

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SU KALİTESİ TAKİBİ İÇİN KABLOSUZ SENSÖR AĞLARI
VE SİSTEM TASARIMI**

İsmail AĞIR

DOKTORA TEZİ
Biyomühendislik Anabilim Dalı
Biyomühendislik Programı

Danışman
Prof. Dr. İbrahim IŞILDAK

Şubat, 2021

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SU KALİTESİ TAKİBİ İÇİN KABLOSUZ SENSÖR AĞLARI VE SİSTEM
TASARIMI**

İsmail AĞIR tarafından hazırlanan tez çalışması 16.02.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyomühendislik Anabilim Dalı Biyomühendislik Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. İbrahim IŞILDAK
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. İbrahim IŞILDAK, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Zafer Ömer ÖZDEMİR, Üye
Sağlık Bilimleri Üniversitesi

Dr.Öğr.Üyesi Mustafa Utku KALAY, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Melda ALTIKATOĞLU YAPAÖZ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Murat YOLCU, Üye
Giresun Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. İbrahim IŞILDAK sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Su Kalitesi Takibi İçin Kablosuz Sensör Ağları ve Sistem Tasarımı başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

İsmail AĞIR

İmza

*Aileme ve
tüm sevdiklerime*



TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda bana yardımcı olan ve yol gösteren danışman hocam Prof. Dr. İbrahim İŞILDAK'a, değerli tez jürisi hocalarıma, çalışmama katkılar sunan laboratuvar arkadaşlarım Arş. Gör. Mustafa NİĞDE, Arş. Gör. Rıdvan YILDIRIM ve Dr. Özlem TAVUKÇUOĞLU'na ve hayatım boyunca desteğini eksik etmeyen aileme teşekkürlerimi sunuyorum.

İsmail AĞIR

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
TABLO LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xvi
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	3
1.3 Hipotez	4
2 GENEL BİLGİLER	5
2.1 Su Kalitesi	5
2.2 Su Kalitesi Takibi	6
2.2.1 Hedef Parametreler	6
2.3 İyon Seçici Elektrotlar	8
2.3.1 Türleri	11
2.3.2 Uygulama Alanları	12
2.4 Kablosuz Sensör Ağları	13
2.4.1 Mevcut KSA Uygulama Örnekleri	14
2.5 KSA Altyapı ve Prokol Yapıları	16
2.5.1 Yaygın Kablosuz Ağ Teknolojileri	20
2.5.2 Güncel Sorunlar ve Hedeflenenler	22
3 MATERYAL VE METOT	24
3.1 Sensörlerin Geliştirilmesi	24
3.1.1 Kullanılan Kimyasallar ve Cihazlar	24
3.1.2 İyon Seçici Elektrotların Hazırlanması	25

3.1.3	Sensör dizisinin hazırlanması	26
3.1.4	Sensör üretim testleri	28
3.2	Kablosuz Sensör Ağının Geliştirilmesi	28
3.2.1	Veri Toplama Devresinin Geliştirilmesi	31
3.2.2	Veri Toplama Yazılımının Geliştirilmesi	38
3.2.3	Testler	44
3.3	Veri Toplama Platformunun Geliştirilmesi	45
3.3.1	Gömülü Yazılım	45
3.3.2	Üç Boyutlu Modellerin Üretimi	48
3.3.3	Sistem Entegrasyonu	48
3.3.4	Testler	50
4	SONUÇ VE ÖNERİLER	53
4.1	Sonuçlar	53
4.1.1	Harcanan Enerjinin Ölçümü	53
4.1.2	Ağ Kalitesi Testleri	56
4.1.3	Arayüz Yazılımı	59
4.1.4	Verilerin Arşivlenmesi	62
4.1.5	İyon Seçici Elektrot Testleri	63
4.1.6	Maliyet Analizi	77
4.2	Öneriler	78
	KAYNAKÇA	83
A	3B model ve devre çizimleri	96
A.1	Modeller	96
A.1.1	5 kanallı sensör tutucu	96
A.1.2	9 kanallı sensör tutucu	97
A.1.3	Platform kutu tasarımı	98
A.1.4	4 katmanlı PCB stack tutucu	99
A.2	Devreler	100
A.2.1	Basılı devre kartı üst katman şematiği 1	100
A.2.2	Basılı devre kartı üst katman şematiği 2	101
A.2.3	Basılı devre kartı alt katman şematiği 1	102
A.2.4	Basılı devre kartı alt katman şematiği 2	103
B	Test kodları	104
B.1	Güç tasarrufu, derin uyku testi	104
B.2	Derin uygu güç tasarrufu gömülü test kodu	105
B.3	RSSI ölçme testi	105

B.4 Yeniden bağlanma testi	107
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	108



SİMGE LİSTESİ

I	Akım
a	Aktivite
°	Derece
f	Frekans
R	1. Gaz Sabiti, 2. Direnç
E	Gerilim
G	Gibbs Serbest Enerjisi
C	Kapasitans

KISALTMA LİSTESİ

ADC	Analog to Digital Converter
dBm	decibel-milliwatts
daqWise	Data Acquisition Wireless Sensor
DC	Doğrusal Akım
EKTL	En Küçük Tayin Lmiti
EMF	Elektromotor Kuvveti
FDM	Fused Deposition Modelling
I ² C	Inter-Integrated Circuit
I ² S	Inter-IC Sound
ICMP	Internet Control Message Protocol
IDE	Integrated Development Environment
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
ISE	Ion Selective Elektrode
IDE	Tümleşik geliştirme ortamı
ISO	International Organization for Standardization
KSA	Kablosuz Sensör Ağları
LNA	Low-noise Amplifier
LoRa	Long Range Wide Area
LSB	Least Significant Bit
MAC	Media Access Control
mAh	Mili-amper Saat
MUX	Multiplexer, Çoklayıcı

MQTT	MQ Telemetry Transport
Op-amp	Operational Amplificator
OSI	Open System Interconnection
PCB	Printed Circuit Board
PLA	Poly Lactic Acid
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RTT	Round-trip time
SPI	Serial Peripheral Interface
SSID	Service Set Identifier
TCP	Transmission Control Protocol
UART	Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter
UDP	User Datagram Protocol
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WSN	Wireless Sensor Networks

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Yıllara göre su kalitesi takibi konusunda yapılan bilimsel çalışma sayısı	4
Şekil 2.1	Potansiyometrik hücre	10
Şekil 2.2	KSA'daki ağ topolojileri	17
Şekil 2.3	KSA protokol yığını diyagramı ve teorik katmanları	18
Şekil 3.1	Katı hal iyon seçici elektrot diyagramı [97]	24
Şekil 3.2	3 kanallı sensör tutucu 3B tasarımı	27
Şekil 3.3	5 Kanallı sensör tutucu 3B tasarımı	27
Şekil 3.4	5 Kanallı sensör tutucu 3B tasarımının 3 çeyrek kesiti	28
Şekil 3.5	Kurulan Wi-Fi temelli ağın topolojisi	29
Şekil 3.6	PCB stack, yığın baskı devre yapısı	32
Şekil 3.7	Veri toplama devresi diyagramı	32
Şekil 3.8	8 sensör kanalı içeren sistem	34
Şekil 3.9	KSA veri toplama yazılımının ilk açılıştaki ana ekran görüntüsü . . .	39
Şekil 3.10	daqWise yazılımının tüm görevleri	40
Şekil 3.11	KSA veri toplama yazılımının sensör düğümü ekleme aşamasındaki çalışma algoritması	41
Şekil 3.12	Sensör düğümlerinden gelen verinin formatı	41
Şekil 3.13	Yazılıma eklenmiş sensör düğümleri, Nod1 ve Nod2 (geliştirilme aşamasından alınmıştır)	42
Şekil 3.14	Veri işleyici algoritması	43
Şekil 3.15	Her bir sensör düğümü için oluşturulan sekmeler	44
Şekil 3.16	Debug penceresi uygulama örneği	45
Şekil 3.17	Gömülü yazılımın algoritması	46
Şekil 3.18	Gömülü yazılımın uyku döngüsü	48
Şekil 3.19	Platformun entegrasyon şablonu	49
Şekil 3.20	Sistemi çalıştırma algoritması	50
Şekil 3.21	İki sensör bir okuma kartının baskı devre kartı yığın yapısıyla birleştirilmiş hali	51
Şekil 3.22	Üç boyutlu baskıyla alınmış sensör düğümü kutusu	51
Şekil 3.23	Beşli sensör tutucu ve sistemin ölçme sırasındaki görüntüsü	52

Şekil 3.24 Başka bir 3B baskı kutu içerisinde kartlar, çoklu sensör tutucuları ve çeşitli sensörler	52
Şekil 4.1 ESP-12S IoT modülünün harcadığı akım-zaman grafiği	54
Şekil 4.2 ESP-12S IoT modülünün 5 saniye aralıklarla harcadığı akım-zaman grafiği	55
Şekil 4.3 OLED ekranda RSSI sonuçları	57
Şekil 4.4 Mesafe-RSSI grafiği	58
Şekil 4.5 20 metre mesafeden örnek ping/ RTT testi sonuçları	59
Şekil 4.6 Yazılım analizleri	60
Şekil 4.7 Düğüm tarama sırasında harcanan kaynaklar	61
Şekil 4.8 Veri alma sırasında harcanan kaynaklar	62
Şekil 4.9 Yazılımın düğüm ve sensör verileri arşivleme şeması	63
Şekil 4.10 Amonyum basamaklı ölçümleri	64
Şekil 4.11 Amonyum sensörü ortalama kalibrasyon grafiği	65
Şekil 4.12 Nitrat için basamaklı ölçümler grafiği	66
Şekil 4.13 Nitrat sensörü ortalama kalibrasyon grafiği	67
Şekil 4.14 Amonyum sensörün en küçük tayin limitinin bulunması	68
Şekil 4.15 Nitrat sensörün en küçük tayin limitinin bulunması	69
Şekil 4.16 Potasyum basamaklı ölçümleri grafiği	70
Şekil 4.17 Potasyum sensörü ortalama kalibrasyon grafiği	71
Şekil 4.18 Caption	72
Şekil 4.19 pH sensörü ortalama kalibrasyon grafiği	73
Şekil 4.20 pH sensörünün pH 4,7 ve 10 değerlerinde tekrar testleri grafiği . . .	74
Şekil 4.21 Çoklu sensör tutucuyla tüm sensörlerin birlikte testi potansiyel-zaman grafiği	75
Şekil 4.22 Çoklu sensör tutucuyla tüm sensörlerin birlikte testi milimolar, pH -zaman grafiği	76
Şekil A.1 Farklı açılardan 5 kanallı tutucunun çizimi	96
Şekil A.2 Farklı açılardan 9 kanallı tutucunun çizimi	97
Şekil A.3 9 kanal yollu platform kutusu tasarımı	98
Şekil A.4 9 kanal yollu, 4 katman PCB yığın yapabilen tutucunun parçaları . .	99
Şekil A.5 Basılı devre kartı üst katman şematığı 1	100
Şekil A.6 Basılı devre kartı üst katman şematığı 2	101
Şekil A.7 Basılı devre kartı alt katman şematığı 1	102
Şekil A.8 Basılı devre kartı alt katman şematığı 2	103

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	KSA sınıflandırması	14
Tablo 2.2	Yaygın kullanılan ağ protokollerinin karşılaştırması	21
Tablo 3.1	İyon seçici elektrotların içerikleri	25
Tablo 4.1	Donanımın tüm parametreleri	56
Tablo 4.2	Mesafe bağlantı kalitesi testi sonuçları	59
Tablo 4.3	Tüm sensörlerin hesaplanan kalibrasyon değerleri	67
Tablo 4.4	Kullanılan parçaların güncel fiyatları tablosu (2020)	77
Tablo 4.5	Özgün katkıların özet tablosu	78

Su Kalitesi Takibi İçin Kablosuz Sensör Ağları ve Sistem Tasarımı

İsmail AĞIR

Biyomühendislik Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. İbrahim IŞILDAK

Sahip olduğumuz doğal kaynaklar sınırsız değildir. Sanayi ve tarım faaliyetlerinin artması ve şehirlerin hızla büyüüp daha geniş alanlara yayılması neticesinde, doğal kaynakların hızlı bir şekilde kirlenmesi, günümüzde karşılaştığımız en büyük sorunlardandır. Çevre ve yaşamın temellerinden olan su ve bu suyun temizliği (çeşitli kimyasal ve fiziksel değişkenlerin standartlarını ifade eden haliyle; kalitesi) tüm insanlık için hayati öneme sahiptir.

Tez çalışmamızda, günlük hayatta kullandığımız su kaynaklarının takibine ve korunmasına yönelik bir sistem geliştirilmesi hedeflenmiştir. Tez çalışması kapsamında üretilen sistem, su kalitesi tanımında yer alan kimyasal ve fiziksel su kalitesi parametrelerini 7 gün 24 saat boyunca sürekli takip edebilen bir altyapıya sahiptir. Bu amaçla çalışmada, elektrokimyasal sensör teknolojilerine uygun bir kablosuz sensör ağları temelli platform geliştirilmiştir.

Tezimizde iyon seçici elektrotlar başta olmak üzere, çeşitli türden sensörler ile su kalitesi parametrelerinin takibini online olarak yapabilen sensör düğümlerinden oluşan, esnek yapılı ve kolay kurulumlu bir platform geliştirilmiştir. Platform, kendisini oluşturan ve tarafımızdan geliştirilen yazılım ve donanımların uyumu sayesinde hem kablosuz sensör ağı hem de nesnelerin interneti konseptini uygulayabilme yeteneğine sahiptir.

Tez kapsamında geliştirdiğimiz platformu denemek için, su kalitesini tehdit eden tarım ve endüstri kaynaklı kirleticilerden yaygın olan bazı analitlerin takibi

sağlanmıştır. Bunlar sudaki nitrat, amonyum ve potasyum iyonları derişimleri ile pH değeridir. Bu kirleticiler, temiz su kaynakları çevresinde yürütölen tarımsal gübreleme veya fabrika süreçleri gibi faaliyetlerin sonucunda suya karışması muhtemel olan kontaminantlardır. Bu kirleticilerin erken ve hızlı tespiti sayesinde ekosistemin bozulması ve kirletici etkisinin çevreye yayılmasının önüne geçilebilecektir. Tezde üretilen sistem, bu kirleticiler için alarm seviyelerine göre rapor oluşturma ve yetkili uzmanları iletişim kanallarıyla anında bilgilendirme özelliğine de sahiptir.

Tez çalışmamız sonucunda Wi-Fi temelli, düşük güç tüketen, sensör niceliğı ve niteliğı yönünden esnek sensör düğümlerine sahip, kendisine bağı veya bağlanmaya hazır tüm düğümleri tanıyabilen bir ağı sahip, düşük maliyetli ve gelecek çalışmalar için gerekli olacak donanım ve yazılım alt yapısını sunan bir platform, başarıyla üretilmiş ve test edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz sensör ağıları, sensör teknolojisi, iyon seçici elektrotlar, su kalitesi, nesnelerin interneti

Wireless sensor networks for water quality and designing a novel system

İsmail AĞIR

Department of Bioengineering

Doctor of Philosophy Thesis

Advisor: Prof. Dr. İbrahim IŞILDAK

The natural resources we have are not unlimited. As a result of the increase in industrial and agricultural activities and the rapid growth of cities and spread to wider areas, the rapid pollution of natural resources is one of the biggest problems we face today. Water, which is indispensable for the environment and life, and its cleanliness (as it expresses the standards of various chemical and physical variables; its quality) is of vital importance for all humanity.

In our thesis, it is aimed to develop a system for tracking and protecting the water resources we use in daily life. The system, produced within the scope of the thesis, has an infrastructure that can continuously monitor the chemical and physical water quality parameters included in the definition of water quality 24 hours a day, 7 days a week. For this purpose, in this study, a wireless sensor networks based platform has been developed suitable for electrochemical sensor technologies.

In our thesis, a flexible structured and easy-to-install platform has been developed, consisting of sensor nodes that can monitor water quality parameters online with various types of sensors, especially ion-selective electrodes. The platform has the ability to implement both the wireless sensor network and the internet of things concept, thanks to the compatibility of software and hardware developed by us.

In order to test the platform we developed within the scope of the thesis, some common analytes from agriculture and industry originated pollutants that threaten water quality have been monitored. These are the concentrations of nitrate, ammonium

and potassium ions and the pH value in the water. These pollutants are contaminants that are likely to enter water as a result of activities such as agricultural fertilization or factory processes carried out around clean water sources. Thanks to the early and rapid detection of these pollutants, it will be possible to prevent the deterioration of the ecosystem and the spread of the polluting effect to the environment. The system produced in the thesis also has the feature of generating reports for these pollutants according to alarm levels and informing authorized experts instantly through communication channels.

As a result of our thesis, a Wi-Fi-based, low-power platform has been successfully produced and tested. The sensor nodes were flexible in terms of quantity and quality of the sensors. It had a network that could recognize all the nodes attached to it or ready to connect. It was low cost. It also had the necessary hardware and software capacity for future studies.

Keywords: Wireless sensor networks, sensor technology, ion selective electrodes, water quality, internet of things

1.1 Literatür Özeti

Çevre ve su kirliliği nedeniyle bozulan su kaynakları kalitesinin, insanların 21. yüzyılda karşı karşıya kaldığı en büyük sorunlardan birisi olduğu bilinmektedir [1]. Nehir ve göller gibi tatlı su kaynaklarının coğrafi olarak insanların yaşamını sürdürdüğü alanların ve dolayısıyla ekonomik faaliyetlerin merkezinde bulunması nedeniyle, su kalitesinin doğru bir şekilde tayin ve takip edilebilmesi elzem hale gelmiştir [2]. Kullandığımız doğal temiz su kaynaklarından olan nehir ve göllerin su kalitesi, insan hayatı ve çevre ekosisteminin sağlığı ve devamlılığı üzerinde önemli rol oynamaktadır. Çünkü bunlardan faydalanarak tarım yapılmakta, meskenler ve sanayinin su ihtiyaçları karşılanmaktadır. Ayrıca bu su kaynakları, çevre için hayati role sahip olan, kendi içerisinde çok önemli bir ekosistemi taşımaktadır. Dolayısıyla su kalitesinde meydana gelecek kirlilik ve hijyen sorunu gibi bir bozulma, hayatı durdurma noktasına getirebilme riskine sahiptir. Fakat giderek artan bir hızda; şehirleşme, tarım, sanayi gibi insan faaliyetlerinin yol açtığı kirliliğin, su kalitesini bozduğu bir gerçektir [3].

Su, hayatın ve dolayısıyla insan hayatının temellerindendir. En basit düşünceyle her insan yaşamaya devam edebilmek için günlük belirli bir miktarda su içmek zorundadır. İnsan hayatının olmazsa olması olan suyu temiz ve taze bir şekilde her bir bireye ulaştırmak, bu nedenle insanlık tarihinde medeniyetlerin gelişiminin önemli bir parçası olmuştur. Günümüzde bile fakirlik, coğrafi nedenler ve kıtlık sebebiyle, temiz suya ulaşamayan toplumlarda can kayıpları dahi maalesef olmaya devam etmektedir [4].

Su kirliliği mikrobiyolojik ve kimyasal olarak ikiye ayrılmaktadır. Suyun mikrobiyolojik olarak tehlike barındırması çok önemli salgın hastalıkların yayılmasına sebep olmaktadır. İçme sularının kimyasal olarak kaliteli olması da sağlık açısından çok önemlidir. Kimyasal kirleticilerle kirlenmiş suların sağlık üzerinde etkileri akut düzeyde olabileceği gibi her ne kadar mikrobiyolojik kirliliğe göre daha seyrek de olsa

kronik hastalık etkisi de vardır. Sağlığı etkileyen önemli kimyasal kirleticilere örnek olarak nitrat, arsenik, civa ve diğer ağır metaller ve florür verilebilir. Ayrıca kirlenmiş sulara bulunabilen pek çok kanserojen organik, sentetik ve inorganik bileşikler de sağlık için oldukça tehlikelidir [5].

