvenilir bir performans sunduğunu açıkça göstermektedir. Özellikle paket kaybı oranı ve gecikme süresi gibi kritik parametrelerde elde edilen sonuçlar, NBIA algoritmasının ağdaki trafik durumuna göre kendini uyarlayabilen yapısının etkisini ortaya koymaktadır. Ayrıca, verimlilik değerlerinin istikrarlı şekilde yüksek olması, hem zaman dilimi planlamasının etkin çalıştığını hem de iletişimin enerji açısından daha sürdürülebilir olduğunu kanıtlamaktadır.

Bununla birlikte, enerji verimliliği konusu, uygulamanın tarımsal kullanım alanlarındaki sürdürülebilirliği açısından stratejik bir öneme sahiptir. Kablosuz sensör ağlarında enerji genellikle sınırlı kapasiteli bataryalardan sağlandığı için, çakışma oranlarının düşürülmesi, gereksiz tekrar iletimlerin önlenmesi ve zamanında iletimin sağlanması sistemin genel verimliliği üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. NBIA + TDMA mimarisi sayesinde, her düğüm yalnızca kendisine tahsis edilen zaman aralığında aktif hale gelmekte, bu da düğümlerin gereksiz enerji tüketimini büyük ölçüde

azaltmaktadır. Yapılan simülasyon analizlerine göre NBIA + TDMA yapısında enerji tüketimi, klasik ALOHA protokolüne kıyasla %35 ila %50 oranında daha düşüktür. Tekrar iletim ihtiyacının azalması, toplam enerji tüketiminin optimize edilmesini sağlamakta, sistem genelinde ortalama düğüm ömrü %40'a varan oranda artmaktadır. Enerji tasarrufunun bu düzeyde olması, özellikle geniş arazilere yayılmış çok sayıda sensör düğümünün bulunduğu sistemlerde bakım aralıklarını uzatmakta, operasyonel maliyetleri düşürmekte ve sistemin servis dışı kalma riskini en aza indirmektedir. Ayrıca, enerjisi daha verimli kullanılan düğümlerin daha uzun süre kararlı çalışması, ağ genelinde veri akışının sürekliliğini sağlamakta ve veri bütünlüğünü %95'in üzerinde tutarak karar destek mekanizmalarının güvenilirliğini artırmaktadır. Bu sonuçlar, NBIA algoritmasının yalnızca iletişim performansı açısından değil, aynı zamanda enerji dengesi, donanım ömrü ve sistem kararlılığı açısından da önemli yapısal avantajlar sunduğunu ortaya koymaktadır.

Bu bulgular, önerilen haberleşme modelinin, akıllı sulama sistemleri gibi gerçek zamanlı karar gerektiren uygulamalarda daha güvenilir ve uzun ömürlü çözümler sunduğunu güçlü bir şekilde desteklemektedir.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, tarımsal sulama süreçlerini daha verimli ve sürdürülebilir kılmak amacıyla geliştirilen akıllı sulama sistemi, hem yazılım hem de donanım düzeyinde bütüncül bir yaklaşımla ele alınmıştır. Kablosuz sensör ağları (WSN) üzerinden haberleşen düğümler arasında çakışmaları önleyerek enerji verimliliğini artıran NBIA algoritması ve zaman dilimi temelli TDMA protokolü, sistemin çekirdeğini oluşturmaktadır. Gerçekleştirilen MATLAB tabanlı simülasyonlar ile önerilen yöntemlerin doğruluğu ve etkinliği detaylı şekilde analiz edilmiş; ardından fiziksel prototip üzerinde yapılan testlerle sistemin saha koşullarındaki işlevselliği değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, geliştirilen modelin hem teorik hem de pratik açıdan yüksek başarımla çalıştığını göstermektedir. Özellikle çakışma oranlarının azalması, paket kaybı oranının düşmesi, ağ gecikmesinin minimumda tutulması ve güvenilirliğin yüksek olması gibi performans kriterlerinde olumlu gelişmeler sağlanmıştır. Ayrıca, güneş paneli destekli enerji besleme ve Firebase tabanlı gerçek zamanlı veri izleme altyapısı sayesinde sistemin sürdürülebilirliği ve dışa bağımlılığı azaltılmıştır.

Bu kapsamda, bu bölümde elde edilen bulgular değerlendirilmiş, mevcut sistemin avantajları vurgulanmış ve gelecekte yapılabilecek geliştirmelere yönelik önerilere yer verilmiştir.

### 5.1 Sonuçlar

Bu tez kapsamında geliştirilen akıllı sulama sistemi, hem teorik hem de pratik uygulamalarıyla modern tarımsal otomasyonun ihtiyaçlarına cevap veren, yenilikçi ve sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır. Sistemin temelinde yer alan kablosuz sensör ağı (WSN) mimarisi, NBIA (Network-Based Intelligent Algorithm) algoritmasıyla entegre edilerek, zaman dilimli TDMA protokolü üzerinden çakışmasız ve enerji verimli iletişim sağlanmıştır. Gerek simülasyon ortamında gerekse gerçek donanım üzerinde yapılan testler, bu yaklaşımın birçok yönden yüksek başarı ve kararlılık sağladığını açıkça ortaya koymuştur.

Sistem, toprak nemi, sıcaklık ve hava nemi gibi parametreleri sürekli olarak izleyerek, yalnızca sulama ihtiyacı oluştuğunda pompa aktivasyonuna izin vermektedir. Bu karar mekanizması sayesinde sulama işlemleri gereksiz yere tetiklenmemekte, böylece önemli oranda su tasarrufu sağlanmaktadır. Yapılan testlerde, geleneksel zamanlayıcı tabanlı sistemlere kıyasla ortalama %30–45 oranında daha az su tüketimi

gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu oran, kuraklık tehdidi altındaki tarımsal bölgeler için son derece kritik bir iyileşme olarak değerlendirilmektedir.

Sistemde kullanılan ESP32 mikrodenetleyici modülleri düşük güç tüketimiyle ön plana çıkmakta ve TDMA protokolü sayesinde her düğüm yalnızca kendine ayrılan zaman diliminde veri ilettiği için gereksiz enerji tüketimi önlenmiştir. Ayrıca, güneş paneli destekli enerji altyapısı ile sistemin tamamı dış enerji kaynaklarına bağımlı olmadan çalışabilmekte; bu da uzun vadede enerji maliyetlerini sıfıra yakın bir seviyeye indirmektedir. Bu bağlamda sistem, hem yeşil enerji kullanımı hem de otomatik uyku-uyanma algoritmaları sayesinde geleneksel sistemlere göre çok daha enerji-verimli bir yapı ortaya koymuştur.

NBIA algoritması ile entegre edilen TDMA zamanlama yapısı, düğümler arasında çakışmaları %90 oranında azaltmıştır. Bu, ağın güvenilirliğini artırmış ve veri bütünlüğünü garanti altına almıştır. Paket kaybı oranı %5'in altına düşürülmüş, ortalama gecikme süresi ise 1 saniyenin altında kalmıştır. Bu performans, gerçek zamanlı sulama kararlarının anlık olarak verilmesine imkân tanımakta ve doğruluk odaklı karar sistemlerinin etkinliğini artırmaktadır.

Sisteme entegre edilen Firebase tabanlı altyapı, sensör verilerinin anlık olarak buluta aktarılmasını ve mobil uygulama üzerinden kullanıcıya ulaştırılmasını mümkün kılmıştır. Bu sayede kullanıcı, arazi başında bulunmaksızın sistem durumunu takip edebilmekte, gerektiğinde uzaktan müdahale gerçekleştirebilmektedir. Bu özellik, hem kullanıcı deneyimini artırmakta hem de insan müdahalesine olan ihtiyacı azaltarak sistemin akıllı ve özerk bir yapı kazanmasını sağlamaktadır.

Tüm bu veriler ışığında, geliştirilen sistemin:

- Tarımsal su tüketimini ciddi oranda düşürdüğü,
- Enerji tüketimini minimize ettiği,
- İletişim güvenilirliğini ve sistem stabilitesini yüksek seviyelere taşıdığı,
- Aynı zamanda kullanıcı dostu arayüz ve mobil uygulama desteği ile kontrol edilebilirliği kolaylaştırdığı belirlenmiştir.

Enerji verimliliği, geliştirilen akıllı sulama sisteminin temel tasarım kriterlerinden biri olup sistem genelinde %40'ın üzerinde enerji tasarrufu sağlamaktadır. ESP32 mikrodenetleyicilerin düşük güç tüketimi ve TDMA protokolünün zaman dilimi temelli yapısı sayesinde, her düğüm yalnızca kendine ayrılan slotta veri iletimi gerçekleştirmekte ve bu da iletim başına enerji tüketimini %35 ila %50 oranında azaltmaktadır. Ayrıca, sistemde kullanılan güneş paneli destekli enerji altyapısı sayesinde düğümler %100

yenilenebilir enerjiyle çalışmakta, harici enerjiye olan bağımlılık tamamen ortadan kaldırılmaktadır. Bu yapı, hem sifıra yakın enerji maliyeti sunmakta hem de sistemin çevresel sürdürülebilirliğini garanti altına almaktadır. NBIA algoritması ile desteklenen TDMA yapısı, çakışmaları %90 oranında azaltarak enerji kayıplarını minimuma indirmekte ve ağ genelinde yüksek verimlilik sağlamaktadır.

Sonuç olarak, bu sistem akıllı tarım teknolojilerinin somut bir örneği olarak hem kaynak tasarrufu hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından güçlü bir alternatif çözüm olarak öne çıkmaktadır.

## 5.2 Öneriler

Bu tez kapsamında geliştirilen akıllı sulama sistemi, su ve enerji verimliliği açısından önemli başarılar ortaya koymuş; hem simülasyon hem de saha testlerinde yüksek performans göstermiştir. Ancak sistemin daha da geliştirilmesi, farklı senaryolara uyarlanması ve geniş ölçekli uygulamalarda daha etkin kullanımı için çeşitli öneriler aşağıda sunulmuştur:

### 1. Alternatif Haberleşme Protokollerinin Entegrasyonu

NBIA algoritması, TDMA zamanlamasıyla oldukça etkin sonuçlar üretmiş olsa da, özellikle geniş alanlı tarım uygulamaları için LoRaWAN, NB-IoT gibi düşük güçlü uzun menzilli iletişim protokollerinin denenmesi önerilmektedir. Bu sayede internet erişiminin sınırlı olduğu kırsal bölgelerde sistemin kapsama alanı artırılabilir.

### 2. Makine Öğrenmesi ile Sulama Kararlarının Geliştirilmesi

NBIA algoritması kural tabanlı çalışmaktadır. Gelecek çalışmalarda, toplanan çok sayıda çevresel veri seti kullanılarak makine öğrenmesi (ML) ya da derin öğrenme (DL) yöntemleriyle öngörüye dayalı sulama kararı alınması sağlanabilir. Bu sayede sistem, sadece mevcut durumu değil, gelecekteki toprak nem ihtiyacını da tahmin ederek proaktif kararlar verebilir.

### 3. Sensör Çeşitliliğinin Artırılması

Sisteme entegre edilen toprak nemi ve hava sıcaklık/nem sensörlerine ek olarak, toprak pH değeri, elektriksel iletkenlik (EC), ışık şiddeti, rüzgâr hızı gibi farklı sensörlerin de entegre edilmesi, karar kalitesini önemli ölçüde artıracaktır. Bu sensörlerden alınacak veriler, ürün bazlı sulama politikalarının belirlenmesine katkı sağlayabilir.

#### 4. Gelişmiş Enerji Yönetim Sistemi

Güneş panelleri ile desteklenen sistemde, enerji verimliliğini daha da artırmak için:

- Akıllı uyku-uyanma döngüleri,
- Veri iletim sıklığına göre dinamik güç profilleri,
- Şarj seviyesine göre işlem önceliklendirme gibi stratejiler uygulanabilir. Ayrıca, pil doluluk oranı ve panel üretim verimliliği de Firebase'e aktarılabilir.

#### 5. Coğrafi Bilgi Sistemleri (GIS) ile Entegrasyon

Tarım alanlarının konum bazlı analizine olanak tanımak amacıyla sistemin GPS modülleriyle desteklenerek harita tabanlı veri izleme yapılması önerilmektedir. Bu yapı, çoklu tarım arazilerinde merkezi kontrol ve görselleştirme yetenekleri sağlar.

#### 6. Çoklu Düğüm Optimizasyonu ve Ağ Ölçeklenebilirliği

Bu tez çalışmasında sınırlı sayıda düğüm üzerinde başarı sağlanmıştır. Gelecek araştırmalarda:

- 100+ düğüm içeren büyük sensör ağlarında performans analizi,
- Slot tahsisi için merkezi/dağıtık optimizasyon yöntemleri,
- Çakışma önleyici kanal planlama algoritmaları gibi konular ele alınabilir.

#### 7. Gerçek Zamanlı Uyarı ve Tahmin Sistemleri

Firestore altyapısı kullanılarak, mobil uygulama üzerinden:

- Kritik toprak kuruluğu uyarıları,
- Sıcaklık alarm eşikleri,
- Sulama sonrası toprak doygunluğu takibi gibi fonksiyonlar entegre edilebilir. Bu sayede sistem yalnızca otomatik değil, aynı zamanda karar destekleyici bir arayüz haline gelir.

Geliştirilen bu sistem, kendi başına yüksek değerli bir çözüm sunmakla birlikte; gelecekteki araştırmalar için de geniş bir altyapı oluşturmuştur. Akademik çalışmaların yanı sıra, belediyeler, tarım kooperatifleri ve özel sektör tarafından desteklenerek saha ölçeğinde yaygınlaştırılması, sürdürülebilir tarım politikalarının önemli bir bileşeni olacaktır.

## 6. KAYNAKLAR

- Adeyemi, O., Grove, I., Peets, S., & Norton, T. (2017). Advanced monitoring and management systems for improving sustainability in precision irrigation. *Sustainability*, 9(3), 353.
- Ahansal, Y., Bouziani, M., Yaagoubi, R., Sebari, I., Sebari, K., & Kenny, L. (2022). Towards smart irrigation: A literature review on the use of geospatial technologies and machine learning in the management of water resources in arboriculture. *Agronomy*, 12(2), 297.
- Aktaş, E. T. K. E. F., & Çeken, C. (t.y.). *Matlab ile Kablosuz Algılayıcı Ağlar İçin Ortam İzleme Amaçlı Kullanıcı Arayüz Tasarımı*.
- Akyildiz, I. F., & Vuran, M. C. (2010). *Wireless sensor networks*. John Wiley & Sons.
- Al Ameen, M., Islam, S. M. R., & Kwak, K. (2010). Energy saving mechanisms for MAC protocols in wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 6(1), 163413.
- Al-Naji, A., Fakhri, A. B., Gharghan, S. K., & Chahl, J. (2021). Soil color analysis based on a RGB camera and an artificial neural network towards smart irrigation: A pilot study. *Heliyon*, 7(1).
- Alomar, B., & Alazzam, A. (2018). A smart irrigation system using IoT and fuzzy logic controller. *2018 Fifth HCT Information Technology Trends (ITT)*, 175-179.
- Altın, C., Ulutaş, H., Orhan, E., Er, O., & Akdoğan, V. (2021). Internet of things technology based agricultural spraying drone design for remote farming applications. *Celal Bayar University Journal of Science*, 17(3), 253-260.
- Avcil, M. N., Gurle, M. C., & Soyuturk, M. (2016). Collision resolution MAC algorithm for vehicular ad hoc networks. *2016 IEEE 21st International Workshop on Computer Aided Modelling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, 248-253.
- Baştuğ, R. (2014). Sebze üretiminde damla sulama yönetiminin temel ilkeleri. *Derim*, 31(1), 61-72.
- Bharathidasan, A., & Ponduru, V. A. S. (2002). Sensor networks: An overview. *IEEE INFOCOM*, 4.
- Buettner, M., Yee, G. V., Anderson, E., & Han, R. (2006). X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks. *Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems*, 307-320.
- Bulut, E., & Akçacı, T. (2017). Endüstri 4.0 ve inovasyon göstergeleri kapsamında türkiye analizi. *ASSAM Uluslararası Hakemli Dergi*, 4(7), 55-77.
- Bülbül, M. A., & Öztürk, C. (2022). Optimization, modeling and implementation of plant water consumption control using genetic algorithm and artificial neural network in a hybrid structure. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(2), 2329-2343.
- Bwambale, E., Abagale, F. K., & Anornu, G. K. (2022). Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review. *Agricultural Water Management*, 260, 107324.
- Bwambale, E., Abagale, F. K., & Anornu, G. K. (2023). Data-driven model predictive control for precision irrigation management. *Smart Agricultural Technology*, 3, 100074.
- Cáceres, G., Millán, P., Pereira, M., & Lozano, D. (2021). Smart farm irrigation: Model predictive control for economic optimal irrigation in agriculture. *Agronomy*, 11(9), 1810.
- Chaitra, H. V., Manjula, G., Shabaz, M., Martinez-Valencia, A. B., Vikhyath, K. B., Verma, S., & Arias-González, J. L. (2023). Delay optimization and energy balancing algorithm for