Su kalitesi insan hayatının merkezinde olacak kadar önemli olduğu için dünyada tüm ülkeler ve şehirler, alt yapılarında su kalitesinin korunmasına yönelik pek çok önlem almıştır. Örnek olarak sanayi kuruluşlarının sulara bıraktıkları atıklar için standartlar getirilmiştir ve buna uymayan işletmelere ağır cezalar uygulanmaktadır. Aynı şekilde tarım faaliyetleriyle çevre sularına aşırı gübre, pestisit ve herbisit gibi kirleticilerin karıştırılması yasalarla denetim altına alınarak engellenmeye çalışılmaktadır. Mevcut kanunların uygulanması ve sonuç olarak su kalitesinin kontrol altına alınabilmesi için yetkilendirilmiş kurumlar tarafından sürekli olarak su kalitesi takibi yapılmaktadır. Bu takiplerin yapılabilmesi için gelişmiş laboratuvarlar gerekmektedir. Su kalitesi kontrolü denetimi uygun olan bazı parametreler için ilgili personelin belirli zaman aralıklarında su kaynağına gidip yerinde ölçüm almasıyla da yapılmaktadır fakat gelişmiş analizler için örnek alınıp laboratuvarlara taşınma işlemi yapılmaktadır. Dolayısıyla mevcut durumda, bir su kaynağının kalitesinde bozulma var mı yok mu diye periyodik tespiti için ek olarak özel personele ve taşıma giderlerine ihtiyaç duyulmaktadır. [6] Ayrıca su kalitesi takibi yazılı raporlarla yapılmaktadır. Günümüzde bilginin hızlı hareketi ve ulaşılabilirliğinin sağlanması açısından çevrimiçi (internete bağlı olarak) veri kullanımı zorunlu olmaktadır [7]. Bu eksiklikleri gidermek için yeni teknolojilerin geliştirilip su kalitesi takibi alanına uygulanması gerekmektedir .

Kablosuz sensör ağları ve iyon seçici elektrotlar ile su kalitesi takibinin yapıldığı çok sayıda çalışma vardır. Örneğin bir çalışmada su kültüründe kullanılan ortamda çalışan bir sistem tasarlanmıştır. Burada ağ alt yapısı olarak ZigBee kullanılmıştır [8]. Fakat bu çalışmada kullanılan donanımlar ve sensörler ticari olarak alınmış pH, sıcaklık ve çözünmüş oksijen sensörleridir ve sadece sistem entegrasyonu uygulanmıştır. Başka bir ZigBee temelli çalışmada sadece pH ve turbidimetre ticari sensörleri kullanılmıştır [9]. Su kalitesi pek çok farklı parametreden oluşmaktadır. Literatürde amonyum, nitrat iyonlarının sudaki aktivite seviyesi gibi değerlerin, iyon seçici elektrotlar ile takibini yapan örnekler de vardır. Bir çalışmada LoRa temelli ağ kurulmuştur, platform denilebilecek düzeyde bir sistem kurulmuştur ancak sadece pH ve bakır iyon seçici elektrot kullanılmıştır [10]. Bir çalışmada ZigBee temelli basit bir platform tasarlanmış; pH, nitrat ve klorürün iyon seçici elektrotla ölçümü sağlanmıştır. Bu çalışmada arayüz yoktur, kurulan ağ esnek değildir ve platform tek yönde kullanılmaya yöneliktir (sabit sensör tipleri ve kanal sayısı) [11]. Literatür incelendiğinde Wi-Fi teknolojisi yerine ZigBee'nin özellikle de düşük güç avantajı nedeniyle tercih

edildiği görülmekte, Wi-Fi'nin daha çok uygulama bulması için geliştirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır.

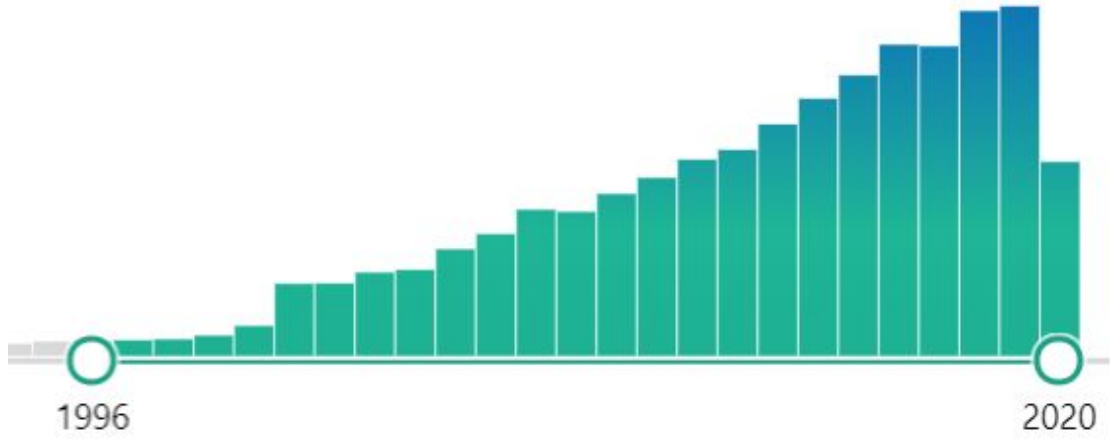
Wi-Fi teknolojisi günlük hayatımızda sürekli olarak kullandığımız, cep telefonları ve bilgisayarlarımızda standart olan bir özelliktir. Fakat yüksek güç tüketimi ve maliyet yüksekliği nedeniyle sensör ağı alanında kendisine çok yer bulmamıştır. Literatürde kapsamlı mevcut teknik durumunu inceleyen yayınlara bakıldığında Wi-Fi temelli su kalitesi takibi sistemlerinde bu yüksek maliyeti ve enerji tüketiminin vurgulandığını görmek mümkündür [12]. Ayrıca mevcut çalışmalarda kurulan ağın yeterince esnek olmadığı, sonradan geliştirmeye kapalı olduğu belirlenmiştir. Çünkü bu çalışmalarda platform mantığı bir kaç analite özgün olarak geliştirilmiş yazılım ve donanımlar ile yapılmıştır. Çalışmamızda su kalitesi parametrelerini iyon seçici elektrotlarla fakat özelleştirilebilir sensör düğümleriyle yapabilecek, düşük güç tüketen ve düşük maliyetli Wi-Fi temelli bir platform geliştirilmiştir. Geliştirilen özgün platform kapsamında gereken tüm yazılımlar mevcut olup, aracı ağ araçlarına ("gateway" ve "broker"lar gibi) da ihtiyaç bırakılmamıştır. Bu da tezimizdeki platformun mevcut literatürden başka bir farkıdır.

Kablosuz sensör ağları uzaktan çevre görüntüleme konusunda önemli uygulamalara sahiptir [13]. Son çeyrek asırda artarak giden bir düzeyde, gelişen ağ teknolojileri ve sensör alanında yapılan ilerlemeler sayesinde KSA kullanımı katlanarak artmıştır. Fakat kablosuz sensör ağı uygulamalarının da geliştirilmesi gereken yönleri veya uygulanmasını kısıtlayan durumları vardır. Tezimizde geliştirmesi tamamlanan takip sistemi sayesinde rutin olarak laboratuvarlarda veya ilgili personelin kaynak başına giderek ölçüm almasıyla yapılan su kalitesi analizlerinden çok daha hızlı ve anlık bir şekilde su kalitesi analizi yapılması sağlanacaktır. Tez sonucunda üretilen sistemin kullanılmasıyla nakliye maliyetleri azaltılacak, zaman kayıplarının önüne geçilecektir. Çevre ve insan sağlığı üzerindeki olası etkilerin önüne en erken şekilde geçilmesi sağlanacaktır. Geliştirilecek olan yenilikçi sistem günümüz tüm modern bilişim teknolojik yapılarına entegre etmeye de uyumlu olacaktır. Bunlara örnek olarak e-devlet ve e-belediyeçilik sistemleri gösterilebilir.

1.2 Tezin Amacı

Su kalitesi insan hayatı için hayati öneme sahip bir konudur. Medeniyetlerin kuruluşunda ve devamında su kalitesinin korunmasına daima en öncelikli konular arasında olmuştur. Günümüzde her bireyin günlük olarak temiz suya ulaşabilmesi için pek çok bilimsel çalışma yapılmıştır ve devam edilmektedir. Şekil 1.1'de PubMed veritabanından alınan bilgilere bağlı olarak, su kalitesi takibi konusunda yapılan

bilimsel yayınların yıllara göre sayısı gösterilmiştir [14].



Şekil 1.1 Yıllara göre su kalitesi takibi konusunda yapılan bilimsel çalışma sayısı

Bu tez su kalitesi parametrelerinden önde gelen öneme sahip kimyasal göstergeler olan pH, amonyum, nitrat, potasyum iyonlarının derişimi, sürekli ve uzaktan takip edebilen tüm bir yenilikçi sistemin geliştirilmesi amacıyla yapılmıştır.

Tezdeki hedefe ulaşılabilmek için disiplinler arası çalışmalar yapılarak veri toplama ve bilişim teknolojileriyle kimyasal sensör teknolojilerinin bir araya getirilmesi sağlanmıştır.

1.3 Hipotez

Su kalitesi takibinin hızlı ve anlık yapılması, yaşanabilecek büyük felaketlerin önüne geçebilmek için istenilen bir hedef olmuştur. Bu hedefe ulaşabilmek için pek çok çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan faydalanarak kablosuz sensör ağlarıyla sensör teknolojilerinin beraber kullanılması gerekliliği tespit edilmiştir. Bu tez ile su kalitesi takibinin anlık, uzaktan ve yerinde yapılmasını sağlayacak bir kablosuz sensör ağları platformu üretilmiştir. Bu platformda pH, nitrat, amonyum ve potasyum iyon seçici elektrotlar kullanılarak su kalitesi hakkında önemli düzeyde anlık bilgi sahibi olunması sağlanmıştır. Tez kapsamında üretilen sistem kolay kullanım ve kurulum, hızlı genişletilebilme, zaman ve mekan olarak ölçeklenebilme özelliklerine sahiptir. Ancak bu sayede geniş coğrafi alanlarda ve farklı zamanlarda su kalitesi takibinin uzaktan yapılabileceği önerilmiştir.

2 GENEL BİLGİLER

2.1 Su Kalitesi

Su kalitesi, çevresel su sağlığı veya suyun içinde bulunduğu durum şeklinde tanımlanabilen, bir su kaynağının yada örnek bir su kütlesinin nitel ve nicel şartlarını ifade eden bir tabirdir . Temiz Su Sözleşmesi'yle (ABD), standart su saflığı; balıkların ve diğer su canlılarının sağlıklı yaşaması ve ayrıca günlük kullanım için gereken düzeylerde sağlıklı olan su olarak ifade edilmiştir [15]. Türkiye Cumhuriyeti Sağlık Bakanlığı'nın yayınladığı Su Kalitesi kitapçığına göre su kalitesi kavramının ortaya çıkış amacı suyun halk sağlığına zarar vermeyecek hale getirecek temel prensiplerin belirlenmesidir. Buna göre eğer su içerisinde sağlığa olumsuz etkileri olacak maddeler mevcut ise halk sağlığını riske atmamak için bu maddelerin temizlenmesi gerekmektedir [16]. Bu noktalardan yola çıkılarak belirlenen temel hedeflenen birincisi suyun kirliliğinin engellenmesidir. Çünkü su ne kadar da temizlenirse temizlensin kolaylıkla yeniden kirliletebilir bir maddedir. Bu nedenle temiz tutulması çok önemlidir. Olası kirliliğin önüne önceden geçebilmek için gereken izleme ve değerlendirme araçlarının üretilmesi gerekliliği vurgulanmıştır [16].

Su kalitesi tabiri suyun çeşitli amaçlar için kullanımının uygun olması durumunu belirtmektedir. Bu tanım çeşitli ihtiyaçlar için özelleştirmek mümkündür, örneğin içme suyu kalitesi, tarım suyu kalitesi vb. gibi. Dolayısıyla su kalitesi, belirli bir amaç için suyun kullanımını engelleyen tüm değişkenler için yeniden tanımlanabilmektedir. Yeraltı ve yüzey sularının bileşimi coğrafi, topografik, hidrolojik, biyolojik ve meteorolojik pek çok doğal faktöre bağlıdır. Tek bir küçük su kaynağında bile (örneğin çay) bu değişkenlere bağlı olarak su kalitesi değişimlerini gözlemlemek mümkündür. Ayrıca insan faktörünün de su kalitesi üzerinde çok büyük etkisi vardır; insan eliyle yapılan müdahaleler doğrudan veya dolaylı olarak su kalitesi üzerinde büyük etkiler yapmaktadır. Şehirleşme süreçlerinde yapılan binalar, barajlar ve ortaya çıkan sulak alanlar önemli hidrolojik değişikliklere sebep olmaktadır. Bunlardan daha belirgin olarak insan kaynaklı belediye, sanayi ve evsel kaynaklı gibi diğer atıklar su havzalarına kazara veya bilerek karıştırılmakta ve böylece büyük miktarlarda

kimyasal kirlilik meydana gelmektedir. Su kaynaklarının kalitesi hem bu insani hem de doğal hareketlilikler sebebiyle sürekli değişebilmektedir. Özellikle ulaşılabilir tatlı su kaynaklarının limitli olduğu bölgelerde bu değişim çok büyük olmaktadır. Doğal ekosistem de su kalitesi sürekli değişse bile geniş zamanlı ve mekanda düşünüldüğünde bir uyum veya dengede söz edilirken işin içine insan faktörü girdiğinde çevre ekosistemi için felakete yol açabilecek su kalitesi değişimlerinden söz edilmektedir [17].

2.2 Su Kalitesi Takibi

Su kalitesi tayini yerinde (*in-situ*) olarak yapıldığı gibi ayrıntılı kalite incelemesi, on site (su kaynağı yakınında) ya da uzakta olan bir laboratuvarda örnek taşıma işlemiyle yapılmaktadır. Su kalitesi takibinin genel anlamda temel ögeleri; on site ölçümler, su örneklerinin analizi ve sonuçların hesaplanması ve son olarak bulguların raporlanmasıdır. Bu noktada sonuçların sadece belirli bir bölge için ve belirli bir zaman çerçevesinde geçerli olduğu unutulmamalıdır. Su kalitesinin sürekli takip edilmesinin bir hedefi de düzenli aralıklarla su kalitesinde meydana gelen geniş ölçekli veya kalıcı değişimleri gözlemlemektir [17].

Anlık su kalitesi görüntüleme sistemleri hızlı cevap verebilmeleri yönünden öne çıkmaktadır. Bu amaçlarla geliştirilen su kalitesi takip sistemleri multidisipliner altyapıya sahip olmak zorundadır çünkü su kalitesinin uzaktan takibi için pek çok farklı disiplinden faydalanmak gerekmektedir. Anlık takip sistemleri temel olarak kablosuz haberleşme ve sensör teknolojileri üzerine kuruludur. Kablosuz sensör ağlarının çevresel veri toplama uygulamalarında kullanımı oldukça yaygındır [13], [18].

Su kalitesinin sürekli görüntülenip arşivlenmesi üzerinde çalışmalar yarım asrı aşkın devam etmektedir. Temel mantık olarak su kalitesi görüntülenmesinin amacı suyun gelecekte de kullanıma uygun bir kalitede tutulabilmesidir. Bu nedenle suyun her zaman için her kullanım alanına uygun bir şekilde kalitesinin takibini yapacak bir sistem hem biyolojik hem de kimyasal açıdan karışık analizleri yapabilen kompleks bir sistem olmalıdır. Böylece su kalitesindeki kirlilik vb. kaynaklı ani değişimleri hızlıca anlayıp kullanıcıları uyarmak ve önlem almak mümkün olmaktadır.

2.2.1 Hedef Parametreler

Amonyum kirliliği çeşitli şekillerde gerçekleşmektedir. Amonyum (NH_4^+), su havzasındaki canlıların ürettiği azotlu bir atıktır ve protein metabolizmasının ilk yan ürünüdür. Örneğin amonyum, balıklar tarafından doğrudan yüzgeçlerden suya bırakılır. Genel olarak sudaki amonyum miktarının çok olması doğrudan proteinli

besinlerin kullanımının fazla olduğuna işaret etmektedir. Fakat amonyum, su havzasında yaşayan canlılar için toksik etki göstermektedir ve bu etki havzanın pH'ına göre değişmektedir. Amonyak azotu $\text{NH}_3\text{-N}$, yüksek pH değerinde daha toksik özellik gösteren iyonize olmayan NH_3 formunda iken, düşük pH değerinde daha az toksik etki gösteren iyonize amonyum NH_4^+ formundadır. Ayrıca amonyumun toksitesi, sıcaklık arttıkça artmaktadır. Amonyum sularda az da olsa doğal olarak bulunmaktadır ve düzeyi mikrobiyolojik azotlu bileşenleri indirgeyen reaksiyonlara bağlıdır. Derişimi 0.1 mg/L'yi geçerse kirlilik riski var denilmektedir. Amonyum ölçümü klasik olarak kolorimetrik yöntemle yapılmaktadır [19]. Yer altı suları için genelde litre başına 0.2 mg altı derişimde amonyum gözlenmektedir. Yüzeysel sularda 12 mg/L kadar yüksek derişimlerde görülmektedir. Amonyum fazlalığı foseptik atıklara işaret etmektedir [20].

Potasyum, insan hayatı için elzem olan bir elementtir. Tüm doğal sularda bulunmaktadır. İçme sularında potasyum permanganatın oksidant olarak kullanımı nedeniyle özellikle bulunmaktadır. Potasyum-sodyumun dengeli bir beslenmeyle alınması çok önemlidir. Aşırı sodyum tüketimi potasyum alımında düşmeye neden olmaktadır. Ayrıca magnezyum eksikliğinde potasyum tutumunda yetersiz kalınmakta ve aşırı potasyum tüketimi magnezyum alımını engellemektedir. Doğal suların çoğunda potasyum derişiminin 20 mg/L ve altı olduğu belirtilmiştir [16] [21].

Nitrat, NO_3^- tarımda en çok kullanılan gübredir (amonyum nitrat kullanımı yaygındır, NH_4NO_3). Yağmurlar vasıtasıyla tarım arazilerinden civardaki su kaynaklarına nitrat taşınması gerçekleşmektedir [22]. Sularda nitrat seviyesinin yükselmesi su bitkileri ve planktonların büyümesini uyarmaktadır. Kısa vadede bu sayede balık nüfusu artar ancak alglerin aşırı çoğalmasından dolayı suların oksijen seviyesi düşmektedir. Bu da sudaki canlıların ölmesine neden olmaktadır. Nitrat bakımından yüksek suların tüketilmesi alyuvarların oksijen taşıma kabiliyetini olumsuz etkilemektedir. Vücut yeterince oksijen alamadığından bu durumda nefes yetmezliği ortaya çıkmaktadır.

Suyun pH değeri; fosfor, azot ve karbon gibi besinlerin ve kurşun, bakır, kadmium vb. gibi ağır metallerin, su içerisinde çözülebilecek miktarlarını ve biyolojik kullanılabilirliklerini belirlemektedir. Örnek olarak fosfat miktarı ne kadar olursa olsun su içerisinde kullanılabilirliği pH değerine bağlıdır. Ağır metallerde ise toksite değerleri pH seviyesine göre değişmektedir. Düşük pH değerlerinde metaller daha çözünebilir olduklarından dolayı daha toksik özellik göstermektedirler [23].

Geleneksel olarak uygulanan su kalitesi analiz yöntemleri, su kaynağından alınan örneklerin, gelişmiş laboratuvarlara taşınması işlemine dayanmaktadır. Tezimizde hedeflediğimiz amonyum, nitrat, potasyum iyon derişimleri ve pH parametrelerinin

ölçümü (pH ölçümü cam elektrotla ve su kaynağının yanında yapılabilir olsa da), geleneksel metotlarla laboratuvara taşınarak yapılmaktadır. Geleneksel yani sürekli olmayan yöntemlerde ölçümler için UV spektroskopisi, iyon kromatografisi, kolorimetremetri ve turbiditemetri gibi karışık laboratuvar protokolleri gerekmektedir [24]. Bu süreçler ise ek maliyet, teknik personel ve nakliye gibi ihtiyaçları beraberinde getirdiği için sürekli takip gereken yerlerde yetersiz kalmaktadır. Fakat tezimizde geliştirdiğimiz iyon seçici elektrotlar ile yerinde ölçüm yapabilen sistemle su kalitesinin potasyum, nitrat, amonyum ve pH değerlerinin anlık olarak uzaktan bir merkezden veya internet bağlantısı olan her yerden görüntülenmesi mümkündür.

2.3 İyon Seçici Elektrotlar

İyon seçici elektrot tanımı, birbirinden farklı türde iyonların var olduğu bir ortamda istenilen iyon veya iyonlara özel seçici cevap veren membran içeren elektrot ailesi için yapılmıştır. Bahsi geçen membran kelimesi ise temel olarak birbiriyle potansiyel fark oluşturan iki çözeltiyi birbirinden ayıran elektriksel iletken bir yapıyı ifade etmektedir. Membranın seçiciliği iç yapısıyla alakalı olabileceği gibi kimyasal kompozisyonuyla da doğrudan ilgili olabilmektedir [25].

İyon seçici elektrotlar pasif membranlarla yapılmaktadır. Membranın iki yüzü arasında hem nötral türler hem de yüklü kompleks iyonların yanı sıra basit iyonlar veya elektronlar taşınabilmektedir. Elektroanalitik kimyada membran taşıma mekanizmalarının kullanışlı olmasının nedeni, membranla düzenlenmiş taşımaların, membranın diğer yüzüne karşılık elektrostatik potansiyel farkı oluşturarak cevap vermesidir. Bu cevaba membran potansiyeli denmektedir. Bunun bir sebebi de membranın dış yüzeyinin bulunduğu ortamdaki iyonik aktivitelerdir. Membran potansiyeli iyonik aktiviteyle ifade edilebildiği takdirde, membranın temas halinde olduğu çözeltinin bir defa veya sürekli bir şekilde iyonik aktivitesinin takip edilebildiği bir analitik ölçüm tekniğinden bahsedilebilmektedir [26].

İyon seçici elektrotlar elektrokimyasal sensörler sınıfında önemli bir yere sahiptir. Bu sensörlerin cevabı potansiyel değişimiyle ifade edildiğinden elde edilen sinyale potansiyometrik sinyal denmektedir [27]. Potansiyometrik ölçümler Nernst eşitliğine dayanmaktadır. Nernst eşitliği termodinamik ilişkilere bağlıdır ve ancak termodinamik denge varlığında geçerlidir. Nernst eşitliği özet olarak, elektroaktif türlerin derişimleriyle ölçülen potansiyel değişimi ilişkisini açıklayan bir modeldir. Potansiyometri çift elektrotlu bir sistemdir. Her bir elektrodun reaksiyonları tam bir şekilde yazılmalıdır. Yarı hücre reaksiyonları indirgenme formunda gösterildiği için, okside olan tür "O", indirgenen tür "R" ve verilen elektron sayısı "n" kadar ise şöyle bir

denklem ortaya çıkmaktadır:



Böyle bir yarı reaksiyonun serbest hücre enerjisi bu şekilde ifade edilmektedir:

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln \frac{a_R}{a_o} \quad (2.2)$$

Başka bir deyişle:

$$-\Delta G = -\Delta G^0 + RT \ln \frac{a_o}{a_R} \quad (2.3)$$

Eşitlik 2.3'de $-\Delta G$, reaksiyonun sağ tarafa gitme eğilimini ifade etmektedir. R gaz sabitidir ($8.317 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), T kelvin cinsinden sıcaklıktır, ΔG^0 değeri ise reaktan ve ürünlerin aktivitelerinin eşit olduğu andaki serbest enerjidir ve yazılan reaksiyonun standart yarı hücre potansiyeline bağlıdır. Elektromotor kuvveti olarak bilinen ve burada bu yarı reaksiyonunun serbest enerjisi olarak ifade edilen EMF, elektrot potansiyeli olan E'ye bağlıdır aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$-\Delta G^0 = nFE^0 \quad (2.4)$$

Okside olan ve indirgenen türlerin aktiviteleri birbirine eşit ve termodinamik denge durumu olduğunda aşağıdaki eşitlik elde edilmektedir:

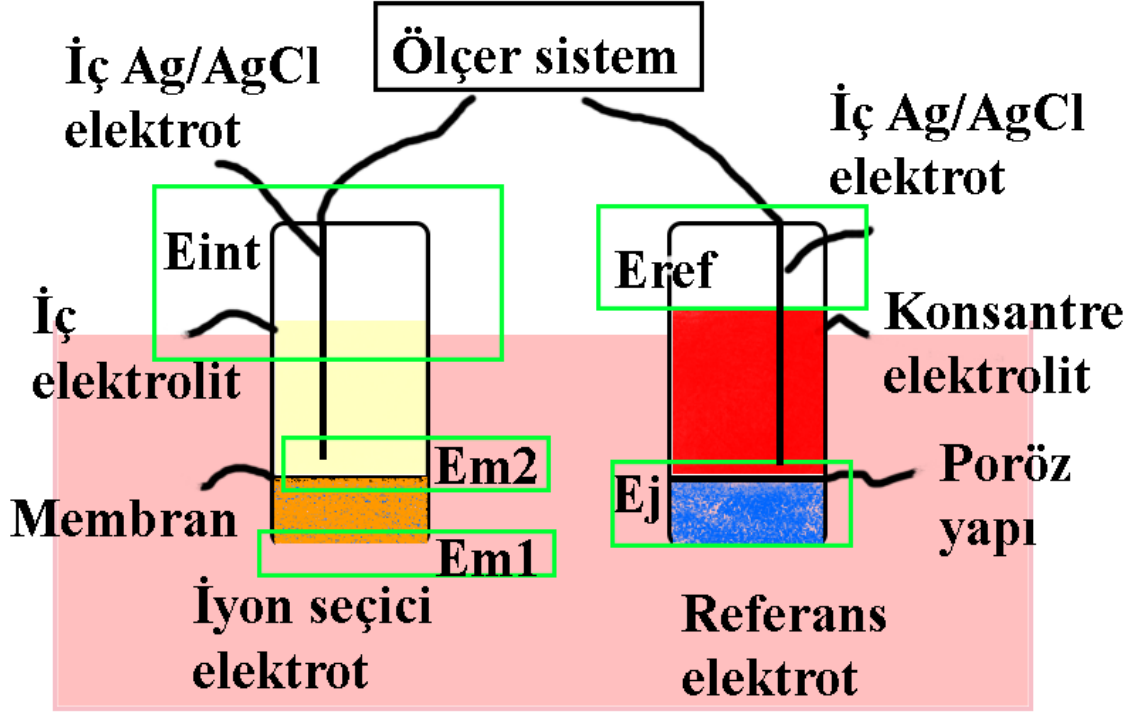
$$-\Delta G^0 = RT \ln K \quad (2.5)$$

Eşitlik 2.2 ve 2.4 birleştirildiğinde, bir redoks çifti tarafından oluşturulan potansiyeli modelize eden Nernst eşitliği ortaya çıkmaktadır [28], [29]:

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_R}{a_o} = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_o}{a_R} \quad (2.6)$$

İyon seçici elektrotlarla ölçüm yapmak için iki elektrot gereklidir. Bunlardan birisi ISE'dir. ISE iç elektrolit ortamına daldırılmış bir iç elektrot (Ag/AgCl veya bakır gibi) ve bunları dış analit içeren çözelti ortamından ayıran membrandan oluşmaktadır. İç elektrolit, kullanılan iç referans elektrotun cevap verdiği iyonları taşımaktadır. Sistemin ikinci elektrodu ise dış referans elektrottur. Dış referans elektrot da tıpkı ISE gibi iç referans elektrot ve iç elektrolit içermektedir. Fakat bunları kaplayan

bir tuz köprüsü içermektedir. Referans elektrot için kullanılan membranlar cam, kristaller veya poröz yapılar olabilir [30]. Potansiyometrik ölçümlerde yaygın olarak kullanılan referans elektrotlar doyurulmuş kalomel veya gümüş/gümüş klorür referans elektrotlardır. Bu türlerin kompakt yapıda ve kolay üretilebilme avantajının yanı sıra hata payları da bir kaç milivolt kadardır. Gümüş/gümüş klorür elektrotlar ayrıca sulu olmayan çözeltilerde de çalışabilmektedir [28].



Şekil 2.1 Potansiyometrik hücre

Şekil 2.1’de gösterilen E_{ref} , referans elektrotta, iç elektrotun sahip olduğu potansiyeldir. E_j ise konsantre iç elektrolitle ölçüm yapılan çözelti arasında oluşan sıvı bağlantı potansiyelidir. E_{int} ise ISE’nin iç elektrotunun potansiyelidir. Teorik olarak E_{ref} , E_j ve E_{int} ’in sabit tutulup sadece iyon seçici elektrot membranı potansiyelinin örnek içerisindeki seçici olduğu analit derişiminin bir fonksiyonu olarak değişmesi mümkündür. ISE membranının her iki tarafı arasındaki potansiyel fark, iki bileşenden oluşmaktadır. E_{m1} dış yüzeyi ifade ederken, E_{m2} iç tarafı göstermektedir. Membranın toplam potansiyeli ve bu iki bileşen arasında şu bağıntı vardır:

$$E_{mem} = E_{m1} - E_{m2} \quad (2.7)$$

Her iki yüzey potansiyelleri de iyon aktivite değerlerine Nernst benzeri bir ilişkiyle

bağıdır:

$$E_{m1} = j_1 - (0.0592/n) \times \log(a'_1/a_1) \quad (2.8)$$

$$E_{m2} = j_2 - (0.0592/n) \times \log(a'_2/a_2) \quad (2.9)$$

Burada j_1 ve j_2 değerleri sabit, a_1 ve a_2 iç ve dış çözeltilerde ilgili iyonlarının aktivitesi, n ise iyonların yük değeridir. a'_1 v a'_2 ise sırasıyla membran dış ve iç yüzeyleri içindeki iyon aktiviteleridir. Eğer membranın her iki yüzeyi de eş sayıda iyon bağlama bölgelerine sahipse, j_1 ve j_2 'nin ve a'_1 ile a'_2 'nin aynı olduğundan bahsedilebilir. Buradan yola çıkılarak şu eşitlik elde edilmektedir:

$$E_{mem} = E_{m1} - E_{m2} = \left(\frac{0.0592}{n} \right) \times \log \left(\frac{a_1}{a_2} \right) \quad (2.10)$$

İç çözeltinin iyon aktivite değerinin sabit olduğunu düşünürsek eşitlik bu şekilde sadeleşmektedir:

$$E_{mem} = E^\circ + \left(\frac{0.0592}{n} \right) \times \log a_1 \quad (2.11)$$

E° 'ı başa alarak yazarsak:

$$E^\circ = \left(\frac{-0.0592}{n} \right) \times \log a_2 + E_{ref} + E_j + E_{int} \quad (2.12)$$

Sonuç olarak bu redoks hücresi içerisindeki tüm diğer potansiyeller sabitken, membran potansiyeli sadece örnek çözelti içerisindeki hedef analit miktarına bağlı olarak değişecektir. Burada dikkat edilmesi gereken önemli nokta ise bu potansiyelin redoks reaksiyonları nedeniyle değil de, denge halinde gerçekleşen faz sınır potansiyeli olduğu, yani membran üzerindeki kendisine seçici kılınan iyonun aktarım derişim gradyentine bağlı olup, redoks tepkimelerinin gerçekleşmediğidir. Membranın seçicilikteki başarısı logaritmik olarak aktivite değişimine bağlıdır ($\Delta E \propto \log(a)$). Bu da matematiksel olarak Nernst eğrisiyle gerçekleşmektedir (RT/nF). Nernst eğrisinin eğim değeri teorik olarak monovalent iyonlar için 25°C'de 0.0592 V/derişim iken diavalent iyonlar için 0.0296'dır [29].

2.3.1 Türleri

İyon seçici elektrotların seçiciliği membrandan kaynaklanmaktadır. Genel olarak membranın düşük elektronik iletkenliğe ve analiti içeren çözeltide çözünmeyecek yapıda olması gereklidir. İyon seçici elektrotlar membrana veya elektrot

gövde düzenlemesine göre sınıflandırılmaktadır. Membran malzemesine göre sınıflandırıldığında katı, sıvı ve özel olmak üzere üç sınıf membran tipine ayrılabilir [31], [32] .

Katı membranlar, homojen ve heterojen olarak ikiye ayrılmaktadır. Cam ve kristal membranlar homojendir. En yaygın cam elektrot H^+ iyon aktivite tayininde kullanılan pH elektrotudur. Membran silikat camdan oluşmaktadır. Cam elektrotlar H^+ 'dan başka sodyum gibi diğer katyonlar için de geliştirilebilir. Kristal membranlarda ise membran, çözünmeyen bir inorganik tuzdan yapılmıştır. Membran potansiyelini iyon değişim prosesi sağlamaktadır. Örnek olarak polikristal $AgCl/Ag_2S$, Cl^- tayininde kullanılmaktadır.

Sıvı membranlarda, bir iyon değiştirici veya iyonofor (nötral iyon taşıyıcı) viskoz bir organik sıvı içerisinde çözünmektedir. Bu sıvı yapı, membranı oluşturmaktadır. Yapı içerisinde iyonofor olmadan membran seçici olarak iyonlara cevap veremez. İyon değişim bölgesi, yüklü nötral veya klasik tipte olabilir. Sıvı membran elektrotlara bir alternatif de polimerik membran kullanmaktır. Örnek olarak polivinilklorür PVC, bir plastikleştirici ve iyon taşıyıcı (veya değiştirici) ile beraber membran yapımında kullanılır. Bu tip membranlar oldukça seçicidir ve pek çok sıvı membran elektrotun yerini almıştır.

Diğer özel membranlar bir örnek ise biyosensör yapımında kullanılan enzim elektrodu, doku elektrotları ve mikrobiyal elektrotlardaki biyolojik reseptörlerdir. Bu reseptörler sayesinde biyolojik olarak duyarlı sensörler yapmak mümkündür [31], [32] .

2.3.2 Uygulama Alanları

İyon seçici elektrotlar ilk çıktığı günden bu yana çok geniş bir alanda kullanılmaya ve üretilmeye devam etmektedir. Biyomedikal ve tıp alanında; kan serumundan ve tükürükten çeşitli iyon değerlerinin ölçülmesi (sodyum, potasyum, lityum, klorür, magnezyum gibi) yaygındır. Geliştirilen teknolojilerle *in-vitro* haricinde, iyon seçici elektrotlar ile beyin, böbrek gibi organlarda ve ayrıca deri altından doğrudan (*in-vivo*) ölçüm yapılmaktadır [33]. Bunun yanında vücutla temas eden diş macunu, şampuan gibi kozmetik ürünlerin içerisindeki ağır metal, halojenler gibi önemli ajanların ölçülmesinde de kullanılmaktadırlar [34], [35].

Tarım alanında toprak örneklerinden kalsiyum, potasyum, nitrat, amonyum, boron gibi iyonların ölçümünde yaygın olarak ISE'ler kullanılmaktadır [36]. Tarımda kullanımlarının en çok önem kazandığı nokta elementlerin analiziyle toprağın gübrelenmesinin kontrolüdür. Ayrıca tarımsal ürünlerin kalitelerini veya tazelik

durumlarını ölçmede de kullanılmaktadır [37].

Gıda endüstrisinde balık ve etlerde nitrat ve nitrit ölçümleri yapılmaktadır. Balıklarda toksik özellik gösteren florür ölçümü önemlidir. Meyve suları, süt gibi gıdalarda pH ölçümü, klorür ve karbonatların belirlenmesi yaygındır [38]. Endüstriyel prosesler sırasında çeşitli iyon aktivite seviyelerinin ayarlanması için yine İSE'ler kullanılmaktadır [39].

İyon seçici elektrotların endüstriyel kullanımları da çok yaygın ve çeşitlidir. Madencilikte florür, klorür, kalsiyum ve ağır metallerin ölçümünde, metalurjik proseslerde bakır, kadmiyum, nitrat gibi iyonların ölçümünde, petrol rafinerisi ve gaz üretim proseslerinde amonyak, hidrojen klorür gibi gazların ölçülmesinde kullanılmaktadırlar [40], [41].

Çevre çalışmalarında iyon seçici elektrotlar ile içme suları, toprak ve havadan çeşitli iyonların ve toksik maddelerin tespit çalışmaları yaygındır [42]. Bunların yanında uygulama sahası haricinde sayılan alanların araştırma sahalarında da, bilimsel çalışmalar ve eğitimde iyon seçici elektrotlar sürekli kullanılmaktadırlar [43].

2.4 Kablosuz Sensör Ağları

Kablosuz sensör ağları (KSA), sensörler ve sensörlerin hedefinde olan ölçülecek şeylerin sürekli bir etkileşim içinde olduğu bilgi ağlarıdır. Kablosuz sensör ağları ile gerçek dünyada devam eden olaylar bilgiye dönüştürülerek farklı amaçlar için daha sonra işlenebilecek halde tutulmaktadır [44].

Mikro elektro mekanik sistemler, dijital elektronik, kablosuz haberleşme alanlarındaki son gelişmeler ile çok fonksiyonlu, düşük güç tüketen, düşük masraflı, küçük boyutlara sahip (minyatürize) sensör birimlerinin kendi aralarında kısa ve uzun mesafeli haberleşmesi mümkün olmuştur. Bu küçük sensör birimlerinin (sensör düğümü adıyla adlandırılmaktadır) her birisinin ölçme, veri toplama, haberleşme, haberleşme ağına uyum sağlayabilme özelliklerini karşılaması gerekmektedir. Bu özellikleri karşılama yeteneği yükseldikçe, büyük sayılardaki sensör düğümlerinin iş birliği içerisinde çalışıp büyük bir kablosuz sensör ağı oluşturmaları kolaylaşmaktadır [45].

KSA'ların mevcut ve potansiyel kullanım alanlarını tamamıyla değerlendirebilmek için ekstrem derecede verimli ve gelişmiş haberleşme protokollerine ihtiyaç vardır. KSA'ların yüksek sayıda sensör düğümleri içermesinin yanında, her bir sensör düğümünün ilgili fiziksel fenomene konum olarak yakın olması da gerekmektedir. Bunun yanında sensör düğümlerinin sadece ölçüm yapıp topladıkları saf veriyi

göndermeleri yeterli olmayabilir. Çünkü bazı durumlarda etkili ve güvenilir bir ölçüm için fenomenlerden toplanan saf verilerin işlenmesi gerekli olmaktadır.

Bir KSA uygulamasında her bir sensör düğümü yerleştirileceği ortama göre ayrıca mekanik tasarımsal olarak yüksek derecede farklılaştırılabilir. Bu nedenle bir KSA içerisindeki tüm sensör düğümlerinin yapısal olarak özdeş olması gerekmemektedir. Örnek olarak yer seviyesi altına yerleştirilen sensör düğümü gürültülü kanal girişimlerini engellenmesi amacıyla yüksek veri gönderim gücüne sahip olmalıdır [46]. Başka bir örnek olarak deniz suyu içerisinde yüzecek olan bir sensör düğümünün dış kap ve şeklinin yüzmeye uygun olması, su geçirmez olması, kimyasal aşınmaya karşı tuza dayanıklı olması gerekmektedir [47]. İleriye yönelik verim ve güvenilir ölçüm performansını devam ettirebilmek için KSA tasarımında bunların da dikkate alınması gerekmektedir. Kablosuz sensör ağlarının çeşitli parametrelere göre sınıflandırılması Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1 KSA sınıflandırması

KONU	SINIF 1	SINIF 2	SINIF 3
Fiziksel Mekan	İç	Dış	Hem iç hem dış
Mesafe	Kısa <50 m	Orta <1 km	Uzun >1 km
Güç	Ultra düşük <1 uA	Düşük <10 mA	Normal <300 mA
Ağ Topolojisi	Merkezi	Merkezsiz	Hibrit
Veri Tipi	Homojen	Heterojen	

2.4.1 Mevcut KSA Uygulama Örnekleri

Bir kablosuz sensör ağı uygulamasında sismik, manyetik, ısı, görsel, kızıl ötesi, akustik, radar gibi pek çok sensör kullanılarak; sıcaklık, nem, basınç, hız, yön, ivme, ışık, kimyasal faktörler, ses şiddeti gibi pek çok farklı koşulların ölçümü ve takibi sağlanabilmektedir. Bu nedenle çok çeşitli alanlarda KSA uygulanması mümkündür. İlerleyen bilgisayar teknolojisiyle beraber KSA altyapısını oluşturan donanımların taşınabilirliğinin artması ve boyutlarının küçülmesi sayesinde, ölçüm ve kontrol amaçlı olarak kablosuz sensör ağlarından ihtiyaç olan her yerde faydalanılması mümkün hale gelmektedir.