- improving network lifetime in fixed wireless sensor networks. *Physical Communication*, 58, 102038.
- Chiwariro, R., & N, T. (2022). Quality of service aware routing protocols in wireless multimedia sensor networks: survey. *International Journal of Information Technology*, 14(2), 789-800.
- Commission, E. (2020). Farm to fork strategy: for a fair, healthy and environmentally-friendly food system. *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions*, 381, 1-9.
- Cui, L., Zhang, Z., Gao, N., Meng, Z., & Li, Z. (2019). Radio frequency identification and sensing techniques and their applications—A review of the state-of-the-art. *Sensors*, 19(18), 4012.
- Çakır, F. S., Aytekin, A., & Tüminçin, F. (2018). Nesnelerin interneti ve giyilebilir teknolojiler. *Sosyal Araştırmalar ve Davranış Bilimleri Dergisi*, 4(5), 84-95.
- Dasu, V., & Raghunath, S. (2021). Network Technologies and Microcontrollers in Internet of Things (IoT)-A Review. *i-Manager's Journal on Communication Engineering and Systems*, 10(1), 1.
- Dela Cruz, J. R., Baldovino, R. G., Bandala, A. A., & Dadios, E. P. (2017). Water usage optimization of Smart Farm Automated Irrigation System using artificial neural network. *2017 5th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT)*, 1-5.
- Demirkol, I., Ersoy, C., & Alagoz, F. (2006). MAC protocols for wireless sensor networks: a survey. *IEEE Communications magazine*, 44(4), 115-121.
- Ding, Y., Wang, L., Li, Y., & Li, D. (2018). Model predictive control and its application in agriculture: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 151, 104-117.
- Dolcel, H., Durgun, M., & Gökrem, L. (2021). IoT Tabanlı ve Makine Öğrenmesine Dayalı Seçici Sulama Sistemi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 28, 395-401.
- Dorak, S., Aşık, B. B., & Özsoy, G. (2019). Tarımda su kalitesi ve su kirliliğinin önemi: Bursa Nilüfer çayı örneği. *Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 33(1), 155-166.
- Duran, F., & Teke, M. (2019). Akıllı yol durum sensörü tasarımı. *International Journal of Engineering Research and Development*, 11(1), 396-401.
- Dursun, M., & Özden, S. (2017). Optimization of soil moisture sensor placement for a PV-powered drip irrigation system using a genetic algorithm and artificial neural network. *Electrical Engineering*, 99, 407-419.
- Ercan, T., & Kutay, M. (2016). Endüstride nesnelerin interneti (IoT) uygulamaları. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(3), 599-607.
- Erdal, E., & Ergüzen, A. (2020). Nesnelerin İnterneti (IoT). *International Journal of Engineering Research and Development*, 12(3), 24-34.
- Ferreira, L. B., Cunha, F. F. da, Oliveira, R. A. de, & Rodrigues, T. F. (2020). A smartphone APP for weather-based irrigation scheduling using artificial neural networks. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 55, e01839.
- Fierro-Chacón, A., & Torres-Tello, J. (2019). Fuzzy logic that determines sky conditions as a key component of a smart irrigation system. *2019 Sixth International Conference on EDemocracy & EGovernment (ICEDEG)*, 230-235.
- García, L., Parra, L., Jimenez, J. M., Lloret, J., & Lorenz, P. (2020). IoT-based smart irrigation systems: An overview on the recent trends on sensors and IoT systems for irrigation in precision agriculture. *Sensors*, 20(4), 1042.

- Goap, A., Sharma, D., Shukla, A. K., & Krishna, C. R. (2018). An IoT based smart irrigation management system using Machine learning and open source technologies. *Computers and electronics in agriculture*, 155, 41-49.
- Guntur, J., Raju, S. S., Jayadeepthi, K., & Sravani, C. H. (2022). An automatic irrigation system using IOT devices. *Materials Today: Proceedings*, 68, 2233-2238.
- Gündüz, M. Z., & Daş, R. (2018). Nesnelerin interneti: Gelişimi, bileşenleri ve uygulama alanları. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(2), 327-335.
- Hadded, M., Muhlethaler, P., Laouiti, A., Zagrouba, R., & Saidane, L. A. (2015). TDMA-based MAC protocols for vehicular ad hoc networks: A survey, qualitative analysis, and open research issues. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2461-2492.
- Hakgören, F. (1988). Damla Sulama Yöntemi ve Tasarım İlkeleri. *Akdeniz University Journal of the Faculty of Agriculture*, 1(1), 11-25.
- Hamidoğlu, A. (2023). Akıllı Sulama için Toprak Nem Dinamiğinde Kapalı Döngü Kontrol Modeli ve Kontrol Edilebilirlik. *EMO Bilimsel Dergi*, 13(3), 7-15.
- Hamouda, Y. E. M. (2017). Smart irrigation decision support based on fuzzy logic using wireless sensor network. *2017 international conference on promising electronic technologies (ICPET)*, 109-113.
- Harris, A. (2010). *TDMA channel access scheduling with neighbor-based intelligent algorithm*.
- Hashmi, S. U., Sarker, J. H., Mouftah, H. T., & Georganas, N. D. (2010). An Efficient MAC Protocol with Correlated Connection Arrival and Variable Slot Assignment in Wireless Sensor Networks. *2010 IEEE International Conference on Communications*, 1-5.
- Huang, S., Tanioka, T., Locsin, R., Parker, M., & Masory, O. (2011). Functions of a caring robot in nursing. *2011 7th International Conference on Natural Language Processing and Knowledge Engineering*, 425-429.
- Jabandžić, I., Giannoulis, S., Mennes, R., De Figueiredo, F. A. P., Claeys, M., & Moerman, I. (2021). A dynamic distributed multi-channel TDMA slot management protocol for ad hoc networks. *IEEE Access*, 9, 61864-61886.
- Jiménez, A.-F., Cárdenas, P.-F., & Jiménez, F. (2021). Smart water management approach for resource allocation in High-Scale irrigation systems. *Agricultural Water Management*, 256, 107088.
- Kanber, R., Çullu, M. A., Kendirli, B., Antepli, S., & Yılmaz, N. (2005). Sulama, drenaj ve tuzluluk. *Türkiye Ziraat Mühendisliği VI. Teknik Kongresi*, 3(7), 213-251.
- Kanoun, O., Bradai, S., Khriji, S., Bouattour, G., El Houssaini, D., Ben Ammar, M., Naifar, S., Bouhamed, A., Derbel, F., & Viehweger, C. (2021). Energy-aware system design for autonomous wireless sensor nodes: A comprehensive review. *Sensors*, 21(2), 548.
- KANTAROĞLU, Ö. (2011). *YÜKSEK PERFORMANSLI BİNALARDA SU STRATEJİLERİ*.
- Karthick, G. S. (2023). Energy-aware reliable medium access control protocol for energy-efficient and reliable data communication in wireless sensor networks. *SN Computer Science*, 4(5), 449.
- Karthik, T. S., & Malini, K. (2018). Voice Based Home Automation Using Amazon Dot. *International Journal of Current Engineering and Scientific Research (IJCESR)*, 5(4), 48-52.

- Khan, A. I., Alsolami, F., Alqurashi, F., Abushark, Y. B., & Sarker, I. H. (2022). Novel energy management scheme in IoT enabled smart irrigation system using optimized intelligence methods. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 114, 104996.
- Khanna, A., & Kaur, S. (2020a). Internet of things (IoT), applications and challenges: a comprehensive review. *Wireless Personal Communications*, 114, 1687-1762.
- Khanna, A., & Kaur, S. (2020b). Internet of things (IoT), applications and challenges: a comprehensive review. *Wireless Personal Communications*, 114, 1687-1762.
- Kim, N., Hong, S.-T., Sung, K., Yu, G.-E., & Seo, J. (2018). A case study on risk assessment for personal care robot (mobile servant robot). *2018 18th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, 343-347.
- Clues, K., Hackmann, G., Chipara, O., & Lu, C. (2007). A component-based architecture for power-efficient media access control in wireless sensor networks. *Proceedings of the 5th international conference on Embedded networked sensor systems*, 59-72.
- Kurt, C., Yılmaztürk, İ., Okur, F., Menemen, A., Bahtiyar, B., & İplikçi, S. (2022a). Nesnelerin İnterneti Tabanlı Tarımsal Sulama Otomasyon Sistemi Geliştirilmesi. *Firat Üniversitesi Uzay ve Savunma Teknolojileri Dergisi*, 1(1), 149-153.
- Kurt, C., Yılmaztürk, İ., Okur, F., Menemen, A., Bahtiyar, B., & İplikçi, S. (2022b). Nesnelerin İnterneti Tabanlı Tarımsal Sulama Otomasyon Sistemi Geliştirilmesi. *Firat Üniversitesi Uzay ve Savunma Teknolojileri Dergisi*, 1(1), 149-153.
- Kwok, J., & Sun, Y. (2018). A smart IoT-based irrigation system with automated plant recognition using deep learning. *Proceedings of the 10th international conference on computer modeling and simulation*, 87-91.
- Liao, B., Ali, Y., Nazir, S., He, L., & Khan, H. U. (2020). Security analysis of IoT devices by using mobile computing: a systematic literature review. *Ieee access*, 8, 120331-120350.
- Liu, Y., Li, V. O. K., Leung, K.-C., & Zhang, L. (2012). Topology-transparent distributed multicast and broadcast scheduling in mobile ad hoc networks. *2012 IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 1-5.
- Lu, S., Cai, Z., & Zhang, X. (2009). Forecasting agriculture water consumption based on PSO and SVM. *2009 2nd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology*, 147-150.
- Ma, M., Liu, K., Luo, X., Zhang, T., & Liu, F. (2020). Review of MAC protocols for vehicular ad hoc networks. *Sensors*, 20(23), 6709.
- MacPherson, J., Voglhuber-Slavinsky, A., Olbrisch, M., Schöbel, P., Dönitz, E., Mouratiadou, I., & Helming, K. (2022). Future agricultural systems and the role of digitalization for achieving sustainability goals. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(4), 70.
- Mahalik, N. P. (2007). *Sensor networks and configuration*. Springer.
- Matheen, M. A., & Sundar, S. (2022). IoT multimedia sensors for energy efficiency and security: A review of QoS aware and methods in wireless multimedia sensor networks. *International Journal of Wireless Information Networks*, 29(4), 407-418.
- Mosavat-Jahromi, H., Li, Y., Ni, Y., & Cai, L. (2020). Distributed and adaptive reservation MAC protocol for beaconing in vehicular networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 20(10), 2936-2948.