Kablosuz sensör ağlarının yaygın bir şekilde kullanıldığı alanlara ve amaçlara örnek olarak: akıllı şehir uygulamaları, güvenlik, su ve toprak uygulamaları, çevresel güvenlik uygulamaları, askeri uygulamalar, iklim ve mevsim tahminleri, endüstriyel fabrika veya tesis içi proses takibi ve kontrolü, coğrafi uygulamalar, deprem hareketleri takibi ve araç ve yaya takip sistemleri verilebilir.

Askeri uygulamalar

Kablosuz sensör ağları askeri kumanda, kontrol, haberleşme, bilişim, istihbarat, gözetleme, güvenlik, hedefleme, keşif amaçlarıyla kullanılmaktadır. KSA sistemlerinin hızlı kurulabilmesi ve kendi kendini düzenleyebilmesi askeri alanlarda ümit vadeden bir ölçüm yöntemi olmasını sağlamıştır [48–50].

Çevresel uygulamalar

Kablosuz sensör ağlarının otomatik koordinasyon kabiliyetleri sayesinde çevresel uygulamalarda geniş bir ölçekte kullanımını sağlamıştır. Bazı çevresel uygulama örnekleri kuşların, kemirgenler gibi küçük hayvanların ve böceklerin hareketliliğinin takibi, ekin tarlalarını ve hasat depolarını etkileyebilecek çevresel şartların takibi, uzaydan ve yüzeyden yapılan keşiflerle kimyasal, biyolojik tespitlerin yapılması, yüksek hassaslıkta tarım uygulamaları, deniz kenarlarında, toprakta ve atmosferde biyolojik, coğrafi ve çevresel takip uygulamaları, orman yangınlarının hızlı tespit edilmesi, meteorolojik ve jeofiziksel araştırmalar, selin önceden tespiti, çevrenin biyokompleks olarak haritalanması ve kirlilik çalışmalarıdır [51–55].

Sağlık uygulamaları

İmplant biyomedikal cihaz teknolojisi ve akıllı entegre sensör teknolojilerindeki gelişmeler kablosuz sensör ağlarının biyomedikal uygulamalarda kullanılabilirliğini arttırmıştır. Biyomedikal uygulamalarda kablosuz sensör ağlarının gelişmiş örneklerini görmek mümkündür. KSA kullanımı sayesinde biyomedikal alanında kritik önem taşıyan zaman, dökümantasyon ve yeterli fiziksel alan konularında verim artışı sağlanmıştır [56], [57] .

Kullanılmakta olan kablosuz sensör ağları sağlık uygulamalarına örnek olarak engelliler için yardımcı cihazlar geliştirme (yapay organlar), entegre hasta takibi uygulamalar, tanıma, hastanelerde ilaç yönetimi, böcek ve diğer hayvanların hareketlerini ve iç proseslerini görüntüleme, insanın fizyolojik verilerinin uzaktan takibi ve ayrıca hastane yönetimi için, tesis içerisinde doktor ve hastaların görüntülenmesi ve takibi uygulamalarıdır [58], [59] .

Akıllı konut uygulamaları

KSA'nın yaygın olarak kullanıldığı bir diğer alan da akıllı bina ve ev uygulamalarıdır. Binaların çevresi, merdiven, asansör, havalandırma gibi iç mekanları, su depolama dağıtım sistemleri, giriş çıkış gibi güvenlik noktaları kablosuz sensör ağları teknolojisinin uygulandığı yerlerdir.

KSA'ların günlük hayata girmesiyle kendine en çok yer bulduğu alanlardan birisi de akıllı evlerdir. Evlerin içerisinde bulunan havalandırma, su, gaz ve elektrik tüketiminin

yönetimi, beyaz eşyaların otomasyonu, güvenlik, yüz-kimlik tanıma, sıcaklık ve nem ayarı gibi ihtiyaçların giderilmesinde kablosuz sensör ağları teknolojisi etkin olarak kullanılmaktadır [60–62].

Endüstriyel uygulamalar

Kablolu sensörler ile kurulan ağlar uzun zamanlardan beri inşaat otomasyonu, endüstriyel ölçme ve kontrol uygulamaları, personel erişim, giriş, çıkış takibi gibi endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır. Ancak sensörlerin kablolu olmasından dolayı bu sistemlerin kullanımı sınırlanmaktadır. Hatta bir endüstriyel işletme içerisinde bu kablolu sensör ağının ufak bir parçasının tamiri gerektiğinde ortaya çıkacak masrafla sistemi yeniden kurmanın masrafı aynı tutmaktadır. Bu nedenle kablolu sistemlerde bir yandan da elle kontrol hiç elden bırakılmamaktadır. Tam bu noktada kablosuz sensör ağları kolay kurulumu, modüler olması ve yüksek hassaslıktaki pil destekli kablosuz haberleşme birimleri sayesinde iyi bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır [63–66].

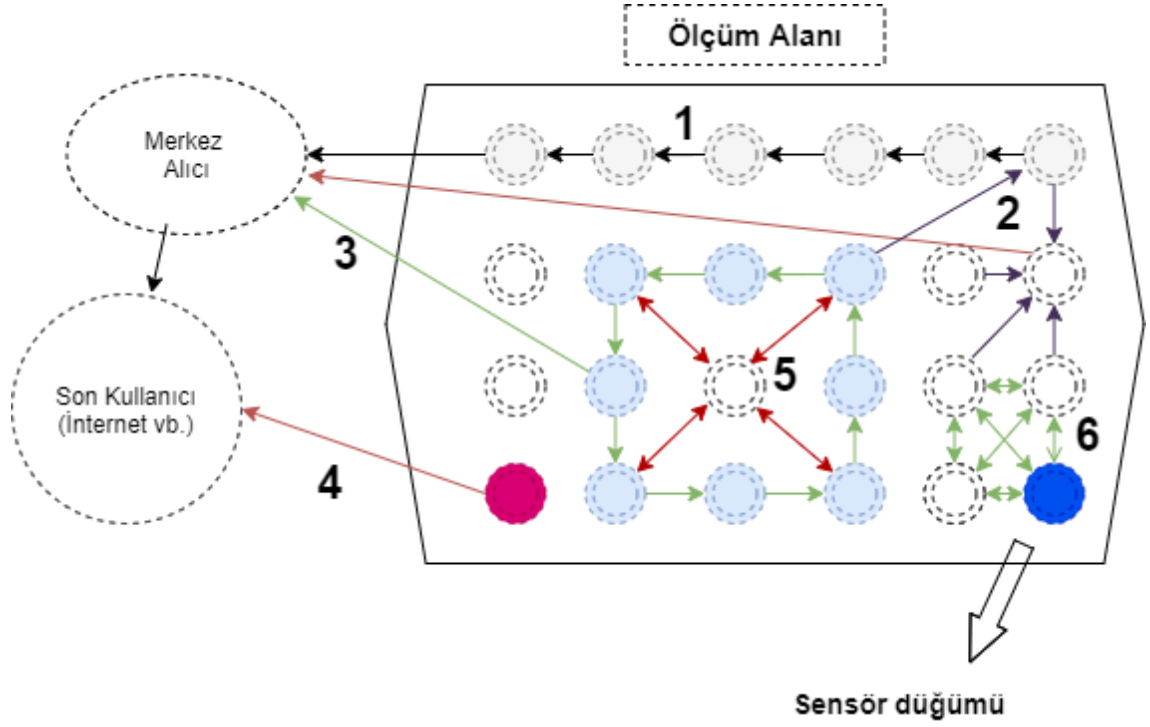
KSA'ların endüstriyel uygulamalarına örnek olarak, malzeme yorgunluğu ölçümü, stok yönetimi, ürün kalitesi takibi, ofis yapılarının çevresel kontrolü, otomatik üretim robot kontrolü ve hedeflenmesi, interaktif müzeler, fabrika proses kontrolü ve otomasyonu, felaket bölgelerinin izlenmesi, gömülü sensör düğümleriyle akıllı yapılar, taşıma, makine tanıma, araba hırsızlığının tespiti ve izlenmesi, araba takibi ve tespiti verilebilir [67–72].

2.5 KSA Altyapı ve Prokol Yapıları

Bir sensör ağında ölçüm alanında bulunan her bir sensör düğümünün veriyi toplayıp bir yere aktarma ve dolayısıyla son kullanıcıya iletme özelliği vardır. Bir kablosuz sensör ağında bu veri bir merkez alıcıya gönderilebileceği gibi, diğer bir düğüme de aktarılabilir. Her bir sensör düğümü veriyi hem üretir hem de yönlendirebilir. Bir karmaşık KSA içerisinde birden çok sensör düğümü olduğu gibi birden fazla son kullanıcı ve merkez alıcı da bulunabilmektedir. Şekil 2.2'de kavramsal olarak tüm veri düğümü, KSA yapısı olasılıkları resmedilmiştir. Sensör düğümlerinin veriyi aktarırken çizdiği geometriye ağ topolojisi denilmektedir. Şekil 2.2'de, 1'den 6'ya kadar rakamlarla ifade edilerek en yaygın olan topolojiler gösterilmiştir [73], [74].

1. topoloji doğrusal şekildir. Veri bir sonraki noktaya zincirleme şekilde hareket edip niyahetinde merkez bir alıcıya gitmektedir.

2. topoloji ağaç yapısıdır. Ağaç dalları gibi bir geometri olan bu yapıda, düğümler



Şekil 2.2 KSA'daki ağ topolojileri

birbirlerine dal yapısıyla eklenip, kendisinden bir kalın olan gövdeye bağlanmaktadır.

3. topoloji, yeşil oklarla gösterildiği şekilde halka topolojisidir. Burada sensör düğümleri geometrik olarak bir döngüyü tamamlayacak şekilde dizilmektedirler.

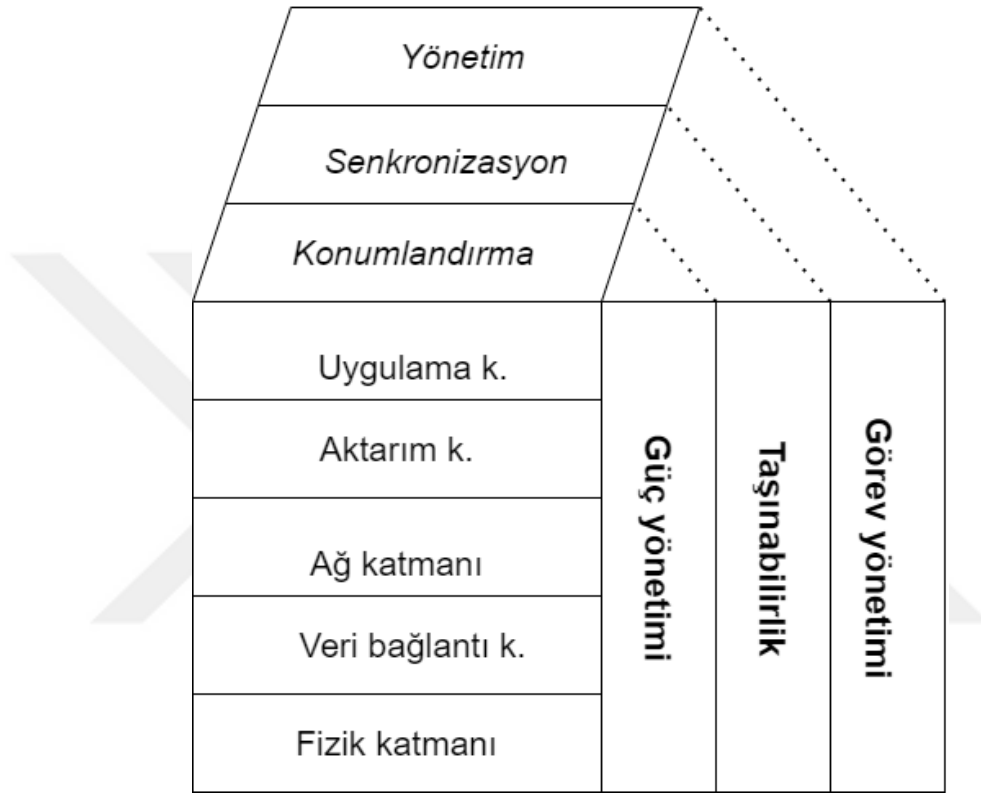
4. topoloji nesnelerin interneti (IoT) konseptinde olduğu gibi her bir düğümün doğrudan son dünya veya son kullanıcıya, mesela internete bağlanabildiği durumu ifade etmektedir.

5. topoloji, kırmızı renkle boyanan bağlantıların oluşturduğu yıldız şeklindedir. Bu şekilde tüm düğümler ortada bulunan düğüme veya ara bağlantı noktasına bağlıdır.

6. topoloji tüm düğümlerin aynı anda geri kalan tüm düğümlere doğrudan bağlantıya sahip olduğu tam bağlantılı örgü "mesh" şeklindedir. Örgü yapısı tam bağlantılı olabileceği gibi diğer topolojilerin örneğin iki farklı yıldız topolojili ağın bir birine bağlanmasıyla da yapılabilmektedir. Bu durumda ismi sadece örgü ağ olacaktır.

Sensör düğümlerinin ve ağın tüm işlevlerini gerçekleştirdiği dijital yapıya protokol yığını denmektedir. Uluslararası Standartlar Teşkilatı ISO'nun bilgi ağları için gerekli olan standartları belirleme amacıyla yaptığı çalışma sonucunda "Open Systems Interconnection" OSI modeli ortaya çıkmıştır. OSI modelinde merkez veri alıcı ve tüm sensör düğümlerinin kullandığı protokol yığını Şekil 2.3'te gösterilmiştir [74]. Bu protokol yığınının görevi; güç yönetimi ve dağılımı, verinin ağa dahil

edilmesi, kablosuz ortamda güç verimliliğinin sağlanması, sensör düğümleri arasında hatasız işbirlikçi çalışmanın gerçekleştirilmesidir. Protokol yığını; fiziksel katman (physical layer), veri bağlantı katmanı (data link layer), ağ katmanı (network layer), aktarım katmanı (transport layer) ve uygulama katmanı içerir (application layer). Bunun yanında senkronizasyon (synchronization), yerleştirme veya konumlandırma (localization), yönetim, güç (power) yöneticisi, hareketlilik (mobility) yöneticisi ve görev (task) yöneticisi düzlemlerini de içermektedir.



Şekil 2.3 KSA protokol yığını diyagramı ve teorik katmanları

Fiziksel katmanda fiziksel iletim ortamı üzerinden mekanik bağlantılar ile elementlerin birbirine bağlanması gerçekleşmektedir. Bunun için gereken hatasız modülasyon, iletim ve alma adreslemeleri burada yapılmaktadır. Fiziksel katman frekans seçimi, taşıyıcı frekans üretimi, sinyal tespiti, modülasyon ve şifrelemeden sorumludur. Frekans üretimi ve sinyal tespiti çok derin ve detaylı bir konu olup telsiz tasarımı ve altyapısal donanım tasarım alanına dahildir. KSA'lar için fiziksel katmanın güç verimliliği, sinyal yayma etkileri ve modülasyon şemaları önemlidir. Ağ parametreleri içerisinde yer alan voltaj, frekans, bant genişliği, veri aktarım hızı gibi parametreler fiziksel katmanda yer almaktadır [75], [76].

Veri bağlantı katmanı, fiziksel katmanı yönetmektedir. Bu katman noktadan noktaya veya bir noktadan çok noktaya yapılan bağlantıların güvenilir bir haberleşme ağı içerisinde gerçekleşmesini sağlar. Bu katmanda yer alan MAC protokolü, iki hedefe

ulaşılmasını sağlamaktadır. İlk hedef ağ altyapısının üretilmesidir. KSA içerisinde binlerce sensör düğümü olabileceğinden, MAC şeması ile veri transferi için adresleme yapılması şarttır. İkinci hedef ise sensör düğümleri arasında bağlantı kaynaklarını verimli bir şekilde paylaşacak olan altyapının kurulmasıdır. Bahsedilen bağlantı kaynakları zaman, enerji ve frekanstır. MAC adresleyici için en önemli özellik enerji verimliliğidir. MAC protokolü sensör düğümü için gerekli güç tasarruf modlarını desteklemelidir. Bunu gerçekleştirmenin en geçerli yolu gerekmediği zaman telsizin kapatılmasıdır. Bu kapatma işleminin düzgün yönetilememesi ise ağın doğru çalışmamasına ve veri kaybına neden olabilir. Bu nedenle zamanlama ayarının doğru yapılması gerekmektedir. Veri bağlantı katmanının diğer bir özelliği de aktarılan veride hata kontrolü yapmaktır. KSA'lar için en etkili hata kontrol yöntemi karışık olmayan kodlama ve kod çözme kontrol kodlarına sahip olmalıdır [75], [76].

Ağ katmanı

Sensör düğümleri veya ağa bağlanan her bir element arasında verimli bir çoklu yönlendirme protokolü olması gereklidir. Büyük sayıda sensör düğümü zamanlarda her bir düğüme bir kimlik numarası atamak veya bazen bunun yerine ayrımları yapmak için gelen verileri ya da konum bilgisini kullanabilmesi mümkündür. Ağ katmanı, farklı ağlar arasında yönlendirme ve anahtarlama yapmaktadır. Ağ katmanında yer alan cihazlar routerlar (yönlendirici) ve IP çeviricileridir. Bu katmanda erişilen yer yazılımsal bir adreste, örneğın IP adresinde tutulmaktadır. Ağ katmanı için bir diğer önemli fonksiyon da diğer ağlarla ortaklaşa çalışabilmesidir. Bu diğer ağlara kontrol komuta sistemleri veya internet olabilir [75], [76].

Aktarım katmanı

İletim veya aktarım katmanı, özellikle de KSA'nın internete veya diğer ağlara bağlanması planlandığı durumlarda gereklidir.İletim katmanı protokollerinin geliştirilmesinde sensör düğümlerinin kısıtlı imkanlara sahip olması (sınırlı güç ve hafıza) önemli bir yarıştırıcıdır. Bu katman kendinden önceki katmanların sorunsuz şekidle çalışarak güvenli bir veri aktarımının temin edilmesini sağlamaktadır. Katmanın bir görevi de, kendinden üst katmanların veri iletiminden emin olmasını sağlamasıdır. Bu sayede alt katmanlarda oluşacak bir sorunu üst katmana bu katman rapor etmektedir. Bu katmandan sonraki tüm katmanlarda aktarılan bilgi artık sadece veri veya mesaj adını almaktadır. TCP ve UDP protokolleri bu katmandadır [75], [76].

Uygulama katmanı

Uygulama katmanı, ana bir uygulamanın yanında çeşitli yönetim fonksiyonlarını da

içermektedir. Sorgu işleme ve ağ yönetim fonksiyonları da ayrıca bu katmanda gerçekleştirilmektedir. Uygulama katmanı, mail, dosya aktarımı, ağ yönetimi, HTTP, FTP gibi paket içeren uygulamaların olduğu yerdir [75], [76].

OSI'nin yanında TCP/IP isminde yaygın kullanılan bir model daha vardır. TCP/IP modeli sadece 4 katmandan oluşmaktadır. OSI modeli donanımların standartlaştırılmasında kullanılırken, TCP/IP farklı bilgisayarlar arasında bağlantı kurulmasını sağlamaktadır [77].

2.5.1 Yaygın Kablosuz Ağ Teknolojileri

Zigbee, düşük güç tüketen, orta menzilli ve nispeten düşük veri aktarım hızına sahip bir kablosuz ağ protokolüdür. Zigbee IEEE 802.15.4 standartları sınıfını ifade etmektedir. Genel olarak ev, bina, endüstriyel otomasyon, uzaktan erişim ve kontrol ve genel tüketim elektronik ürünlerde kullanılmaktadır. Zigbee'de genel olarak 868 MHz, 915 MHz ve 2.4 GHz frekansları kullanılmaktadır. Zigbee ağ topolojisi yıldız, ağaç ve örgü şeklinde olabilmektedir. Burada ağı kontrol eden bir koordinatör bulunmak zorundadır [78], [79].

Z-Wave genellikle ev otomasyonunda kullanılan düşük güç tüketen bir ağ teknolojisidir. Evlerde kullanılmasının bir nedeni de basit yapısı ve sinyal karışmasından çok etkilenmemesidir. Z-wave'de 1 GHz altı kullanılır, Zigbee'den daha yavaş veri aktarım hızına sahiptir ve orta-düşük menzilli çalışmaktadır [79], [80].

WirelessHART çoklu sekme yapısına sahip örgü temelli bir ağ protokolü olup genellikle endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Güvenliği AES şifreleme tekniğiyle sağlanmaktadır. 2.4 GHz frekansında çalışmaktadır ve hız ve menzili Zigbee ile yakındır [79].

LoRa, uzun alan etkili geniş bant spektrum modülasyon tekniğinin kısaltmasını ifade eden bir teknolojidir. LoRa son yıllarda nesnelerin interneti konseptinin vazgeçilmez bir donanımı haline gelmiş, düşük güç harcarken çok uzun menzillerden haberleşme sağlayan bir teknolojidir. LoRa'nın menzili açık alanda görüş mesafesinde 30 kilometreyi geçebilmektedir. LoRa teknolojisi sayesinde enerji yönetimi, doğal kaynakların kullanımı, afet yönetimi ve engellenmesi ve kirlilik kontrolü gibi uygulamalarda büyük başarılar elde edilmektedir. Mevcutta LoRa akıllı şehirler, akıllı evler, akıllı tarım, akıllı ölçme, akıllı enerji şebekeleri ve lojistik gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. LoRa'nın mevcut ilerleyişi ve yaygınlaşması sayesinde dünya çapında nesnelerin interneti teknolojisinin temel çatısı haline geldiği söylenmektedir [81]. Sigfox menzil ve güç tüketimi açısından LoRa'nın rakibi olan bir protokoldür.

Bluetooth ve düşük güçlü bluetooth (BLE), 2.4 GHz bandında çalışmakta ve 100 metre menzil sunmaktadır. Mobil cihazların hemen hepsinde bulunan çok yaygın bir teknolojidir. BLE teknolojisi daha az güç tüketme fakat aynı menzili sunmaktadır. Buna rağmen bluetooth'a göre daha yavaş veri aktarımına sahiptir. Tablo 2.2'de menzil, kullanılan frekans, ortalama harcanan akım, bağlanabilecek maksimum düğüm sayısı gibi parametreler verilerek en yaygın kullanılan kablosuz sensör ağı teknolojileri özetlenmiştir [82], [83], [84], [85].

Tablo 2.2 Yaygın kullanılan ağ protokollerinin karşılaştırması

Protokol	Topoloji	Maks. Düğüm	Menzil	Güç Tüketimi	Frekans	Veri Hızı
Zigbee	Örgü, P2P	64000	< 100 m	Düşük	2.4 GHz	250 Kbps
SigFox	Örgü	$>10^6$	>10 km	<Düşük	< 1 GHz	100 Kbps
Wi-Fi	Örgü	2048	< 200 m	Yüksek	2.4-5 GHz	200 Mbps
LoRa	Örgü, P2P	$>10^4$	>10 km	Düşük	< 1 GHz	50 Kbps
Z-wave	Örgü	232	< 100 m	Düşük	< 1 GHz	40 Kbps
Bluetooth	Örgü, P2P	32000	< 100 m	Düşük	2.4 GHz	25 Mbps
BLE	Örgü, P2P	32000	< 100 m	<Düşük	2.4 GHz	3 Mbps
WirelessHart	Örgü	30000	< 100 m	<Düşük	2.4 GHz	250 Kbps

Gerek kablosuz sensör ağı gerekse nesnelerin interneti konseptinin öncelikli alanlardan sayılması neticesinde, elektronik sektörü bu alanlardaki donanım eksikliğini tamamlamak için pek çok farklı platform geliştirmiştir. Mevcut platformlar uygulamanın çapına göre bir gömleğe dikilebilecek kadar küçük ve düşük güç harcayan ölçülerden, küçük bir bilgisayar kadar işlem gücüne sahip modellere kadar çeşitlenmektedir. Platformların diğer önemli özellikleri hitap ettiği son kullanıcı kitlesi, programlanma kabiliyetleri, işlemci, hafıza, desteklediği ağ türleri, maliyeti, özelleştirilebilirliği ve genel giriş çıkış pin sayısı olarak özetlenebilmektedir. Güncel ve popüler olan bazı platformlardan örnekler verilecektir.

ARDUINO YÚN REV 2, Arduino çatısı altındaki güncel IoT geliştirme kartıdır. Karışık sinyal giriş çıkışları ve kontrol için ATmega32U4 mikrodenetleyici içermektedir bunun yanında ise Wi-Fi desteği sunan Atheros AR9331 işlemcisini içermektedir. Düşük güç tüketimi uygulamaları için uygun değildir [86].

Intel Edison, entegre Wi-Fi işlemcisi içeren, 500 MHz işlemci ve 4 GB hafızaya sahip gelişmiş bir platformdur. Arduino UNO'yla birleştirilebilmesi sayesinde fiziksel dünyayla etkileşime girebilmektedir. Düşük güç tüketimi uygulamaları için uygun değildir [87].

Raspberry Pi serisi en yaygın tek kart mikrobilgisayarlardan birisidir. Linux desteği ile gelmektedir. Yeni nesil kartlarının hepsinde dahili Wi-Fi desteği

bulunmaktadır. Rasperry kolaylıkla Arduino ve diğer mikrodnetleyici veya sensörlerle, üzerindeki haberleşme portları sayesinde birleştirilebilmektedir. Düşük güç tüketimi uygulamaları için uygun değildir [88].

BeagleBone Black Wireless, Linux destekli gelişmiş bir tek kart mikrobilgisayardır. Programlanması kolaydır ve genellikle robotik projelerinde kullanılmaktadır. Wi-Fi ve Bluetooth desteği sunmaktadır [89].

Arm Mbed serisi Wi-Fi, Bluetooth ve LoRa destekleyen farklı kartları içeren bir geliştirme ekosistemidir. Yaygın kullanım alanında ve açık kaynak bir işletim sistemine sahiptir [90].

Semtech SX1276, 137 MHz ile 1020 MHz frekansları aralığında çalışan Lo-Ra modüllerini içeren, düşük güç tüketen uzun menzilli kablosuz bağlantı modülleridir [91].

ESP-32, Wi-Fi ve Bluetooth destekli, tıpkı bir önceki nesli olan ESP-8266 gibi, Wi-Fi temelli olmasına rağmen düşük güç uygulamalarına uygun, Arduino ile de programlanabilen hızlı geliştirme kitidir. Düşük maliyeti ve kullanım kolaylığı ve özelleştirilebilir yapısıyla çok yaygın kullanım alanına sahiptir [92].

2.5.2 Güncel Sorunlar ve Hedeflenenler

Mevcut durumda kablosuz sensör ağlarının yaygınlaşması için çözülmesi gereken çeşitli sorunları vardır. Bunlardan birisi kurulum aşamasıdır. Kurulacak ağ daha sonra değiştirilemeyecek şekilde gelmektedir. Fakat idealde ağ müdahaleye açık şekilde ve değişikliklere hazır olmalıdır. Bunun için ağ, hem önceden tanımlanmış dinamik bir yapıya sahip olmalı hem de gerekli kapasiteyi bulundurmaktadır.

Yine kurulan ağın farklı tipten sensörlerle çalışmaya uygun olması istenmektedir. Bu özellik ağın kullanılabilirliğini arttıracak gibi araştırma geliştirme faaliyetleri için şarttır. Farklı tipten sensörlere sahip ağlar heterojen olarak isimlendirilmektedir. Heterojen bir ağın veri yönetimi anlamında çok farklı olması gerekli değildir ancak düğümlerin donanım seviyesinde farklı olması şarttır. Her sensörün çalışma koşulu, kalibrasyonu ve fiziksel bağlantı özellikleri farklıdır.

Kablosuz ağların bir diğer kritik noktası güvenlik ve bağlantı kalitesidir. Güvenliği sağlamak için gelişmiş işlemciler ile iki uçlu şifreleme algoritmaları kullanılmaktadır. Kablosuz ağ protokollerini güvenlik geliştirme araştırmaları tüm açıkları kapatmaya yönelik olarak devam etmektedir. Kablosuz ağın bağlantı kalitesini etkileyen çeşitli faktörler vardır.

Enerji tüketimi özellikle de erişilmesi zor mekanlarda yapılan kablosuz ağ çalışmalarında sensör düğümleri için çok önemli bir kriterdir. Temel olarak en az enerji harcayan sistemlerin en uzun çalışma ömrü sunduğu düşünülebilir. Bu sorunu aşmak için hem yeni pil teknolojileri kullanılmakta hem de güneş enerjisi gibi yerinde enerji elde etme yöntemleri sensör ağlarına entegre edilmektedir. Enerji tüketimi o kadar önemlidir ki yeni bir platform veya protokol geliştirilirken en öncelikli konular arasında gelmektedir. Bluetooth ile düşük güç enerji harcayana versiyonu Bluetooth Low Energy'nin ayrılması buna en güzel örnektir. Daha düşük enerji harcayarak benzer menzillerde ve kalitede bağlantı sunan yenilikçi sistemler çıktıkça eskileri piyasadan silinmeye mahkum olacaktır.

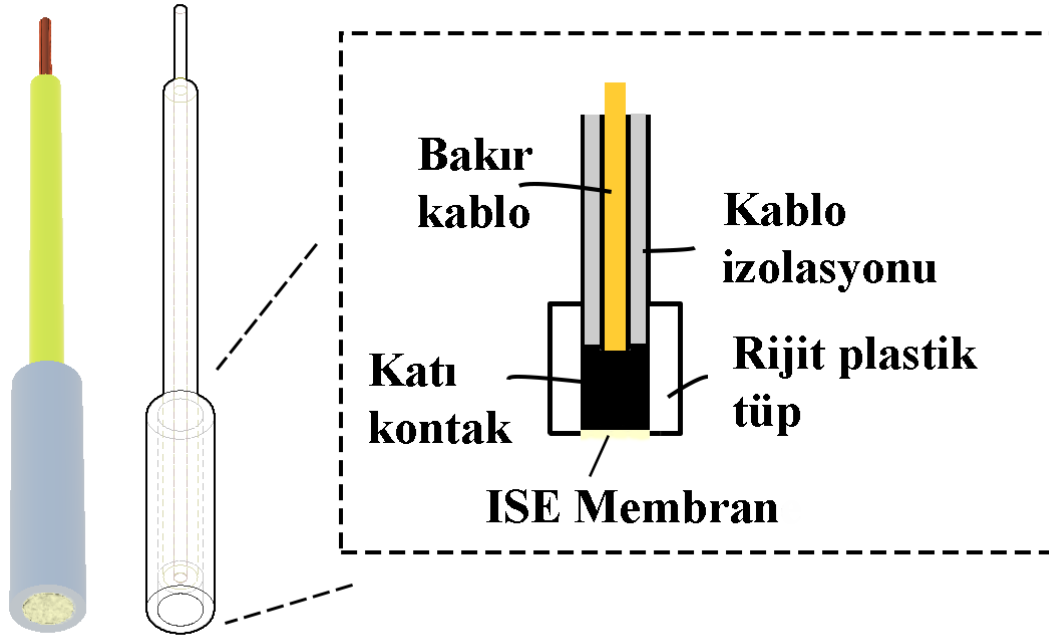
Çevresel şartlara dayanım, doğa ve çevre uygulamaları gibi dış hava koşullarında çeşitli aşındırıcılara maruz kalacak sistemler için çok önemli bir parametredir. Platformlarda seçilen elektronik parçaların bile sıcaklığa göre değişen karakteristikleri vardır. Öyle ki ekstrem ve askeri durumlar için üretilen parçalar üreticiler tarafından ayrı bir katalogta sunulmaktadır. Örnek olarak sıradan bir lityum iyon şarj edilebilir pilin kapasitesi soğuk havalarda yarısına kadar inmektedir. Veya aşırı rüzgar alan bir yere kurulan sensör düğümü fırtınalar sebebiyle parçalanabilir.

Verilerin değerlendirilmesi, sensör ağının gerçek çıktısı olan canlı verinin en işlevsel şekilde sunulabilmesidir. Sensör ağında verinin gösterilmesi genellikle kullanıcı ara yüzleri üzerinden olmaktadır. Bu ara yüzün ağ yapısına tam uygun bir şekilde olması, sensör parametrelerine yönelik olarak özelleştirilmiş olması şarttır. Toplanan verileri zaman, operasyon ismi, GPS verileri gibi değişkenlerle beraber düzenli bir şekilde arşivleyebilmesi de ara yüzden istenen bir özelliktir. Bir kablosuz sensör ağı uygulamasında, sensör verileri ana istasyona ham veri olarak gelebileceği gibi, düğüm tarafından işlenmiş olarak da gelebilmektedir. İyon seçici elektrot gibi ham verisi analog olan sensörlerde genellikle ön işlem yapılmadan veri alınmaktadır. Verinin elektrik sinyalinin anlamlı büyüklük verisine dönüştürülmesi, yani kalibrasyon işleminin ara yüzden gerçekleştirilmesi bu gibi uygulamalarda aranan bir özelliktir [93-96].

Tezimizde kullandığımız Wi-Fi modülü, açık kaynak donanım dünyasında ucuz maliyeti ve düşük güç tüketimi iddiasıyla oldukça dikkat çekmiş ve çok hızlı bir şekilde yaygınlaşmıştır. Hatta günümüzde en çok tercih edilen kablosuz haberleşme gömülü mikronedenetliyi platformları arasında yerini almıştır. Bu bağlamda kablosuz sensör ağı çalışmalarında kullanım çalışmalarının yaygınlaşması gereklidir.

3.1 Sensörlerin Geliştirilmesi

İyon seçici elektrotların fiziksel entegrasyona hazır hale gelmesi için 2 mm çapında borular kalıp olarak kullanıldı. Elektrotların genel şablonu Şekil 3.1'deki gibidir. Her bir elektrot aynı şablon üzerinde farklı membranlar ve kimyasal içerik farkıyla üretildi. Membran 0.6 mm çapındaki tek damar bakır iletken kabloya katı kontakla bağlandı. Bu kablounun ucu veri toplama sistemine sinyali taşımak için hazırlandı.



Şekil 3.1 Katı hal iyon seçici elektrot diyagramı [97]

3.1.1 Kullanılan Kimyasallar ve Cihazlar

Polivinil klorür (PVC, yüksek molekül ağırlıklı), potasyum tetrakis(4-klorofenil)borat (KTPCIPB), tetrahidrofuran (THF), Merck firmasından alınmıştır. Amonyum iyonofor

1 (nonaktin), dibütil ftalat (DBP), nitrat iyonofor tetradodesilamonyum nitrat (TDDAN) ve grafit, Sigma-Aldric firmasından satın alınmıştır. Macroplast Su 2227 kodlu epoksi Henkel isimli firmadan, sertleştiricisi ise Bayer firmasından alınmıştır.

Çalışmaların tamamında kullanılan saf su (ultra saf $18.2 \text{ M}\Omega \text{ cm}^{-1}$) eldesi için Elga Purelab Flex 4 kullanılmıştır. Çözeltilerin pH değerleri ölçümünde inoLab pH 7110, WTW, kombine pH elektrot SenTix 41, WTW kullanılmıştır. 3B yazıcı olarak Creality Ender 3 Pro kullanılmıştır. Lehimlemeler için 60/40 Soldex marka alaşımlı tel kullanılmıştır. Lehimlemelerde Weller WHS-40 marka cihaz kullanılmıştır.

3.1.2 İyon Seçici Elektrotların Hazırlanması

İyon seçici elektrotların hazırlanması, katı kontak üretimi, elektrotlara kaplanacak membranların üretimi, katı-kontak yüzeylerin membranla kaplanması ve son olarak üretilen elektrotların koşullanması olmak üzere 4 aşamalı işlemde özetlenebilir. Amonyum, nitrat ve potasyum elektrotları polimerik seçici membran ile üretildi.

Katı kontak; grafit, epoksi ve sertleştiriciden sırasıyla kütlece yüzde 50, 35 ve 15 oranlarında karıştırılarak elde edildi [98]. Bu karışım, THF (tetrahidrofuran) isimli çözücüyle homojen olması için yeterli olacağı miktarda eklenerek ardından da tam eşit dağılım sağlanması için karıştırıldı. Karışımdan THF uçup kaybolup macun kıvamına geldiği anda, 0.6 mm tek damar bakır telin yerleştirildiği sert (rijit) plastik tüpün diğer tarafından dokunmaya yetecek miktarda alınarak tüp içerisine dolduruldu ve basınç uygulanarak sıkıştırıldı. Hazırlanan içi dolu tüplerden oluşan elektrotlar bu aşamadan sonra 50°C 'deki etüvde bir gün boyunca bekletilerek kurutuldu.

Membranların hazırlanması 200 mg kütlelerde yapıldı. Nitrat, amonyum ve potasyum iyon seçici elektrotlar için toplam 200 mg olacak şekilde Tablo 3.1'de içerikleri verilen oranlarda karışımlar hazırlandı.

Tablo 3.1 İyon seçici elektrotların içerikleri

Nitrat ISE	% 4.0 TDDA- NO_3^- ; % 68.0 DBP; % 28.0 PVC
Amonyum ISE	% 1.5 NH_4^+ İyonofor I, % 0.5KTPClPB ; % 66 DOS; % 32.0 PVC
Potasyum ISE	% 2.0 K^+ İyonofor I, % 0.5 KTPClPB; % 64.5 DOS ;% 33.0 PVC

Membranların hazırlanma işlemine 4 mL hacmindeki cam tüplerde, 0.5 mL THF kullanarak, ultrasonik karıştırıcıda çözünmesiyle devam edildi. Ardından plastikleştirici 0.25 mL THF içerisinde başka bir tüpte çözündü. İyonofor veya yerine geçen iyonikleştirici bileşen de diğer başka bir 0.25 mL'lik THF içerisinde çözündü. İlk başta hazırlanan PVC karışımına bu diğer iki karışım eklendi ve ultrasonik karıştırıcı yardımıyla mümkün olduğu kadar homojenleşmesi için karıştırıldı. Bu aşamayla

kaplamaya hazır membran çözeltisi elde edilmiş oldu.

Önceki aşamalarda etüve konan elektrotlar çıkartıldı. Tüplerin alt tarafı her bir elektrot için ayrı ayrı kendi membran çözeltilerine daldırılarak kaplanması sağlandı. Kaplama işlemi hızlı ve açılı bir şekilde yapılarak hava kabarcığı oluşmamasına dikkat edildi. Bu aşamadan sonra elektrotlar kurumaları için düzgün bir şekilde sabitlenerek 12 saat süresince karanlık bir kutuya bırakıldı.

Elektrotlar kuruduktan sonra koşullandırılmak üzere hazırlanan çözeltilere bırakıldı. Katyon seçici elektrotlar kendi iyonlarının nitrat tuzlarının 10^{-1} molarlık çözeltilerine yarım gün boyunca daldırıldı. Anyon seçici elektrotlar ise ana iyonlarının sodyum tuzlarının 10^{-1} molarlık çözeltisinde 12 saat boyunca bekletilerek koşullandırıldı. Ardından tüm elektrotlar oda sıcaklığında karanlık bir kutuda saklandı. Bunun dışında tüm elektrotlar kullanılmalarından önce kendi ana iyonlarının 10^{-1} molarlık çözeltisinde 15 dakika kadar bir süre koşullandırıldı.

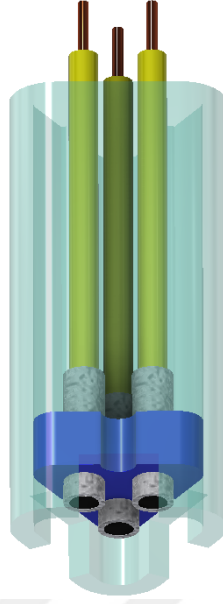
Referans elektrot olarak laboratuvarında daha önce hazırlanmış halde bulunan mini bir Ag/AgCl katı hal elektrot kullanıldı. Bu elektrot doğru saklama koşullarında tutulduğu ve koşullama gerektirmediği için kullanılmadan önce sadece saf suyla yıkandı.

pH elektrot kompozit olarak hazırlandı. Kütlece % 10 quinhidron, % 20 grafit, % 20 polimetil metakrilat (PMMA) ve % 50 akrilik sıvısı bir araya getirildi. Quinhidron, grafit ve polimetil metakrilat tozları aynı tüpe konarak iyice karıştırıldı. Ardından 0.5 mL THF'de çözdüğümüz PVC-NH₂ aynı tüpe eklendi. Bunun üstüne akrilik sıvı eklendi ve uygun kıvama gelmesi için sürekli karıştırıldı. Doğru kıvama geldikten sonra diğer elektrotlarda olduğu gibi bir ucunda tel ve katı kontak olan rijit tüpe dolduruldu. Fakat pH elektrot kuruması için bir hafta boyunca beklenildi [99].