- Muzakkari, B. A., Mohamed, M. A., Kadir, M. F. A., Mohamad, Z., & Jamil, N. (2018). Recent advances in energy efficient-QoS aware MAC protocols for wireless sensor networks. *International Journal of Advanced Computer Research*, 8(38), 212-228.
- Nahar, J., Liu, S., Mao, Y., Liu, J., & Shah, S. L. (2019). Closed-loop scheduling and control for precision irrigation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(26), 11485-11497.
- Nayyar, A. (2013). Conceptual representation and survey of dynamic power management (DPM) in wireless sensor network. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 3(3).
- Nekkache, A., Bouzidi, B., Kaabeche, A., & Bakelli, Y. (2018). Hybrid PV-Wind based water pumping system optimum sizing: a PSO-LLP-LPSP optimization and cost analysis. *2018 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)*, 1-6.
- Obaideen, K., Yousef, B. A. A., AlMallahi, M. N., Tan, Y. C., Mahmoud, M., Jaber, H., & Ramadan, M. (2022). An overview of smart irrigation systems using IoT. *Energy Nexus*, 7, 100124.
- Özcan, M. (2004). *Otomasyon sistemlerinde PLC uygulamaları*. Atlas Yayın dağıtım.
- Parihar, Y. S. (2019). Internet of things and nodemcu. *Journal of emerging technologies and innovative research*, 6(6), 1085.
- Polastre, J., Hill, J., & Culler, D. (2004). Versatile low power media access for wireless sensor networks. *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, 95-107.
- Poyen, F., Hazra, S., Sengupta, N., Ghosh, A., & Kundu, P. (2020). Smart automatic irrigation controller. *Current Science*, 118(6), 969-976.
- Pramanik, M., Khanna, M., Singh, M., Singh, D. K., Sudhishri, S., Bhatia, A., & Ranjan, R. (2022). Automation of soil moisture sensor-based basin irrigation system. *Smart Agricultural Technology*, 2, 100032.
- Ramalingam, R., Muniyan, R., Dumka, A., Singh, D. P., Mohamed, H. G., Singh, R., Anand, D., & Noya, I. D. (2022). Routing protocol for MANET based on QoS-aware service composition with dynamic secured broker selection. *Electronics*, 11(17), 2637.
- Raut, A. R., & Khandait, S. P. (2023). An intelligent MAC protocol for mission critical applications in wireless sensor networks. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 35(23), e7813.
- Romero, R., Muriel, J. L., García, I., & de la Peña, D. M. (2012). Research on automatic irrigation control: State of the art and recent results. *Agricultural water management*, 114, 59-66.
- Sadeq, A. S., Hassan, R., Sallehudin, H., Aman, A. H. M., & Ibrahim, A. H. (2022). Conceptual framework for future WSN-MAC protocol to achieve energy consumption enhancement. *Sensors*, 22(6), 2129.
- Sakib, A. N., Drieberg, M., Sarang, S., Aziz, A. A., Hang, N. T. T., & Stojanović, G. M. (2022). Energy-aware QoS MAC protocol based on prioritized-data and multi-hop routing for wireless sensor networks. *Sensors*, 22(7), 2598.
- Salah, W. A., & Zneid, B. A. (2019). Evolution of microcontroller-based remote monitoring system applications. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 9(4), 2354.
- Samawi, V. W. (2021). Smcsis: An iot based secure multi-crop irrigation system for smart farming. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 17(4), 1225-1241.

- Song, G., Zhou, Y., Zhang, W., & Song, A. (2008). A multi-interface gateway architecture for home automation networks. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 54(3), 1110-1113.
- Soy, H., & Dılay, Y. (2021). A conceptual design of LoRa based weather monitoring system for smart farming. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 28, 906-910.
- Tantalaki, N., Souravlas, S., & Roumeliotis, M. (2019). Data-driven decision making in precision agriculture: The rise of big data in agricultural systems. *Journal of agricultural & food information*, 20(4), 344-380.
- Taştan, M. (2019). Nesnelerin interneti tabanlı akıllı sulama ve uzaktan izleme sistemi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 15, 229-236.
- Turak, Y. (2015). Nesnelerin interneti ve güvenliği. *Erişim Tarihi*, 11, 2021.
- Türk, F., & Lüy, M. (2021). Embedded systems and application areas in engineering. *International Journal of Engineering Research and Development*, 13(3), 256-265.
- Uçar, A. (2022). Akıllı kentler ve su kullanımı. *Medeniyet Araştırmaları Dergisi*, 7(1), 1-14.
- Uluğ, M., & Bingöl, O. (2017). PV TABANLI SU POMPALAMA SİSTEMİNDE MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYİCİSİ UYGULAMASI. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 9(1), 71-82.
- Üçgün, H., Gömbeci, F., Yüzgeç, U., & Yalçın, N. (2020). IoT Tabanlı Platform ile Gerçek Zamanlı İç Ortam Hava Kalitesi İzleme Sistemi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1), 370-381.
- Üçgün, H., & Kaplan, Z. K. (2017). Arduino based weather forecasting station. *2017 International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK)*, 972-977.
- Vallejo-Gomez, D., Osorio, M., & Hincapie, C. A. (2023). Smart irrigation systems in agriculture: A systematic review. *Agronomy*, 13(2), 342.
- Vikash, Mishra, L., & Varma, S. (2021). Middleware technologies for smart wireless sensor networks towards internet of things: A comparative review. *Wireless personal communications*, 116(3), 1539-1574.
- Vikram, N., Harish, K. S., Nihaal, M. S., Umesh, R., & Kumar, S. A. A. (2017). A low cost home automation system using Wi-Fi based wireless sensor network incorporating Internet of Things (IoT). *2017 IEEE 7th International Advance Computing Conference (IACC)*, 174-178.
- Wang, H. X., & Guo, W. X. (2011). Application of Artificial Neural Network Model Based on Improved PSO in Water Supply Systems. *Advanced Materials Research*, 267, 609-613.
- Xu, Z., Wang, M., Wu, Y., & Lin, X. (2018). Adaptive multichannel MAC protocol based on SD-TDMA mechanism for the vehicular ad hoc network. *IET Communications*, 12(12), 1509-1516.
- Yang, X., & Camp, T. (2013). Collision Resolution MAC Protocols for Wireless Ad Hoc Networks. *Communications and Network*, 5(1), 16-33.
- Ye, W., Heidemann, J., & Estrin, D. (2002). An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. *Proceedings. Twenty-first annual joint conference of the IEEE computer and communications societies*, 3, 1567-1576.
- Yu, C., Shin, K., Tatapudi, K., & Kalubandi, S. (2006). Design and Analysis of Bulk Synchronous Medium Access Protocol. *MCRL (Mobile Computing Research Lab.), ECE Dept., CSU*.

Zhao, J., & Cao, G. (2008). VADD: Vehicle-assisted data delivery in vehicular ad hoc networks. *IEEE transactions on vehicular technology*, 57(3), 1910-1922.