3.1.3 Sensör dizisinin hazırlanması

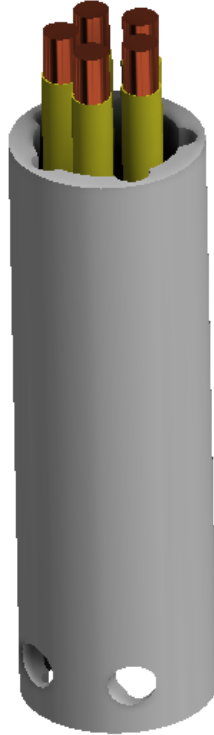
İyon seçici elektrotları bir arada tutabilmek için 3 boyutlu bir model geliştirildi ve üretildi. Bu model, gövde, alt tutucu ve üst tutucu olmak üzere 3 parçadan oluşmaktadır. Tutucular gövdenin içinde sensörleri sabitleme görevini yerine getirmektedir. Gövde silindirik şeklinde hazırlanmış olup istenilen sayıda sensöre göre tasarlanabilmektedir. Şekil 3.2'de 3 kanallı tutucu şeffaf bir şekilde gösterilmiştir.

Şekil 3.3'de ise 5 kanallı tutucunun render görüntüsü verilmiştir. 5 ayrı elektrotun bakır tel çıkışları sensörün üst tarafında görülmektedir. Tutucunun dış çapı ve et kalınlığı istenilen şekilde değiştirilebilmektedir. Şekil 3.4'de gösterildiği gibi tutucunun alt tarafında elektrot uçlarının sudaki vorteks veya çalkalanmalardan etkilenmeden suyla temasını sağlamak için su giriş-çıkış kanalları yapılmıştır.

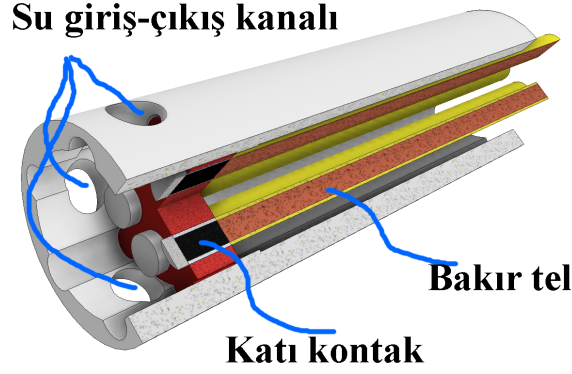


Şekil 3.2 3 kanallı sensör tutucu 3B tasarımı

Tutucu tasarımın çoklu sensör dizisi üretiminde getirdiği avantajlar uluslararası bir konferansta sözlü bir sunumla yayınlanmıştır [100].



Şekil 3.3 5 Kanallı sensör tutucu 3B tasarımı



Şekil 3.4 5 Kanallı sensör tutucu 3B tasarımının 3 çeyrek kesiti

3.1.4 Sensör üretim testleri

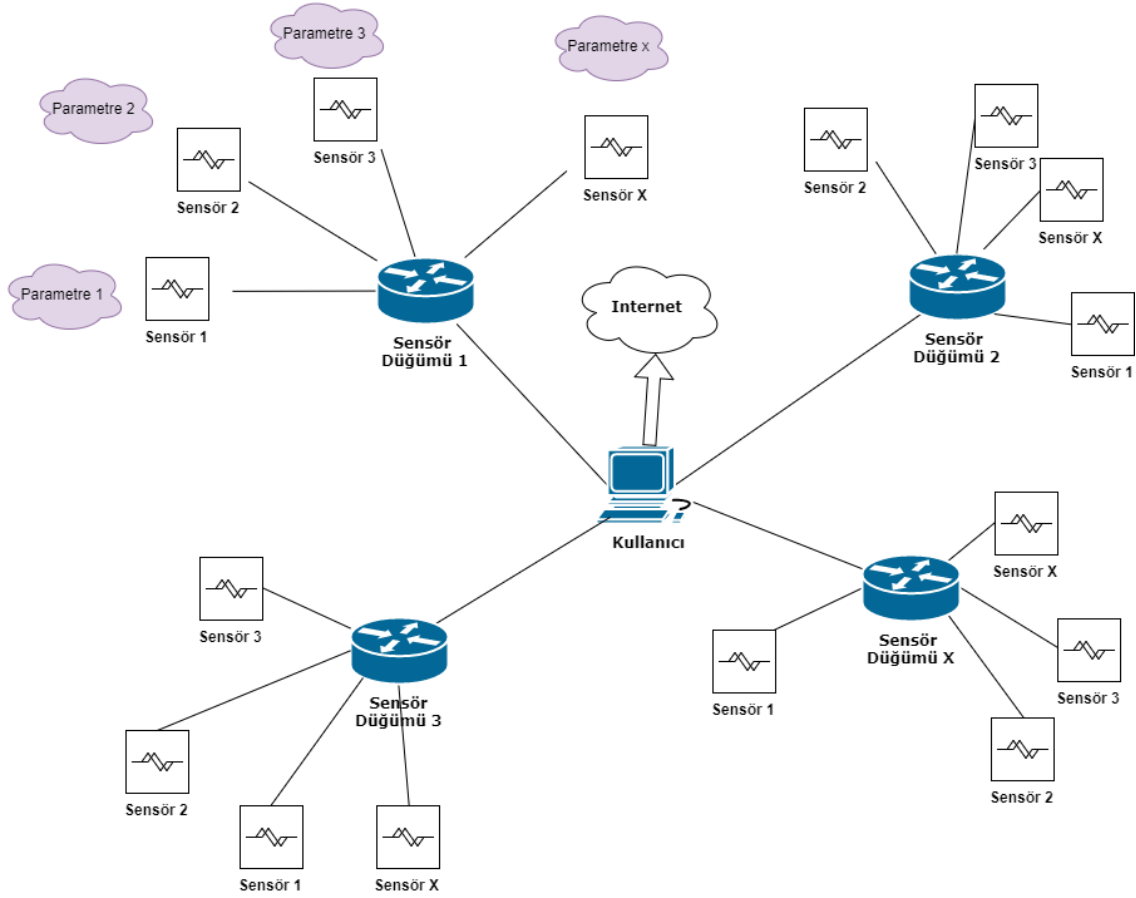
Sensörlerin başarısını gösteren değerlendirmeleri sağlayan çeşitli testler yapılmıştır. En küçük tayin limiti (EKTL), sensörün kalibrasyon eğrisinin, eğrinin doğrusallığının bozulduğu noktanın Y eksen seviyesine çizilen düz bir çizgi üzerindeki izdüşümü noktasından hesaplanmaktadır. EKTL bir sensör ile ölçülebilecek en küçük konsantrasyon değerini ifade etmektedir. Bu amaçla her bir elektrotun ana iyonunu bulunduran çözeltiler, 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} molarlık olarak hazırlandı. Sensörler bu çözeltilerin her birisinde birer dakika beklenerek merdiven şeklinde grafikler elde edildi. Ardından Python yazılım dilinde bir program geliştirildi ve elektrot verileri teker teker işlenerek en küçük tayin aralığı hesaplandı. Sensörlerin doğrusal çalışma aralıklarından yola çıkılarak kalibrasyon eğrileri ise $-\log(C)$ 'ye karşılık çizilen potansiyel grafiği üzerinden Nernst eşitliğine göre hesaplandı. Bu hesabın yapılması için yine Python [101] ile program yazıldı. Geliştirilen program doğru denklemlerini, korelasyon sabitini ve her bir nokta için hata payını hesapladı.

3.2 Kablosuz Sensör Ağının Geliştirilmesi

Çalışmamızda hedeflediğimiz tüm sensörleri taşıyan çok sayıdaki sensör düğümünü birleştirmek üzere kablosuz sensör ağı alt yapısı olarak Wi-Fi teknolojisi seçilmiştir. Wi-Fi teknolojisi (IEEE 802.11 b/g/n) kısa, orta ve geniş menzillerde çalışmaya uygun, kurulumu ve kullanımı kolay bir alt yapıdır [102]. Geliştirdiğimiz KSA platformu temel olarak Wi-Fi sistemi ve veri toplama sistemi olmak üzere iki ana bloktan oluşmaktadır. Bu platformun çıkış hedeflerinden birisi de, gelecekte değişik varyasyonlarda yükseltmelere ve yeni düzenlemelere açıklığı ifade edecek şekilde çoklu kullanım moduna uygun olmasıdır. Bu sayede bu platform ile çeşitli sayılarda ve çeşitli türlerdeki sensörler ile yenilikçi uygulamalar kolaylıkla yapılabilecektir.

Kablosuz su kalitesi takip sistemi için kurulan kablosuz ağı şematiği Şekil

3.5’de gösterildiği gibidir. Tüm sensör düğümleri kullanıcının kullandığı bir bilgisayar ile aynı kablosuz ağa bağlanmış durumdadır. Bu kablosuz ağ bilgisayar üzerinden veya bağımsız bir kablosuz bağlantı noktası cihazı tarafından sağlanacaktır. Kullanıcı bilgisayar üzerindeki bir yazılımla kablosuz sensör ağının durumunu görüntüleyebilecek ve denetleyebilecektir. Gelen bütün verilerin ve yapılacak denetimlerin, her bir sensör düğümünün internete doğrudan erişim yeteneği olmaması durumunda bilgisayar üzerinden olması durumunda ise doğrudan internete yani bulut bilişime aktarılması mümkündür.



Şekil 3.5 Kurulan Wi-Fi temelli ağın topolojisi

Platformun Wi-Fi sistemi düşük güç ve düşük maliyet prensiplerine uyacak şekilde geliştirilmiştir. Sistem kullanıcı tarafında ek donanım gerektirmeyecek basitlikte üretilmiştir. Wi-Fi temelli KSA sistemi, sensör düğümleri ve ana istasyon şeklinde iki tip bileşenden oluşmaktadır. Ana istasyon sayısı 1 tane iken sensör düğümü sayısı teorik olarak binlerce olabilmektedir. KSA topolojisi merkezi stratejide olduğu için yıldız şeklindedir ancak altyapımız Wi-Fi mesh adı verilen merkezi olmayan genişletilmiş Wi-Fi ağı olarak yeniden uygulanabilme özelliğine de sahiptir. Seçtiğimiz topoloji sayesinde kalıcı ve uzun zamanlı açık hava veya iç mekan KSA ortamı sağlanmıştır.

Bu sistemde veri gönderebilmek için her bir sensör düğümü ana istasyona bağlı olmak zorundadır. Ana istasyon olarak Wi-Fi desteği olan her hangi bir kişisel bilgisayar yeterlidir. Fakat isteğe göre harici Wi-Fi donanımı eklenebilmektedir. Sistem günlük yaygın olarak kullanılan bilgisayarlara uygun olarak üretilmiştir.

Sensör düğümlerinde ise parça tasarrufu, programlama kolaylığı, düşük enerji tüketimi hedeflerini sağlamak amacıyla Wi-Fi desteği dahili olarak bulunan bir mikrodenetleyici tercih edilmiştir. Son yıllarda oldukça popüler olan ESP8266'nın bir çeşidi olan ESP-12S (Espressif Systems, Çin H.C.) temelli bir modül kullanılmıştır. Kullanılan ESP-12S modülü (Wemos D1 Mini) kompakt, küçük boyutlu, hızlı geliştirme ve prototiplemeye uygun bir IoT geliştirme kitidir. ESP8266, bağlandığı ana istasyonda internet erişiminin olması durumunda doğrudan internete bağlanma yeteneği olan bir nesnelerin interneti kartıdır. Aşağıda maddeler halinde ESP8266'nın tüm özellikleri verilmiştir:

- 11 dijital giriş çıkış pini
- Interrupt/pwm/I²C/I²S/one-wire, SPI, UART desteği
- 1 kanal ADC, 10 bit
- 16 MB (128 MBit) Flash bellek
- Harici ve dahili (seramik) anten desteği
- Saat hızı 80/160 MHz
- Besleme gerilimi 3.3 V
- 34.2 x 25.6 mm ölçüler
- 3 g ağırlık
- WEP ve WPA/WPA2 desteği
- IEEE 802.11 b/g/n Wi-Fi
- Dahili TR switch, balun, LNA, power amplifier

ESP8266, HTTPClient [103] kütüphanesini desteklemektedir ve buradan gelen HTTP POST/REQUEST yeteneği sayesinde bulut bilişim veritabanlarına doğrudan veri yazıp okuyabilmektedir. Tez sırasında internet bağlantısı olan bir ana istasyon kullanılmıştır ve sensör verileri geliştirilen arayüze ek olarak MathWorks firmasının bir ürünü olan ThingSpeak [104] isimli bulut bilişim servisine de gönderilmiştir. Burada servis

sağlayıcının ücretsiz bir şekilde sunduğu hizmet kuralları çerçevesinde veri aralıkları 15 saniyeyle sınırlandırılmıştır. Böylece nesnelerin interneti konsepti uygulaması gerçekleştirilmiştir.

ESP8266, TCP/UDP protokollerini de desteklemektedir ve kablosuz sensör ağı içerisinde düğümlerin birbiriyle ve ana istasyonla haberleşmesi için, aktarım katmanında yer alan UDP protokölüne dayalı bir uygulama geliştirilmiştir. Bu uygulama (uygulama katmanındadır), yazılımsal parçaları hem gömülü sistem hem de arayüzde olan bir yapıdadır ve bu parçalar karşılıklı olarak eşleşme özelliğindedir.

ESP8266 ve diğer ESP serileri derin uyku yöntemini desteklemektedir. Bu sayede tüketilen akım, veri gönderme gerekmediği zamanlarda çok daha düşük sınırlara çekilmekte ve devasa boyutlarda güç tasarrufu sağlanmaktadır [105].

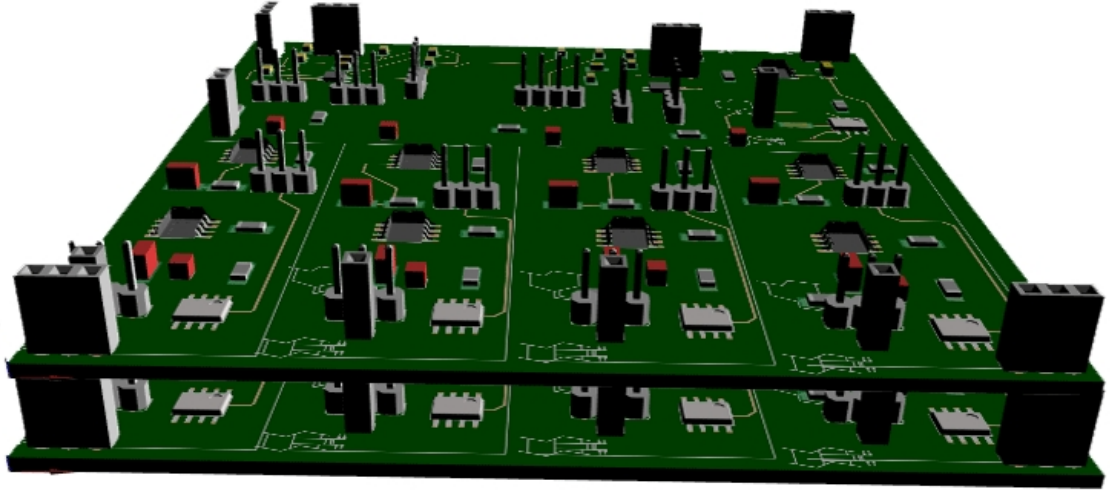
3.2.1 Veri Toplama Devresinin Geliştirilmesi

Veri toplama devresi çeşitli alt birimlerden oluşmaktadır: analog ve dijital sensörler için giriş devreleri, güç devresi, analog-dijital çevirici devresi ve kablosuz haberleşme birimi. Tasarladığımız devre modüler yapıda olup birleştirilebilen, ana kart ve sensör kartı adındaki iki PCB (basılı devre kartı) devreden meydana gelmektedir. Bu iki devrenin birleştirilmesi sayesinde yer tasarrufu sağlanmış olmakta ve ayrıca sensör sinyali işleme devresinin dijital işlem devresinden ayrılması sağlanmaktadır.

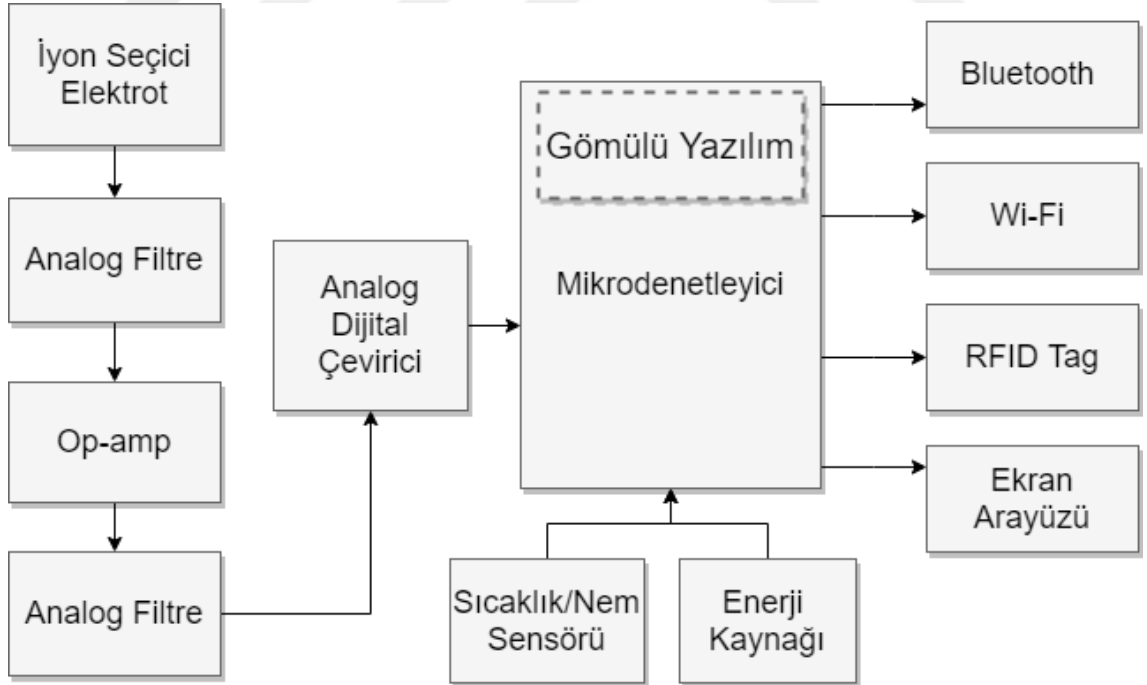
Şekil 3.6'da gösterildiği gibi devreler birbirine yığın baskılı devre kartı mantığıyla geçirilmektedir (PCB stack). İlk devre (sensör kartı) 4 adet iyon seçici elektrot ölçebilecek kapasitededir. Bu devreler üst üste takılarak kanal sayısı 16'ya kadar arttırılabilir yapıda olup sonuçta ortaya çıkan katmanlı yapı, 16 kanallı tek bir veri toplayıcı devre kartı var gibi davranış sergilemektedir.

Veri toplama sistemi birden çok iyon seçici elektrotla karşılık tek bir referans elektroduyla aynı anda çalışma hedefi için tasarlanmıştır. Her bir devre 4 seçici ve bir referans elektrotla çalışmaya uygundur. Referans elektrot için sensör kartlarından her hangi birisi seçilebilmektedir. Devreler KiCad yazılımıyla tasarlanmıştır [106]. Şekil 3.7'de veri toplama devresinin diyagramı verilmiştir.

İyon seçici elektrotlar analog çıkış yapan sensörlerdir. Karakteristik olarak yüksek impedansa sahip bir sinyal üretmektedirler. Potansiyometrik elektrokimyasal ölçüm tekniğinde bu elektrotlar akımı teorik olarak sıfır olacak şekilde ölçülmelidir. Bunu sağlamak için elektrot ile ölçer arasında bir işlemsel yükseltici (op-amp) devresi gereklidir. İşlemsel yükseltici, teorik olarak bir giriş ve bir çıkış voltajına sahip olan ve sinyalin giriş empedansı ne olursa olsun sıfır empedansda bu giriş sinyalini çıkış



Şekil 3.6 PCB stack, yığın baskı devre yapısı



Şekil 3.7 Veri toplama devresi diyagramı

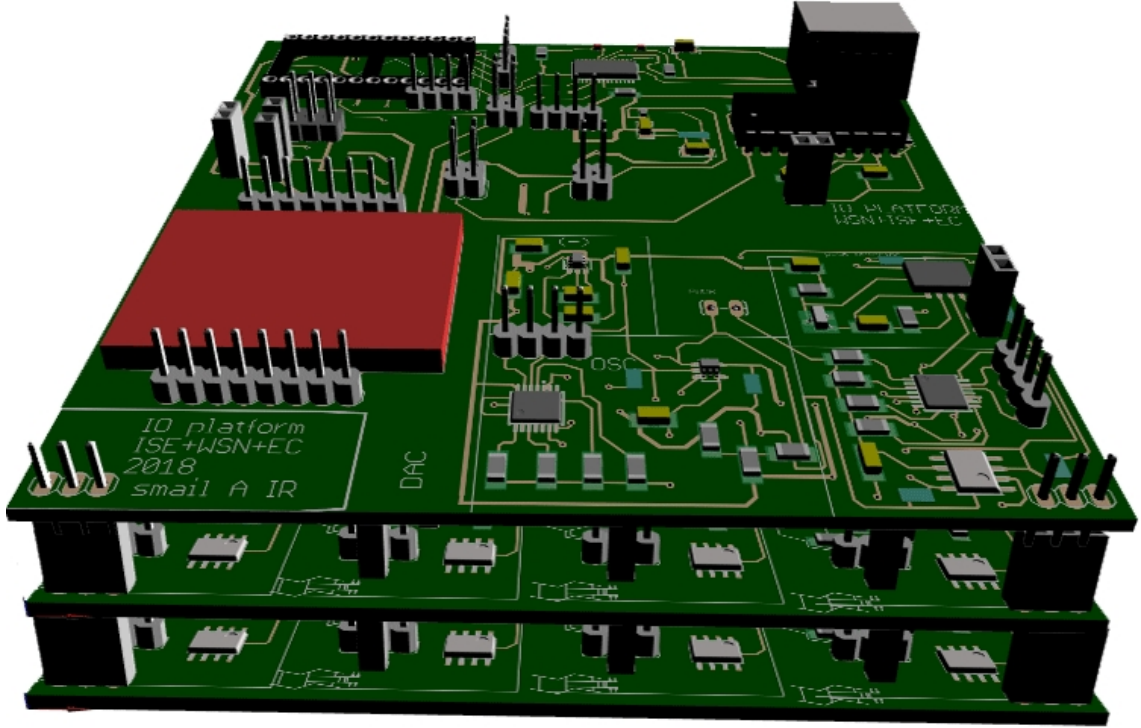
yapan devrelerdir. İşlemsel yükseltgeç kullanılmadığı takdirde akım sıfırlanamayacağı için potansiyometrik yöntem uygulanamamaktadır. Fakat gerçek dünyada işlemsel yükseltgeçlerin de az da olsa bir hata akımları bulunmaktadır, buna bias akımı denilmektedir. Bias akımı ne kadar küçük olursa bu hatadan kaynaklanan hata çıkış voltajı değeri o kadar küçük olacaktır. Bu nedenle bu çalışmada piyasadaki en düşük bias akım değerine sahip (<3 femto amper) bir op-amp olan LMP7721 (TI, ABD) tercih edilmiştir.

Sensör kartı devresi, iyon seçici elektrotların tamponlanmasını sağlayan op-ampları (yükselteç), sinyalin filtrelenmesi için op-amp, direnç ve kapasitörden (kondansatör) oluşan bir aktif alçak geçiren filtre (low-pass filter), analog sinyali kuantize etmek için gerekli bir analog dijital çeviri entegresi (ADC) ve kuantize edilen sinyalin bu çeviricide daha hassas okunması için gereken ofset gerilimini sağlayan bir referans gerilim entegresi içermektedir.

Ana kart, dijital sinyali işleyen mikrodenetleyici, gerektiği durumlarda bilgisayar bağlantısını sağlayan UART-USB dönüştürücü entegresi, kablosuz haberleşme modülü, güç bağlantı girişleri ve seçenek pinleri (jumper) içermektedir. Her iki devre de tamamıyla tarafımızdan tasarlanmış, üretilmiş ve el ile montajlanmıştır. Şekil 3.8'de 8 adet iyon seçici elektrot ölçme kanalı yani iki sensör kartı ve bir ana kart içeren sistem gösterilmiştir. Ana kart üzerinde koyduğumuz bir yuva ile ayrıca isteğe bağlı özelleştirmeyi sağlayacak Arduino desteği de bulunmaktadır. Bunun yanında kart üzerinde isteğe bağlı olarak monte edilebilen bir izolator entegre yuvası ve devresi de tasarlanmıştır. Seçilen izolator DCR010505'dir (TI, ABD) ve 5 V seviyesinde 1 W güce kadar DC-DC güç izolasyonu sağlamaktadır. Bu çalışmamızda taşınabilir batarya kullandığımız için izolatöre gerek duyulmamaktadır.

Geliştirdiğimiz sistem taşınabilir bir sistemdir ve enerjisini pil üzerinden almaktadır. Bu nedenle sensörlerin üreteceği negatif voltaj değerlerini okuyabilmek için negatif voltaj kaynağı gereklidir. Sensör kartında bu gerekliliği ortadan kaldırmak için op-ampların giriş voltajını ofset ile yükseltme tekniği uygulanmıştır. Bu ofset voltajı yüksek doğruluklu bir referans voltaj kaynağıyla elde edilmiştir (LM4140-ACM, TI, ABD) ve referans elektrot üzerinden toprak gerilimine eklenmiştir. Sensör sinyalleri çeşitli nedenlerden dolayı gürültüyle karışmaktadır.

Mekanik titreşimler, elektromanyetik dalgalanmalar ve kaynağı bilinmeyen nedenlerden dolayı oluşan ve sensör karakteristiğine uygun olmayan sinyallerin filtrelenmesi yaygın bir yöntemdir. Geliştirdiğimiz sensör kartı, her bir elektrot için ayarlanabilir pinlere sahip, bir adet sinyal girişinde ve bir de çıkışında olmak üzere iki adet aktif filtreye sahiptir. Bu filtreler düşük (veya alçak) geçiren (low-pass)



Şekil 3.8 8 sensör kanalı içeren sistem

düzenlidir ve kesme frekansları 16 Hertz'e ayarlanmıştır. Frekansa bağlı olarak parametrelerin belirlenmesi için eşitlik 3.1 kullanılmıştır ve 1000 ohm direnç ile 10 mikrofaraad kapasitör seçilmiştir [107].

$$f = \frac{1}{2 \times \pi \times R \times C} \quad (3.1)$$

Birinci devrede kullanılan elektronik bileşenlerin adı ve özellikleri aşağıda belirtilmiştir. Tek kazançlı evirmeyen yükselteç: LMP7721 İyon seçici elektrotların analog çıkış geriliminin empedansının düşürülmesi için gerekli olan parçadır. Özellikleri aşağıda verilmiştir:

- Giriş akım sapması En fazla 25°C ±20 fA, En fazla 85° C± 900 fA
- Ofset gerilimi ±26 µV
- Ofset gerilim sapması– 1.5 µV/°C
- Giriş gerilim gürültüsü (at f = 1 kHz) 6.5 nV/√Hz
- Besleme akımı 1.3 mA
- Dönüş oranı 12.76 V/µs

- Besleme gerilimi 1.8 V to 5.5 V

LMP7721 elektronik endüstrisinde mevcut olan en düşük giriş akım sapmasına sahip olan hassas yükselteçtir [108]. 3 femtoamper düzeyinde bulunan giriş akım sapması oldukça düşük seviyededir. Yükselteç tasarımında yapılan geliştirmeler sayesinde bu başarıya ulaşılmıştır. Devremizde düşük giriş akım sapması özelliğine sahip yükselteç kullanımı önemlidir çünkü yükselteç giriş yapan elektrotun yüksek direnci olması nedeniyle, yüksek giriş akım sapması olması halinde çok yüksek gerilim farkı hataları ortaya çıkmaktadır. Eşitlik 3.2’de gösterildiği gibi ohm kanununa göre bu hata hesaplanmaktadır. Örnek olarak tez kapsamında geliştirilen örnek bir iyon seçici elektrotun direnci 10 MΩ olması halinde tipik bir yükseltecin giriş akımı sapması değeri olan 1 nA kullanılırsa, bahsedilen hatadan dolayı okunan analog sinyalde meydana gelecek olan gerilim farkı hatası 10 mV olacaktır. Bu fark elektrokimyasal olarak çok yüksek bir değeri ifade etmektedir. Tezde LMP7721’in tercih edilmesinin bir diğer nedeni ise düşük besleme gerilimi ve akımına sahip olması nedeniyle pil ile çalışmaya uygun bir yükselteç olmasıdır.

$$V_{hata} = I_{bias} \times R_{sensor} \quad (3.2)$$

Düşük geçirgen aktif filtre (kullanılan yükselteç, OP07X), iyon seçici elektrotlardan gelen sinyalin karakteristiğini bilmemiz ve onu tüm sinyal içerisindeki gürültüden ayırmamızı sağlayan bir filtredir. Bu filtre en basit haliyle bir direnç ve kapasitör ile yapılabilir ancak bu durumda giriş sinyalinin büyüklüğüyle doğru orantılı bir ofset kazancı sinyale karışmaktadır. Sensör uygulamalarında bu karışım istenmediği için empedans düşürülmektedir. Burada yine yükselteç kullanımı söz konusu olmaktadır ve böylece filtre aktif filtre adını almaktadır. Düşük maliyetli oluşu, kolay kullanılabilirliği ve düşük gürültüsü sayesinde bu yükselteçler aktif filtrelerde kullanılmaya oldukça uygun bulunmaktadır. Kullanılan OP07X’in özellikleri aşağıda verilmiştir:

- Harici bileşen gerektirmeme
- Düşük gürültü
- Chopper yükselteçlerin ucuz bir alternatifi olabilme
- Geniş giriş gerilimi aralığı 0 ±14 V
- Geniş besleme gerilimi aralığı ±3 V ±18 V

Analog dijital dönüştürücü (kullanılan parça, ADS1115), sensörlerden gelen analog sinyali dijital veriye dönüştüren esas bileşendir. Kullandığımız ADS1115 (TI, ABD) 'in özellikleri aşağıda verilmiştir:

- Çok küçük QFN paket
- (2 mm x 1.5 mm x 0.4 mm)
- Geniş besleme gerilimi aralığı: 2.0 V to 5.5 V
- Düşük akım tüketimi: 150 μ (Sürekli çevirim modundayken)
- Programlanabilir veri hızı: 8 SPS (saniyedeki veri sayısı) -860 SPS aralığında
- İç düşük sapmalı gerilim referansı
- İç osilatör
- 16 bit çevirim hassaslığı
- 4 pin I2C haberleşme ara yüzü
- 4 tek sonlu veya 2 diferansiyel analog girişler
- Programlanabilir karşılaştırıcı

ADS1115 kolay kullanımlı az miktarda dış bileşen gerektiren, yüksek hassasiyete ve tez için gerekli çalışma aralığına sahip bir ADC entegre devresidir. Bu entegrenin bir tek sonlu ölçüm düzeneğinde saniyede okuyabildiği en yüksek veri sayısı 215'dir ve bu sayı tezde üretilmesi hedeflenen platform için oldukça yeterlidir. ADC'nin kullandığımız hassaslık biti 16 bit olmuştur. Voltaj okuyucu sistemlerin hassaslığı en yüksek giriş değeri ile başlangıç değeri arasında kalan bölgenin (5 V), çeviricinin sahip olduğu toplam kuant sayısına bölünmesiyle bulunmaktadır (LSB, en düşük basamaklı bit) [109]. Bu sayede eşitlik 3.3'den yola çıkarak geliştirdiğimiz sensör kartıyla okunabilecek en düşük gerilim aralığı 0,076 milivolt olarak hesaplanmıştır. Bu değer iyon seçici elektrotlar söz konusu olduğunda oldukça yeterlidir.

$$LSB = \frac{Okuma\ alanı}{2^{toplam\ bit}} \quad (3.3)$$

Yüksek doğruluklu ofset gerilim referans entegresi, LM4140, tek-sonlu (single-ended) ölçümlerde eksi gerilim değerlerinin artıya bölgeye çevirmek için gereken ofset gerilim farkını üretmektedir. Özellikleri aşağıda belirtilmiştir:

- Yüksek başlangıç kesinliği 0.1%
- Çok düşük gürültü
- Düşük sıcaklık katsayısı 3 ppm/°C
- Düşük besleme gerilimi: 1.8V
- Düşük gerilim kesmesi 20 mV
- Düşük besleme akımı 230 μ A

Düşük gürültüsü ve hassaslığı sayesinde bu entegre sensör çalışmaları için oldukça uygun bulunmuştur. Devremizde 1024 mV gerilim üreten LM4140-ACM tercih edilmiştir.

Ana kartta kullanılan opsiyonel USB-UART dönüştürücüsü FT232R, USB-UART dönüştürücüsü kategorisinde oldukça yaygın kullanıma sahip başarılı ürünleri üreten FTDI (ABD) firmasının güncel bir ürünüdür. Aşağıda bazı özellikleri verilmiştir:

- Tek çipte USB asenkron seri veri transfer ara yüzü
- Tüm USB protokolü özel bir yazılım gerektirmeden tek çip üzerinde çalışmakta
- UART ara yüzü 7 veya 8 veri bitlerini, 1 veya 2 durma bitlerini desteklemektedir.
- USB FTDIChip-ID™ teknolojisinin getirdiği yeni özellikleri desteklemektedir.
- USB askıya alma devam etme özelliğini desteklemektedir.
- USB dirençleri kendindendir
- Harici kristal, osilatör veya rezonatör gerektirmez
- 3.3V ile 5.25V aralığında çalışabilir
- Tam hızda USB 2.0 ara yüzünü desteklemektedir.

Tüm bu özellikleri sayesinde piyasada bulunan pek çok taşınabilir USB destekli cihazda bulunan FT232R, tezimiz için de seçilmiştir.

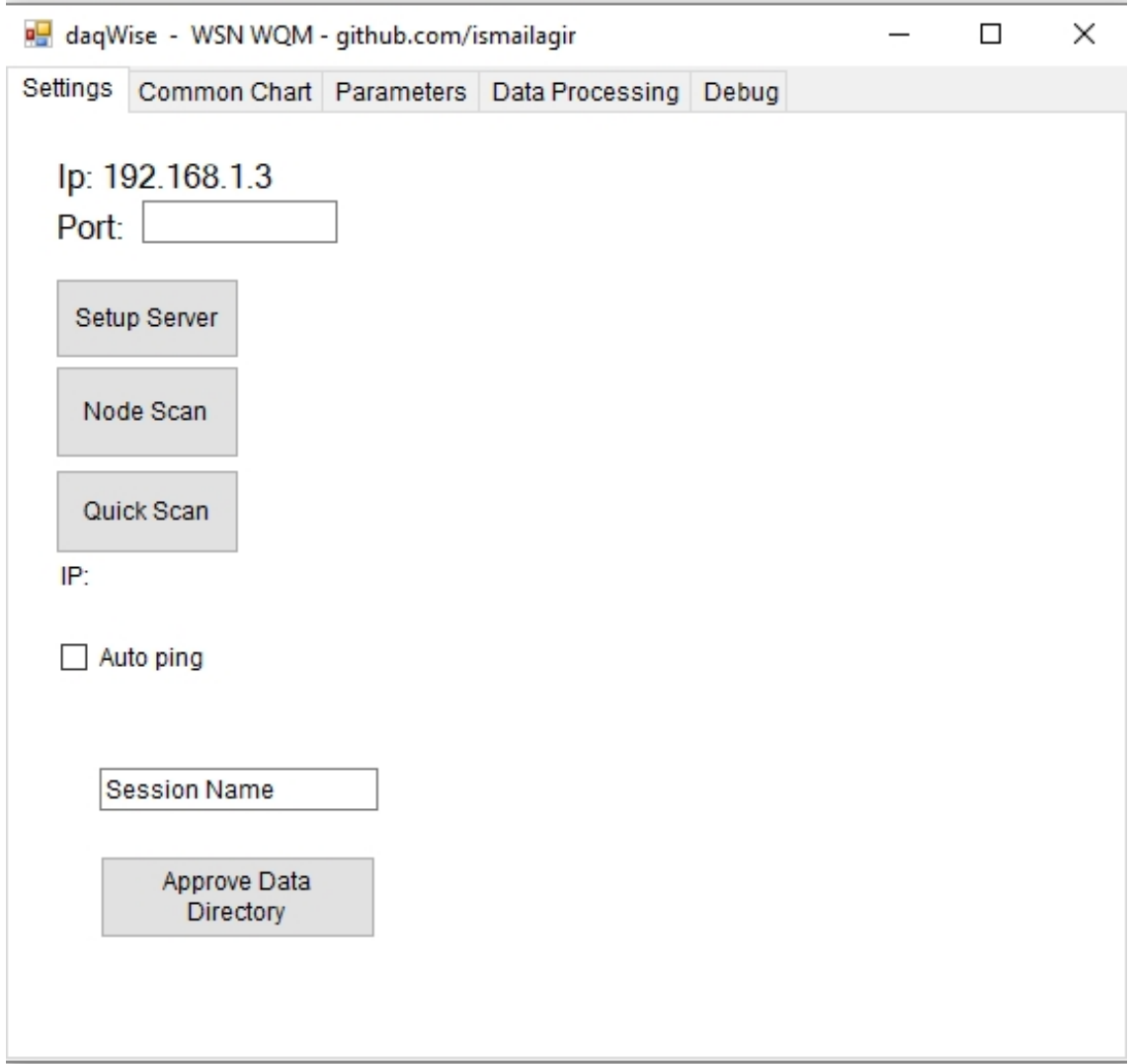
3.2.2 Veri Toplama Yazılımının Geliştirilmesi

Tez kapsamında geliştirilen su kalitesi takip sisteminin kullanıcı ara yüzü, Windows işletim sistemi üzerinde, bilgisayarda çalışan bir yazılımdır. Geliştirilen yazılım sayesinde kullanıcı çok sayıda farklı sensör düğümünden gelen çok sayıda sensör bilgisi içeren ölçümleri takip edebilecektir. Yazılıma "daqWise" ismi verilmiştir.

daqWise, "Microsoft Visual Studio 2017" geliştirme ortamında yazılmıştır. Verilerin grafik üzerinde gösterilebilmesi için "Microsoft Chart (mschart)" denetimleri kullanılmıştır. Yazılımın veri haberleşmesi "System.Net.Sockets" ad alanından, "UdpClient Sınıfı" kullanılarak UDP protokolü üzerinden yapılmaktadır. UDP protokolünün kendisi gereken tüm işler için kullanılmıştır ve yazılım MQTT gibi harici bir aracıya ihtiyaç duymadan çalışmaktadır.

Yazılım ve sensör düğümleri arasında tam çift yönlü (full duplex) haberleşme protokolü kurulmuştur. Bu sayede sensör düğümlerinden yazılama veriler geldiği gibi, yazılımdan sensör düğümlerine de komutlar gönderilebilmektedir. Bu komutlar sayesinde örneğin veri gönderme periyodunun değiştirilmesi gibi sensör düğümü gömülü sistem yazılımı üzerinde denetimler sağlanabilmektedir. Yazılımda bulunan sensör düğümü tarama özelliği sayesinde, o an açık olan ve veri göndermeye hazır halde bulunan fakat sisteme dahil edilmemiş sensör düğümlerinin varlığının araştırılıp sisteme dahil edilmesi ve veri toplama işlemine başlanması sağlanmıştır.