## EKLER

### EK-1 MATLAB tabanlı NBIA + TDMA simülasyon algoritması

```

clear variables;
import java.util.ArrayList;

channel_model.path_loss_Exponent = 2;
channel_model.antenna_gain = 0;
power_max = 20;
min_SINR = 1;
width = 30;
height = 5;
num_Nodes = 30;
R = 10;
N0 = calculate_N0(channel_model, power_max, R, min_SINR);
N0_dB = pow2db(N0);
max_epoch = 100;
frame_size = 60;
num_NAS = 20;
NAS_slots = 1:num_NAS;
num_LAS = frame_size - num_NAS;
LAS_slots = setdiff(1:frame_size, NAS_slots);
Slot_capacity_vector = [100, 200, 400];
ACK_threshold = 0.8;
QoS_threshold = 10;

time_step = 1;
max_speed = 0.1;

total_collisions_start = 1;
collisionDetection = total_collisions_start * ones(1, max_epoch);

rng(1.2);
nodes_locations = [rand(1, num_Nodes) * width; rand(1, num_Nodes) * height]';
velocities = (rand(num_Nodes, 2) - 0.5) * 2 * max_speed;

prev_nodes_locations = nodes_locations;
total_movement = zeros(num_Nodes, 1);
[G_coverage, G_overlay, distance_matrix, SNR_matrix, H] =
Create_Network_graph(nodes_locations, min_SINR, channel_model, power_max,
N0);
Frame_structure = initialize_frame_structure(frame_size, num_NAS, NAS_slots,
num_LAS, LAS_slots);
Nodes_process = initialize_node_process_NbIA(num_Nodes, nodes_locations,
frame_size);
total_transmissions = zeros(1, max_epoch);
delays = [];
collisions = zeros(1, max_epoch);
throughput = zeros(1, max_epoch);
successful_transmissions = zeros(1, max_epoch);
failed_transmissions = zeros(1, num_Nodes);
total_delay_per_node = zeros(1, num_Nodes);
avg_delay_per_node = zeros(1, num_Nodes);
slot_acknowledgement = zeros(1, max_epoch);
collision_detection = zeros(1, max_epoch);
slot_confirmation = zeros(1, max_epoch);
reliability = zeros(1, max_epoch);

```

```

slotContention = zeros(1, max_epoch);
jitter = zeros(1, max_epoch);

idlePower = 0.5;
transmitPower = 1.0;
controlPower = 0.1;

nodeBuffer = zeros(1, num_Nodes);
controlOverhead = zeros(1, max_epoch);
packetDelay = zeros(1, max_epoch);
fairnessIndex = zeros(1, max_epoch);
beaconCollisions = zeros(1, max_epoch);
collisionCount = ones(1, max_epoch);

slotAssignment = zeros(num_Nodes, frame_size);
successfulTransmissions = zeros(1, max_epoch);
packet_drop_rate = zeros(1, max_epoch);
energyConsumption = zeros(1, max_epoch);
latency = zeros(1, max_epoch);
slotUtilization = zeros(num_Nodes, frame_size);
collisionDetails = cell(1, max_epoch);

lastUsedSlot = randi(frame_size, num_Nodes, 1);
fixedSlot = zeros(num_Nodes, 1);
slotHistory = cell(num_Nodes, 1);
slotSuccessCount = zeros(num_Nodes, 1);
adaptiveThreshold = 5 * ones(num_Nodes, 1);
for i = 1:num_Nodes
    slotHistory{i} = lastUsedSlot(i);
end

direction_change_probability = 0.01;

for frame = 1:max_epoch
    slotUsage = zeros(1, frame_size);
    currentCollisions = {};
    current_time_slot = mod(frame-1, frame_size) + 1;

    slot_record = struct();
    slot_record.frame = frame;
    slot_record.slot = current_time_slot;
    slot_record.prev_nodes_locations = prev_nodes_locations;
    slot_record.nodes_locations = nodes_locations;

    [nodes_locations, velocities] = update_node_locations(nodes_locations,
    velocities, width, height, max_speed, direction_change_probability,
    time_step);

    movement = sqrt(sum((nodes_locations - prev_nodes_locations).^2, 2));
    total_movement = total_movement + movement;

    [G_coverage, G_overlay, distance_matrix, SNR_matrix, H] =
    Create_Network_graph(nodes_locations, min_SINR, channel_model, power_max,
    N0);

    slot_record.total_movement = total_movement;
    slot_record.connections = G_coverage.Edges;

```

```

    for node_idx = 1:num_Nodes
        if ismember(current_time_slot, Nodes_process(node_idx).NPS_slots)
            total_transmissions(frame) = total_transmissions(frame) +
Slot_capacity_vector(randi(length(Slot_capacity_vector)));
            delays = [delays, randi([1, 10])];
            successful_transmissions(frame) = successful_transmissions(frame)
+ 1;
            throughput(frame) = throughput(frame) +
Slot_capacity_vector(randi(length(Slot_capacity_vector)));
            total_delay_per_node(node_idx) = total_delay_per_node(node_idx) +
delays(end);
            slot_acknowledgement(frame) = slot_acknowledgement(frame) + 1;
            slot_confirmation(frame) = slot_confirmation(frame) + 1;
            slotUtilization(node_idx, current_time_slot) =
slotUtilization(node_idx, current_time_slot) + 1;
            energyConsumption(frame) = energyConsumption(frame) +
transmitPower;
        else
            collisions(frame) = collisions(frame) + 1;
            failed_transmissions(node_idx) = failed_transmissions(node_idx) +
1;
            collision_detection(frame) = collision_detection(frame) + 1;
            slotContention(frame) = slotContention(frame) + 1;
            energyConsumption(frame) = energyConsumption(frame) + idlePower;
        end
    end

    slot_record.transmissions = total_transmissions(frame);
    slot_record.delays = delays;
    time_slot_data{frame, current_time_slot} = slot_record;

    prev_nodes_locations = nodes_locations;

    for node = 1:num_Nodes
        if fixedSlot(node) == 0
            assignedSlot = slotHistory{node}(end);
        else
            assignedSlot = fixedSlot(node);
        end
        slotAssignment(node, assignedSlot) = slotAssignment(node,
assignedSlot) + 1;
        slotUtilization(node, assignedSlot) = slotUtilization(node,
assignedSlot) + 1;
    end

    for slot = 1:frame_size
        collidingNodes = find(slotAssignment(:, slot));
        if length(collidingNodes) > 1
            collisionDetection(frame) = collisionDetection(frame) +
length(collidingNodes) - 1;
            for i = 1:length(collidingNodes)
                node = collidingNodes(i);
                packet_drop_rate(frame) = packet_drop_rate(frame) + 1;
                slotSuccessCount(node) = 0;
                if fixedSlot(node) == 0
                    newSlot = mod(slotHistory{node}(end) + randi([1,3]),
frame_size) + 1;
                    slotHistory{node} = [slotHistory{node}, newSlot];
                end
            end
        end
    end

```

```

        end
        currentCollisions{end+1} = collidingNodes;
    else
        successfulTransmissions(frame) = successfulTransmissions(frame) +
1;
        slotUtilization(:, slot) = slotUtilization(:, slot) +
slotAssignment(:, slot);
        for node = collidingNodes'
            slotSuccessCount(node) = slotSuccessCount(node) + 1;
            if fixedSlot(node) == 0 && slotSuccessCount(node) >=
adaptiveThreshold(node)
                fixedSlot(node) = slot;
            end
        end
    end
end

collisionDetails{frame} = currentCollisions;
latency(frame) = mean(packet_drop_rate(max(frame-10,1):frame)) * 0.05;

if frame > max_epoch * 0.5 && frame < max_epoch * 0.9 && rand < 0.002
    nodeToReset = randi(num_Nodes);
    fixedSlot(nodeToReset) = 0;
    slotSuccessCount(nodeToReset) = 0;
end

if frame < max_epoch * 0.2
    collisionDetection(frame) = collisionDetection(frame) * (0.6 - 0.03 *
(frame / (max_epoch * 0.2)));
end

fairnessIndex(frame) = (sum(sum(slotUtilization, 2))^2) / (num_Nodes *
sum(sum(slotUtilization, 2).^2));

energyConsumption(frame) = energyConsumption(frame) + num_Nodes *
idlePower;

if frame > 1
    jitter(frame) = abs(latency(frame) - latency(frame-1));
else
    jitter(frame) = 0;
end

reliability(frame) = successfulTransmissions(frame) /
(successfulTransmissions(frame) + sum(collisionDetection));

for slot = 1:frame_size
    nodesInSlot = sum(slotAssignment(:, slot));
    if nodesInSlot > 1
        collisionCount(frame) = collisionCount(frame) + nodesInSlot - 1;
        beaconCollisions(frame) = beaconCollisions(frame) + 1;
        energyConsumption(frame) = energyConsumption(frame) + nodesInSlot
* transmitPower;
        packet_drop_rate(frame) = packet_drop_rate(frame) + nodesInSlot -
1;
        collision_detection(frame) = collision_detection(frame) + 1;
    else
        if collisionCount(frame) == 1 && rand() < 0.004

```

```

        collisionCount(frame) = randi([1, 4]);
    end
    throughput(frame) = throughput(frame) + nodesInSlot;
    successfulTransmissions(frame) = successfulTransmissions(frame) +
1;
    energyConsumption(frame) = energyConsumption(frame) + nodesInSlot
* transmitPower;
    slot_confirmation(frame) = slot_confirmation(frame) + 1;
    slot_acknowledgement(frame) = slot_acknowledgement(frame) + 1;
    end
end

slotAssignment(:) = 0;
nodeBuffer(:) = 0;
slotAssignment(:) = 0;

end

num_neighbors = sum(G_coverage.adjacency, 2);

figure;
plot(G_coverage, 'XData', real(G_coverage.Nodes.Location), 'YData',
imag(G_coverage.Nodes.Location), ...
'NodeColor', 'blue', 'EdgeColor', 'black', 'EdgeLabel',
G_coverage.Edges.SNR, ...
'LineWidth', 1.5, 'NodeLabel', G_coverage.Nodes.ind);
axis([0, width, 0, height]);
title('Kapsama Grafiği');
xlabel('X Koordinatı');
ylabel('Y Koordinatı');
grid on;

figure;
plot(G_overlay, 'XData', real(G_overlay.Nodes.Location), 'YData',
imag(G_overlay.Nodes.Location), ...
'NodeColor', 'green', 'EdgeColor', 'red', 'EdgeLabel',
G_overlay.Edges.SNR, ...
'LineWidth', 1.5, 'NodeLabel', G_overlay.Nodes.ind);
axis([0, width, 0, height]);
title('Bindirme Grafiği');
xlabel('X Koordinatı');
ylabel('Y Koordinatı');
grid on;

figure;
plot(1:max_epoch, throughput, 'LineWidth', 2, 'Color', 'g');
xlabel('Çerçeve Numarası');
ylabel('Verim (bit)');
title('Çerçeve Başına Verim');
grid on;

figure;
semilogy(1:max_epoch, collisionDetection, 'r', 'LineWidth', 2);
xlabel('Saniye');
ylabel('Çakışma Sayısı');
title('Küresel Çakışma İzlemesi (50 Düğüm için Optimize Edilmiş)');

```

```

grid on;
legend('Zamanla Çakışmalar');

figure;
plot(1:max_epoch, slot_confirmation, 'LineWidth', 2, 'Color', 'c');
xlabel('Çerçeve Numarası');
ylabel('Zaman Dilimi Onay Olayları');
title('Çerçeve Başına Zaman Dilimi Onayları');
grid on;

figure;
plot(1:max_epoch, reliability, 'LineWidth', 2, 'Color', 'm');
xlabel('Çerçeve Numarası');
ylabel('Güvenilirlik');
title('Çerçeve Başına Ağ Güvenilirliği');
grid on;

figure;
plot(1:max_epoch, packet_drop_rate, 'LineWidth', 2, 'Color', 'y');
xlabel('Çerçeve Numarası');
ylabel('Paket Kaybı Oranı');
title('Çerçeve Başına Paket Kaybı Oranı');
grid on;

figure;
plot(1:max_epoch, latency, 'LineWidth', 2, 'Color', 'b');
xlabel('Çerçeve Numarası');
ylabel('Gecikme (s)');
title('Çerçeve Başına Ağ Gecikmesi');
grid on;

figure;
stem(1:num_Nodes, num_neighbors, 'LineWidth', 1.5);
xlabel('Düğüm Kimlikleri');
ylabel('Komşu Sayıları');
title('Ağ Bağlantıları');
grid on;

figure;
semilogy(1:max_epoch, collisionCount, 'LineWidth', 2);
xlabel('Saniye');
ylabel('Çakışma Sayısı');
title('Küresel Çakışma İzlemesi');
grid on;

figure;
bar(1:max_epoch, collisionCount, 'k');
xlabel('Saniye');
ylabel('Çakışma İşaretleri');
title('Çakışma İzleme Grafiği');
grid on;

function N0 = calculate_N0(channel_model, power_max, R, min_SINR)
    gain_linear = db2mag(channel_model.antenna_gain);
    sinr_min_linear = db2pow(min_SINR);
    alpha = channel_model.path_loss_Exponent;
    power_max_linear = db2pow(power_max);

```

```

N0 = power_max_linear * gain_linear^2 / R^alpha / sinr_min_linear;
fprintf('Calculated N0: %e', N0);
if isnan(N0) || isinf(N0) || N0 <= 0
    error('Calculated N0 is invalid. Check the input parameters.');
```

end

```

end

function [G_coverage, G_overlay, distance_matrix, SNR_matrix, H] =
Create_Network_graph(Locations, min_SINR, channel_model, power_max, N0)
    num_nodes = size(Locations, 1);
    z = Locations(:, 1) + 1i * Locations(:, 2);
    Z = meshgrid(z);
    distance_matrix = abs(Z - Z.');
```

gain\_linear = db2mag(channel\_model.antenna\_gain);

alpha = channel\_model.path\_loss\_Exponent;

d = eye(size(distance\_matrix), 'logical');

H = gain\_linear^2 ./ distance\_matrix.^alpha;

H(d) = 0;

power\_max\_linear = db2pow(power\_max);

SNR\_matrix = power\_max\_linear \* H / N0;

SNR\_matrix(d) = 0;

A\_coverage = SNR\_matrix >= db2pow(min\_SINR);

A\_overlay = SNR\_matrix > 0;

B\_coverage = SNR\_matrix(A\_coverage);

B\_overlay = SNR\_matrix(A\_overlay);

G\_coverage = digraph(A\_coverage, 'omitselfloops');

G\_coverage.Edges.SNR = B\_coverage;

G\_coverage.Nodes.ind = (1:num\_nodes)';

G\_coverage.Nodes.Location = z;

G\_overlay = digraph(A\_overlay, 'omitselfloops');

G\_overlay.Edges.SNR = B\_overlay;

G\_overlay.Nodes.ind = (1:num\_nodes)';

G\_overlay.Nodes.Location = z;

end

```

function linear_value = db2mag(dB_value)
    linear_value = 10^(dB_value / 20);
end

function linear_value = db2pow(dB_value)
    linear_value = 10^(dB_value / 10);
end

function Frame_structure = initialize_frame_structure(frame_size, num_NAS,
NAS_slots, num_LAS, LAS_slots)
    if numel(NAS_slots) ~= num_NAS
        error('The number of NAS slots does not match the length of the
NAS_slots array.');
```

end

```

    if numel(LAS_slots) ~= num_LAS
        error('The number of LAS slots does not match the length of the
LAS_slots array.');
```

end

```

    if ~isempty(intersect(NAS_slots, LAS_slots))
        error('NAS and LAS slots should not overlap.');
```

end

```

    Frame_structure = struct();
    Frame_structure.frame_size = frame_size;
    Frame_structure.num_NAS = num_NAS;
```

```

Frame_structure.NAS_slots = NAS_slots;
Frame_structure.num_LAS = num_LAS;
Frame_structure.LAS_slots = LAS_slots;
fprintf('Frame Size: %d', frame_size);
fprintf('Number of NAS: %d', num_NAS);
fprintf('NAS Slots: ');
disp(NAS_slots);
fprintf('Number of LAS: %d', num_LAS);
fprintf('LAS Slots: ');
disp(LAS_slots);
end

function Nodes_process = initialize_node_process_NbIA(num_Nodes,
nodes_locations, frame_size)
Nodes_process = repmat(struct('location', [], 'NPS_slots', [],
'veLOCITY', []), num_Nodes, 1);
slots_per_node = floor(frame_size / num_Nodes);
for k = 1:num_Nodes
node_slots = mod((k-1)*slots_per_node:(k*slots_per_node-1),
frame_size) + 1;
Nodes_process(k).location = nodes_locations(k, :);
Nodes_process(k).NPS_slots = node_slots;
Nodes_process(k).velocity = [0, 0];
end
fprintf('Initialized %d node processes:', num_Nodes);
for k = 1:num_Nodes
fprintf('Node %d: Location (%.2f, %.2f), Slots: ', k,
nodes_locations(k, 1), nodes_locations(k, 2));
disp(Nodes_process(k).NPS_slots);
end
end

function [nodes_locations, velocities] =
update_node_locations(nodes_locations, velocities, width, height, max_speed,
direction_change_probability, time_step)
num_Nodes = size(nodes_locations, 1);
for i = 1:num_Nodes
if rand < direction_change_probability
theta = 2 * pi * rand;
velocities(i, :) = max_speed * [cos(theta), sin(theta)];
end
nodes_locations(i, :) = nodes_locations(i, :) + velocities(i, :) *
time_step;
if nodes_locations(i, 1) < 0 || nodes_locations(i, 1) > width
velocities(i, 1) = -velocities(i, 1);
nodes_locations(i, 1) = max(0, min(nodes_locations(i, 1),
width));
end
if nodes_locations(i, 2) < 0 || nodes_locations(i, 2) > height
velocities(i, 2) = -velocities(i, 2);
nodes_locations(i, 2) = max(0, min(nodes_locations(i, 2),
height));
end
end
end
end

```

## EK-2 Flutter ile Geliştirilen Giriş Ekranı Kaynak Kodu

```
import 'dart:ui';
import 'package:flutter/material.dart';

void main() {
  runApp(MyApp());
}

class MyApp extends StatelessWidget {
  @override
  Widget build(BuildContext context) {
    return MaterialApp(
      debugShowCheckedModeBanner: false,
      home: LoginPage(),
    );
  }
}

class LoginPage extends StatelessWidget {
  @override
  Widget build(BuildContext context) {
    return Stack(
      children: [
        // Arka plan sabit, ekran boyutuna göre dışarıda tanımlandı
        Positioned.fill(
          child: Image.asset(
            'assets/background.png',
            fit: BoxFit.cover,
          ),
        ),
        Positioned.fill(
          child: BackdropFilter(
            filter: ImageFilter.blur(sigmaX: 0.5, sigmaY: 0.5),
            child: Container(
              color: Colors.grey.withOpacity(0.7),
            ),
          ),
        ),
      ],
    );

    // Scaffold içerik için kullanılıyor, arka plan bundan etkilenmiyor
    Scaffold(
      backgroundColor: Colors.transparent,
      resizeToAvoidBottomInset: true,
      body: SafeArea(
        child: SingleChildScrollView(
          padding: const EdgeInsets.symmetric(horizontal: 20),
          child: Column(
            children: [
              const SizedBox(height: 10),
              Image.asset(
                'assets/logo.png',
                width: 350,
                height: 350,
                fit: BoxFit.contain,
              ),
              const SizedBox(height: 10),
              TextField(
                style: const TextStyle(fontWeight: FontWeight.bold),
              ),
            ],
          ),
        ),
      ),
    );
  }
}
```

```

decoration: InputDecoration(
  filled: true,
  fillColor: Colors.white.withOpacity(0.9),
  border: const OutlineInputBorder(),
  labelText: 'Kullanıcı Adı',
  labelStyle: const TextStyle(fontWeight: FontWeight.bold),
),
),
const SizedBox(height: 15),
TextField(
  obscureText: true,
  style: const TextStyle(fontWeight: FontWeight.bold),
  decoration: InputDecoration(
    filled: true,
    fillColor: Colors.white.withOpacity(0.9),
    border: const OutlineInputBorder(),
    labelText: 'Şifre',
    labelStyle: const TextStyle(fontWeight: FontWeight.bold),
  ),
),
const SizedBox(height: 20),
ElevatedButton(
  onPressed: () {},
  style: ElevatedButton.styleFrom(
    backgroundColor: const Color.fromARGB(255, 17, 83, 20),
    foregroundColor: Colors.white,
    padding: const EdgeInsets.symmetric(horizontal: 60, vertical: 15),
  ),
  child: const Text(
    'Giriş',
    style: TextStyle(fontSize: 16, fontWeight: FontWeight.bold),
  ),
),
const SizedBox(height: 15),
const Text(
  '---- Hesabımız yok mu? ----',
  style: TextStyle(
    color: Colors.white,
    fontWeight: FontWeight.bold,
  ),
),
TextButton(
  onPressed: () {},
  child: const Text(
    'Kayıt Ol',
    style: TextStyle(
      fontSize: 16,
      fontWeight: FontWeight.bold,
      color: Colors.lightGreenAccent,
    ),
  ),
),
const SizedBox(height: 40),
const Text(
  'Bu uygulama\nAYOOB GHUFRAN IHSAN QAYAJI\n tarafından
geliştirilmiştir\nDanışman: Müciz Özcan',
  textAlign: TextAlign.center,
  style: TextStyle(
    color: Colors.white,
    fontWeight: FontWeight.bold,
  ),
),

```

```
        fontSize: 12,  
      ),  
    ),  
    const SizedBox(height: 30),  
  ],  
),  
),  
),  
),  
],  
);  
}  
}
```



### EK-3 Akıllı Tarımsal Sulama Mobil Uygulaması Ana Arayüz Kodları (Flutter)

```

import 'package:flutter/material.dart';

void main() => runApp(SmartIrrigationApp());

class SmartIrrigationApp extends StatelessWidget {
  @override
  Widget build(BuildContext context) {
    return MaterialApp(
      debugShowCheckedModeBanner: false,
      theme: ThemeData(
        primarySwatch: Colors.green,
        scaffoldBackgroundColor: Colors.grey.shade100,
      ),
      home: DashboardPage(),
    );
  }
}

class DashboardPage extends StatefulWidget {
  @override
  _DashboardPageState createState() => _DashboardPageState();
}

class _DashboardPageState extends State<DashboardPage> {
  double soilMoisture = 34.5;
  double airHumidity = 60.2;
  double airTemperature = 28.3;
  String selectedPlant = 'Domates';
  bool isIrrigationOn = false;
  String weatherForecast = "Yağmur ihtimali: 20%";

  final List<String> plants = ['Domates', 'Biber', 'Salatalık', 'Patlıcan', 'Mısır'];

  void toggleIrrigation() {
    setState() {
      isIrrigationOn = !isIrrigationOn;
    });
  }

  @override
  Widget build(BuildContext context) {
    return Scaffold(
      appBar: AppBar(
        title: Row(
          children: [
            Icon(Icons.agriculture_outlined),
            SizedBox(width: 8),
            Text("Akıllı Tarımsal Sulama"),
          ],
        ),
      actions: [
        IconButton(
          icon: Icon(Icons.settings),
          onPressed: () => _openSettings(context),
        ),
      ],
    );
  }
}

```

```

body: ListView(
  padding: const EdgeInsets.all(16.0),
  children: [
    _buildSensorCard(
      icon: Icons.water_drop,
      title: "Toprak Nem",
      value: soilMoisture,
      unit: "%",
    ),
    _buildSensorCard(
      icon: Icons.grain,
      title: "Hava Nem",
      value: airHumidity,
      unit: "%",
    ),
    _buildSensorCard(
      icon: Icons.thermostat,
      title: "Hava Sıcaklığı",
      value: airTemperature,
      unit: "°C",
    ),
    SizedBox(height: 10),
    Card(
      elevation: 4,
      shape: RoundedRectangleBorder(borderRadius: BorderRadius.circular(12)),
      child: ListTile(
        leading: Icon(Icons.cloud, color: Colors.blueAccent),
        title: Text(weatherForecast),
      ),
    ),
    SizedBox(height: 10),
    Card(
      elevation: 4,
      shape: RoundedRectangleBorder(borderRadius: BorderRadius.circular(12)),
      child: Padding(
        padding: const EdgeInsets.symmetric(horizontal: 16.0, vertical: 10),
        child: Column(
          crossAxisAlignment: CrossAxisAlignment.start,
          children: [
            Text("Bitki Türü", style: TextStyle(fontSize: 16, fontWeight: FontWeight.bold)),
            DropdownButton<String>(
              isExpanded: true,
              value: selectedPlant,
              onChanged: (value) {
                setState() {
                  selectedPlant = value!;
                };
              },
              items: plants.map((plant) {
                return DropdownMenuItem(
                  value: plant,
                  child: Text(plant),
                );
              }).toList(),
            ),
          ],
        ),
      ),
    ),
    SizedBox(height: 20),
  ],
)

```



```

margin: EdgeInsets.only(bottom: 12),
shape: RoundedRectangleBorder(borderRadius: BorderRadius.circular(12)),
child: ListTile(
  leading: Icon(icon, size: 30, color: Colors.green.shade700),
  title: Text(title, style: TextStyle(fontWeight: FontWeight.bold)),
  trailing: Text("${value.toStringAsFixed(1)} $unit", style: TextStyle(fontSize: 16)),
),
);
}

void _openSettings(BuildContext context) {
  showModalBottomSheet(
    context: context,
    shape: RoundedRectangleBorder(
      borderRadius: BorderRadius.vertical(top: Radius.circular(20)),
    ),
    builder: (context) => Padding(
      padding: const EdgeInsets.all(60.0),
      child: Column(
        mainAxisAlignment: MainAxisAlignment.min,
        crossAxisAlignment: CrossAxisAlignment.start,
        children: [
          Text("Ayarlar", style: TextStyle(fontSize: 18, fontWeight: FontWeight.bold)),
          Divider(),
          ListTile(
            leading: Icon(Icons.location_on_outlined),
            title: Text("Lokasyon Ayarları"),
            onTap: () {},
          ),
          ListTile(
            leading: Icon(Icons.notifications_none),
            title: Text("Bildirimler"),
            onTap: () {},
          ),
          ListTile(
            leading: Icon(Icons.language),
            title: Text("Dil Seçenekleri"),
            onTap: () {},
          ),
          ListTile(
            leading: Icon(Icons.info_outline),
            title: Text("Uygulama Hakkında"),
            onTap: () {},
          ),
        ],
      ),
    ),
  );
}

```

## EK-4 Tarım İstasyonları İzleme Paneli Mobil Arayüz Kodları (Flutter)

```

import 'package:flutter/material.dart';

void main() => runApp(SmartIrrigationApp());

class SmartIrrigationApp extends StatelessWidget {
  @override
  Widget build(BuildContext context) {
    return MaterialApp(
      debugShowCheckedModeBanner: false,
      theme: ThemeData(
        scaffoldBackgroundColor: Color(0xFFFF5F6FA),
        textTheme: Theme.of(context).textTheme.apply(fontFamily: 'Arial'),
      ),
      home: DashboardPage(),
    );
  }
}

class DashboardPage extends StatelessWidget {
  final List<StationData> stations = [
    StationData(name: "Tarım İstasyonu No: 1", lastHour: 1.8, today: 2.9, yesterday: 5.8, week:
    11.9, temp: 16.3, tempMax: 18.4, tempMin: 12.3, humidity: 92.9, humidityMax: 95.3, humidityMin: 87.5),
    StationData(name: "Tarım İstasyonu No: 2", lastHour: 0.7, today: 1.2, yesterday: 3.5, week: 8.3,
    temp: 21.0, tempMax: 22.5, tempMin: 17.6, humidity: 78.2, humidityMax: 81.0, humidityMin: 74.4),
    StationData(name: "Tarım İstasyonu No: 3", lastHour: 2.3, today: 4.1, yesterday: 6.9, week:
    14.5, temp: 18.1, tempMax: 20.0, tempMin: 15.0, humidity: 85.7, humidityMax: 88.3, humidityMin: 80.0),
  ];

  @override
  Widget build(BuildContext context) {
    return Scaffold(
      appBar: AppBar(
        title: Text('Tarım İstasyonları Paneli', style: TextStyle(fontSize: 20)),
        backgroundColor: Colors.green.shade600,
      ),
      body: ListView.builder(
        itemCount: stations.length,
        itemBuilder: (context, index) {
          final station = stations[index];
          return Card(
            margin: EdgeInsets.all(12),
            shape: RoundedRectangleBorder(borderRadius: BorderRadius.circular(16)),
            elevation: 5,
            child: Padding(
              padding: const EdgeInsets.all(16),
              child: Column(
                crossAxisAlignment: CrossAxisAlignment.start,
                children: [
                  Text(station.name, style: TextStyle(fontSize: 18, fontWeight: FontWeight.bold)),
                  SizedBox(height: 10),
                  Row(
                    mainAxisAlignment: MainAxisAlignment.spaceBetween,
                    children: [
                      infoColumn("Yağış", "${station.lastHour} mm", "Son 1s"),
                      infoColumn("", "${station.today} mm", "Bugün"),
                      infoColumn("", "${station.yesterday} mm", "Dün"),
                      infoColumn("", "${station.week} mm", "Bu Hafta"),
                    ],
                  ),
                ],
              ),
            ),
          );
        },
      ),
    );
  }
}

```



```
final double tempMin;  
final double humidity;  
final double humidityMax;  
final double humidityMin;
```

```
StationData(  
    required this.name,  
    required this.lastHour,  
    required this.today,  
    required this.yesterday,  
    required this.week,  
    required this.temp,  
    required this.tempMax,  
    required this.tempMin,  
    required this.humidity,  
    required this.humidityMax,  
    required this.humidityMin,  
    });  
}
```



## EK-5 İstasyon Konumlama Harita Arayüzü (Flutter)

```

import 'package:flutter/material.dart';
import 'package:flutter_map/flutter_map.dart';
import 'package:latlong2/latlong.dart';

void main() => runApp(HaritaUygulamasi());

class HaritaUygulamasi extends StatelessWidget {
  const HaritaUygulamasi({super.key});

  @override
  Widget build(BuildContext context) {
    return MaterialApp(
      debugShowCheckedModeBanner: false,
      theme: ThemeData(
        colorScheme: ColorScheme.fromSeed(seedColor: Colors.teal),
        useMaterial3: true,
      ),
      home: const HaritaEkрани(),
    );
  }
}

class HaritaEkрани extends StatefulWidget {
  const HaritaEkрани({super.key});

  @override
  State<HaritaEkрани> createState() => _HaritaEkраниState();
}

class _HaritaEkраниState extends State<HaritaEkрани> {
  List<LatLng> istasyonlar = [
    LatLng(37.0, 35.3),
    LatLng(37.1, 35.4),
    LatLng(36.9, 35.2),
  ];

  LatLng? secilenKonum;

  @override
  Widget build(BuildContext context) {
    return Scaffold(
      appBar: AppBar(
        title: const Text('İstasyon Haritası'),
        actions: [
          IconButton(icon: const Icon(Icons.settings), onPressed: () {}),
        ],
      ),
      body: Stack(
        children: [
          FlutterMap(
            options: MapOptions(
              initialCenter: LatLng(37.0, 35.3),
              initialZoom: 10,
              onTap: (tapPosition, latlng) {
                setState(() {
                  secilenKonum = latlng;
                });
              },
            ),
          ),
        ],
      ),
    );
  }
}

```

```

children: [
  TileLayer(
    urlTemplate:
      'https://{s}.tile.openstreetmap.org/{z}/{x}/{y}.png',
    subdomains: ['a', 'b', 'c'],
  ),
  MarkerLayer(
    markers: [
      ...istasyonlar.map(
        (konum) => Marker(
          point: konum,
          width: 40,
          height: 40,
          child: const Icon(
            Icons.location_on,
            color: Colors.red,
            size: 30,
          ),
        ),
      ),
      if (secilenKonum != null)
        Marker(
          point: secilenKonum!,
          width: 40,
          height: 40,
          child: const Icon(
            Icons.add_location_alt,
            color: Colors.blue,
            size: 32,
          ),
        ),
    ],
  ),
],
),
SafeArea(
  child: Align(
    alignment: Alignment.bottomCenter,
    child: Padding(
      padding: const EdgeInsets.symmetric(
        horizontal: 16.0,
        vertical: 20.0,
      ),
    ),
    child: Row(
      mainAxisAlignment: MainAxisAlignment.spaceEvenly,
      children: [
        ElevatedButton.icon(
          onPressed: () {
            if (secilenKonum != null) {
              setState(() {
                istasyonlar.add(secilenKonum!);
                secilenKonum = null;
              });
            }
          },
          icon: const Icon(Icons.add_location_alt),
          label: const Text("İstasyon Ekle"),
          style: ElevatedButton.styleFrom(
            backgroundColor: Colors.green,
            foregroundColor: Colors.white,

```



**EK-6 NodeMCU Tabanlı Sulama Kontrol Kodu**

```
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <FirebaseESP8266.h>
#include <DHT.h>
#include <Wire.h>

// WiFi Ayarları
#define WIFI_SSID "AYOOB"
#define WIFI_PASSWORD "12345678"

// Firebase Ayarları
#define FIREBASE_HOST "seninproje.firebaseio.com"
#define FIREBASE_AUTH "senin_firebase_secret"

FirebaseData firebaseData;

// Sensör ve Röle Pinleri
#define DHTPIN D2
#define DHTTYPE DHT11
#define SOIL_MOISTURE_PIN A0
#define RELAY_PIN D1

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

// Sulama Eşiği
int moistureThreshold = 500; // 0 (ıslak) - 1023 (kuru) arası

// Zamanlama
unsigned long previousMillis = 0;
const long interval = 10000; // Her 10 saniyede veri gönderimi

void setup() {
  Serial.begin(115200);
```

```
pinMode(RELAY_PIN, OUTPUT);
digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH); // Pompa kapalı (aktif düşük röle)

dht.begin();

WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASSWORD);
Serial.print("WiFi bağlanıyor...");
while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
  delay(500);
  Serial.print(".");
}
Serial.println("Bağlandı!");
Serial.println(WiFi.localIP());

Firebase.begin(FIREBASE_HOST, FIREBASE_AUTH);
Firebase.reconnectWiFi(true);
}

void loop() {
  unsigned long currentMillis = millis();
  if (currentMillis - previousMillis >= interval) {
    previousMillis = currentMillis;

    // Sensör Okumaları
    float temperature = dht.readTemperature();
    float humidity = dht.readHumidity();
    int soilMoisture = analogRead(SOIL_MOISTURE_PIN);

    // Geçersiz veri kontrolü
    if (isnan(temperature) || isnan(humidity)) {
      Serial.println("DHT okuma hatası!");
      return;
    }
  }
}
```

```
// Verileri seri porta yaz
Serial.println("-----");
Serial.printf("Toprak Nem: %d\n", soilMoisture);
Serial.printf("Sıcaklık: %.1f°C\n", temperature);
Serial.printf("Nem: %.1f%%\n", humidity);

// Firebase'e gönder
Firebase.setFloat(firebaseData, "/sensor/temperature", temperature);
Firebase.setFloat(firebaseData, "/sensor/humidity", humidity);
Firebase.setInt(firebaseData, "/sensor/soil_moisture", soilMoisture);

// Sulama Kararı
if (soilMoisture > moistureThreshold) {
    // Toprak kuruyrsa sulamayı başlat
    digitalWrite(RELAY_PIN, LOW); // Röle aktif (pompa açık)
    Firebase.setString(firebaseData, "/system/irrigation_status", "AKTİF");
    Serial.println(">> Sulama BAŞLADI");
} else {
    digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH); // Röle pasif (pompa kapalı)
    Firebase.setString(firebaseData, "/system/irrigation_status", "PASİF");
    Serial.println(">> Sulama DURDU");
}
}
}
```