Şekil 3.9'da gösterildiği gibi veri toplama yazılımı çalıştırıldığında ekrana ilk ana ekran görüntüsü gelmektedir. Burada ilk önce ağ üzerindeki bilgisayarın IP adresi gösterilmektedir. Kullanıcıdan UDP sunucusunun kurulacağı port numarası istenilmektedir. Bu port numarasının bilgisayarda o an için başka bir yazılım tarafından kullanılan herhangi bir port ile aynı olmaması gerekmektedir. Fakat girilen bu port numarasının UDP istemcilerin hedef olarak seçtiği port numarasıyla aynı olması gerekmektedir.



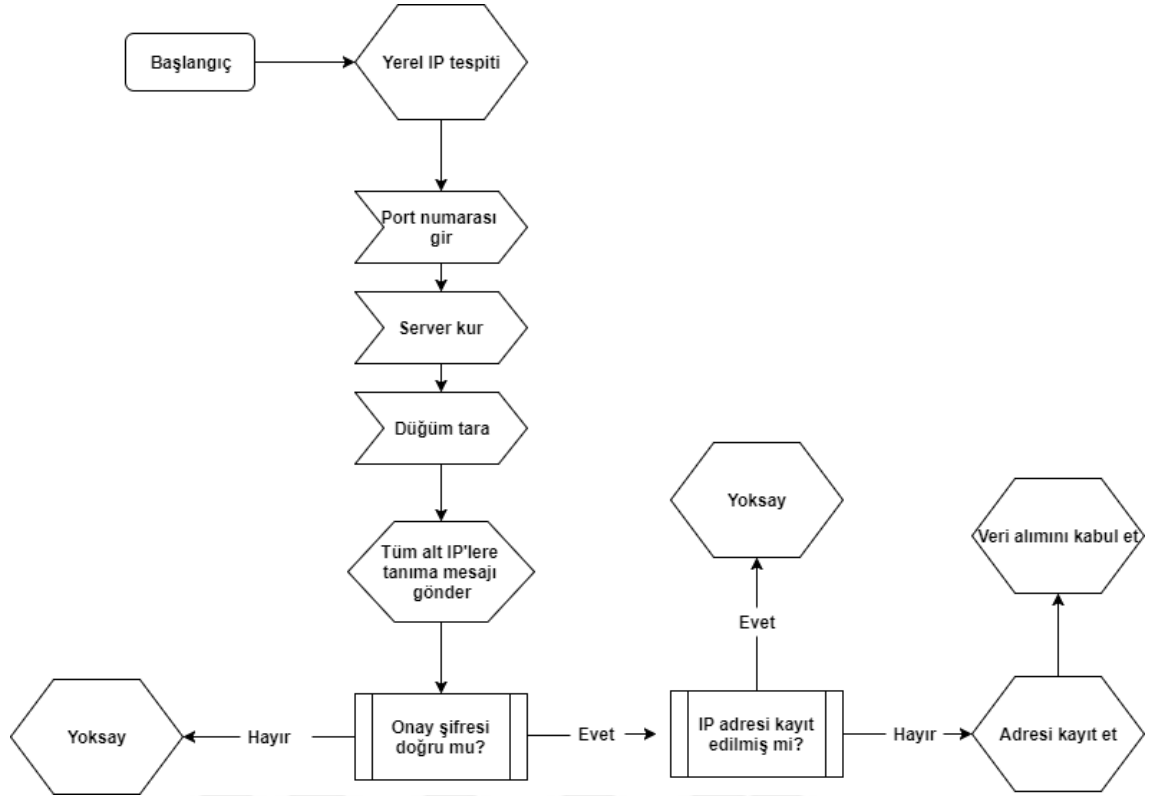
Şekil 3.9 KSA veri toplama yazılımının ilk açılıştaki ana ekran görüntüsü

UDP istemcileri (sensör düğümleri) bağlanacakları sunucu IP adreslerini, düğüm tarama işleminde kendilerine gelen mesajı okuyup doğruladıktan sonra bu mesaj göndericisi IP adresini okuyarak belirlemektedir. Bu sayede sensör düğümlerinin otomatik bir şekilde sisteme bağlanması sağlanmıştır. Geliştirilen yazılımın yerine getirdiği tüm görevler Şekil 3.10'da özetlenmiştir.



Şekil 3.10 daqWise yazılımının tüm görevleri

Yazılımın başlangıcı ve sensör düğümlerini tarama algoritması Şekil 3.11’de gösterilmiştir. Kullanıcının girmesi gereken tek değer port numarasıdır. Port numarası sonradan değiştirilemeyecek şekilde, bilinen bir numara olarak sensör düğümleri gömülü yazılımında belirlenmiştir. Sensör düğümlerinin her birisi aynı ağa bağlı olduğu için aynı IP ailesinden bir IP adresi almaktadırlar. Yazılım kendisinin de bağlı olduğu bu IP ailesinin tüm alt birimlerine şifre içeren bir mesaj göndermektedir.



Şekil 3.11 KSA veri toplama yazılımının sensör düğümü ekleme aşamasındaki çalışma algoritması

Sensör düğümleri ise Şekil 3.12’de gösterildiği gibi bu mesaja bir şifre ile cevap verirler. Bu şifre yazılım tarafından onaylanırsa ilgili sensör düğümünün daha önce kayıt edilmediğine bakılmaktadır. Eğer sensör düğümü ilk defa sisteme giriyorsa, kendi IP adresi ile kayıt edilecektir ve ana ekranda otomatik atanan ismiyle beraber belirecektir. Şekil 3.13’de böyle kayıt olmuş 2 sensör düğümü görülmektedir (Nod1 ve Nod2). Eğer sensör düğümü daha önce zaten kayıtlı ise yeniden kayıt edilmemektedir. Kayıtlı sensör düğümü IP adreslerinden gelen veriler artık yazılım tarafından okunmaktadır.

“H:RRRR H:RRRR H:RRRR H:RRRR H:RRRR H:RRRR H:RRRR”



Parametre1, Parametre2, Parametre3, Parametre4, Parametre5, Parametre X...

Şekil 3.12 Sensör düğümlerinden gelen verinin formatı

Buradaki "H" harfleri,"R" ise rakamları ifade eder. "H" değeri tek bir harf karakteridir fakat rakamlar için belirlenen bir sayı yoktur. Yazılım "H" karakterini veriye yapılacak işlemin türü olarak belirlerken, "R" rakamlarını da tek bir “float” tipinde

Wi-Fi Veri Toplama

Ayarlar Ortak Grafik Nod1 Nod2

İsim:Nod1
No:1 IP:192.168.31.174
Aralık:
2017:12:02:13:15:36
☒ tek graf.

İsim:Nod2
No:2 IP:192.168.31.147
Aralık:
2017:12:02:16:02:31
☒ tek graf.

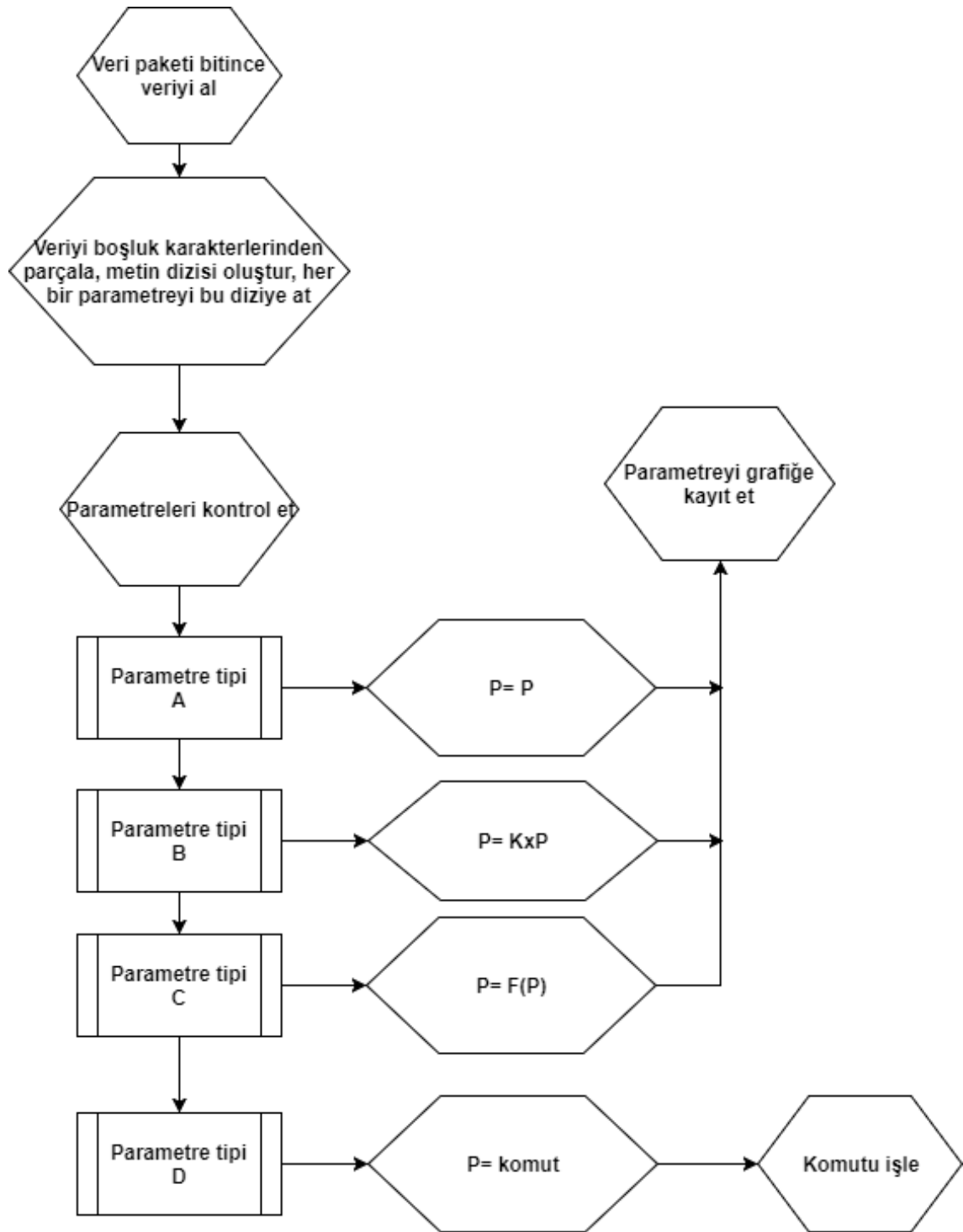
Ip: 192.168.31.168
Port: 4343
Server Kapat
Düğüm tara

Şekil 3.13 Yazılıma eklenmiş sensör düğümleri, Nod1 ve Nod2 (geliştirilme aşamasından alınmıştır)

değişken sayı olarak değerlendirmektedir. Float tipi değişken -3.4×10^{38} + 3.4×10^{38} arasında herhangi bir değer alabilen bir sayıdır ve 4 byte yer kaplamaktadır. Gelen verideki parametrelerin ne olduğu daha önce belirtildiği gibi veri işleyicisi tarafından değerlendirilecektir. Verinin parametrelere ayrılması ise geliş sıralarına göre olmaktadır. Yukarıda Şekil 3.12’de örnek olarak gösterilen veri formatında parametreleri boşluk karakteri “ ” ayırmaktadır. Veri formatı sensör düğümlerindeki gömülü yazılım tarafından belirlenmiştir.

Veri işleyicisi gelen parametreyi hiç değiştirmeden grafiğe aktarabilir ($P=P$); önceden belirlenmiş bir katsayıyla kalibrasyon işlemini uygulayarak grafiğe ekleyebilir (örneğin potansiyel değerinden konsantrasyon değerinin hesaplanması); parametreyi filtreleyip grafiğe aktarabilir veya özel bir fonksiyon uygular (örneğin pH değerinin hesaplanması); ayrıca gelen parametre yazılıma bir konuda bilgi ve komut aktarımı sağlayabilir (örneğin pilin voltaj değeri veya “sensörler değiştirildi” manasını ifade eden bir komut gibi). Sürecin algoritması Şekil 3.14’de gösterilmiştir.

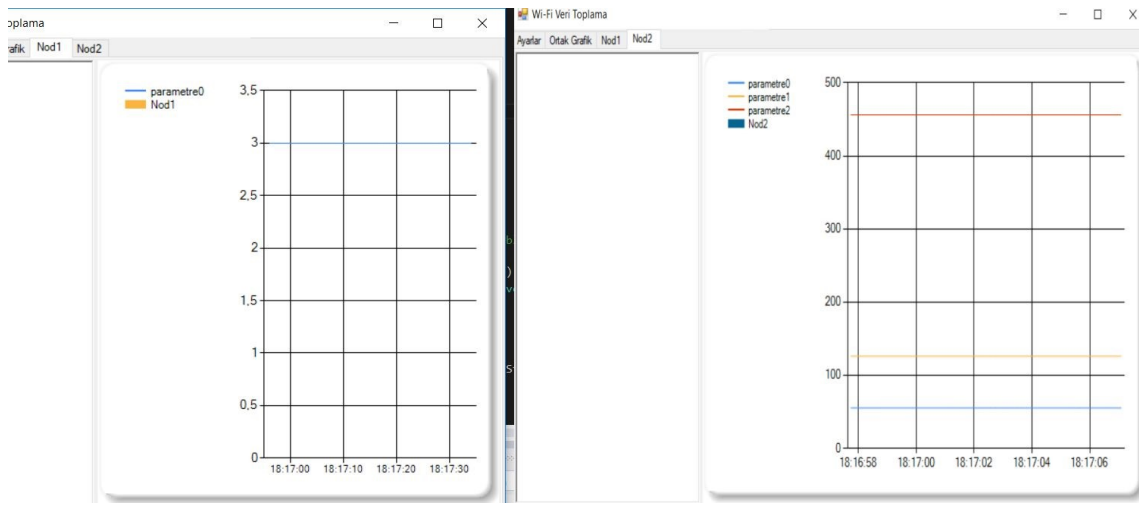
Veri işleyicisinden geçen veriler her bir sensör düğümü için ayrılan yeni sekmelerdeki grafiklerde görüntülenir. Grafiklerdeki tüm sensör verileri sayıyla ifade edilmektedir. Grafiğin X ekseninde verinin geldiği zamanı (yazılımın veriyi aldığı zamandır) gösteren "yıl:ay:gün:saat:dakika:saniye" formatındadır. Y ekseninde ise birden çok birimi içeren ölçekler mevcuttur. Varsayılan eksen Y, potansiyel değerini mV cinsinden göstermektedir. Y1 ekseninin birimi ise mg/L cinsinden konsantrasyondur. Y2 ekseninin birimi ise pH ölçeğidir. Yazılıma herhangi bir Y(a) eksenini eklemek



Şekil 3.14 Veri işleyici algoritması

mümkündür. Şekil 3.15’de Sensör düğümlerinin ayrı sekmeleri ve bu sekmelerin içeriği gösterilmiştir.

Ana ekrandaki sensör düğümleri bağlantı koptuğu yani düğüm ağdan düştüğü zaman gri renkle, bağlıyken yeşil veya kırmızı renkle gösterilmektedir. Yeşil renk o an için düğümün açık ve bağlı olduğunu, kırmızı ise düğümün derin uykuda olduğunu göstermektedir. Yazılım düğümden en son gelen cevabın geldiği andan itibaren aralık değerinden, önceden belirlenmiş bir bağlantı hatası zamanı değerinden fazla bir zaman geçtiğinde otomatik olarak düğüm rengini gri yapmaktadır. Fakat ağdan düşen sensörün takibi bırakılmamaktadır. Düğüm yeniden bağlandıktan sonra yazılım düğümü tanır ve eski yerine geri koyarak ölçümlerin devam etmesini sağlar.



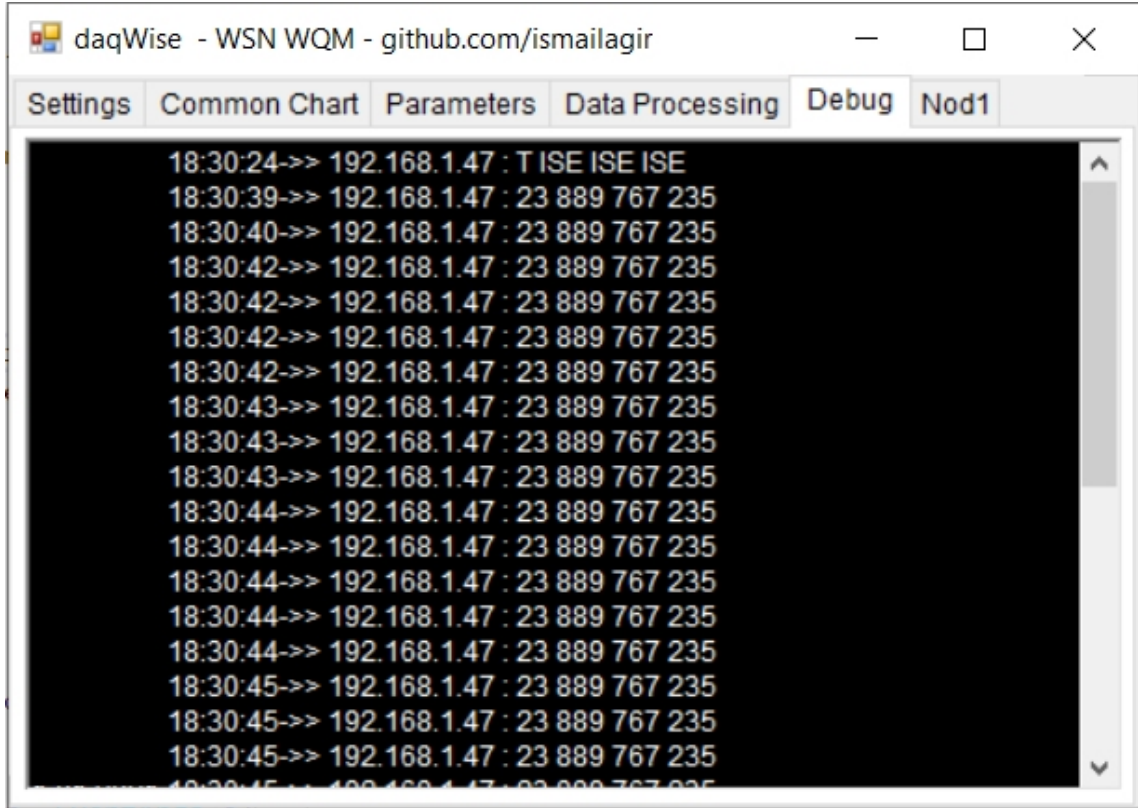
Şekil 3.15 Her bir sensör düğümü için oluşturulan sekmeler

3.2.3 Testler

Geliştirilen yazılımın, geliştirme sürecinde, Microsoft Visual Studio IDE ortamında performans ve hata ayıklama işlemleri yapılmıştır. Yazılımın performans değerlendirmesi yapılırken kullanıcı açısından tatbikat yapılmış ve ona göre kontrol sağlanmıştır. Yazılım; bellek kaçağı, aşırı işlemci tüketme sorunu, arayüzde istenmeyen takılma ve yavaşlamalar olmaması için tekrar tekrar kullanım testinden geçirilmiş ve sorunları düzeltilmiştir. Bu amaçla kod bloklarına her seferinde "try-catch" yapısı eklenmiştir [110]. Yazılım geliştirilirken uygulama sırasında gelen ve giden tüm parametreleri, ağ üzerinde yapılan müdahaleleri kayıt tutma amacıyla yazılıma bir "Debug" penceresi eklenmiştir. Uygulama sırasında debug ekranının örnek bir görüntüsü Şekil 3.16’da verilmiştir.

Debug pencesinde ayrıca görsel arayüz yerine yazılı olarak çeşitli işlemlerin yapılmasını sağlayan kod desteği de konmuştur. Öncelikli olarak tanımlanan "debug"

komutuyla geliştirici seçenekleri gelmektedir. Örnek olarak "start nod1 1000" komutu 1000 saniyelik aralıkla veri alımını nod1 için başlatmaktadır, "stop all" komutu veri alımını durdurmaktadır, "ping all" komutu tüm düğümlere ping göndermektedir, "last nod1" komutu nod1'in en son ne zaman görüldüğünü çevirmektedir, restart komutu yazılımı yeniden başlatmaktadır.



Şekil 3.16 Debug penceresi uygulama örneği

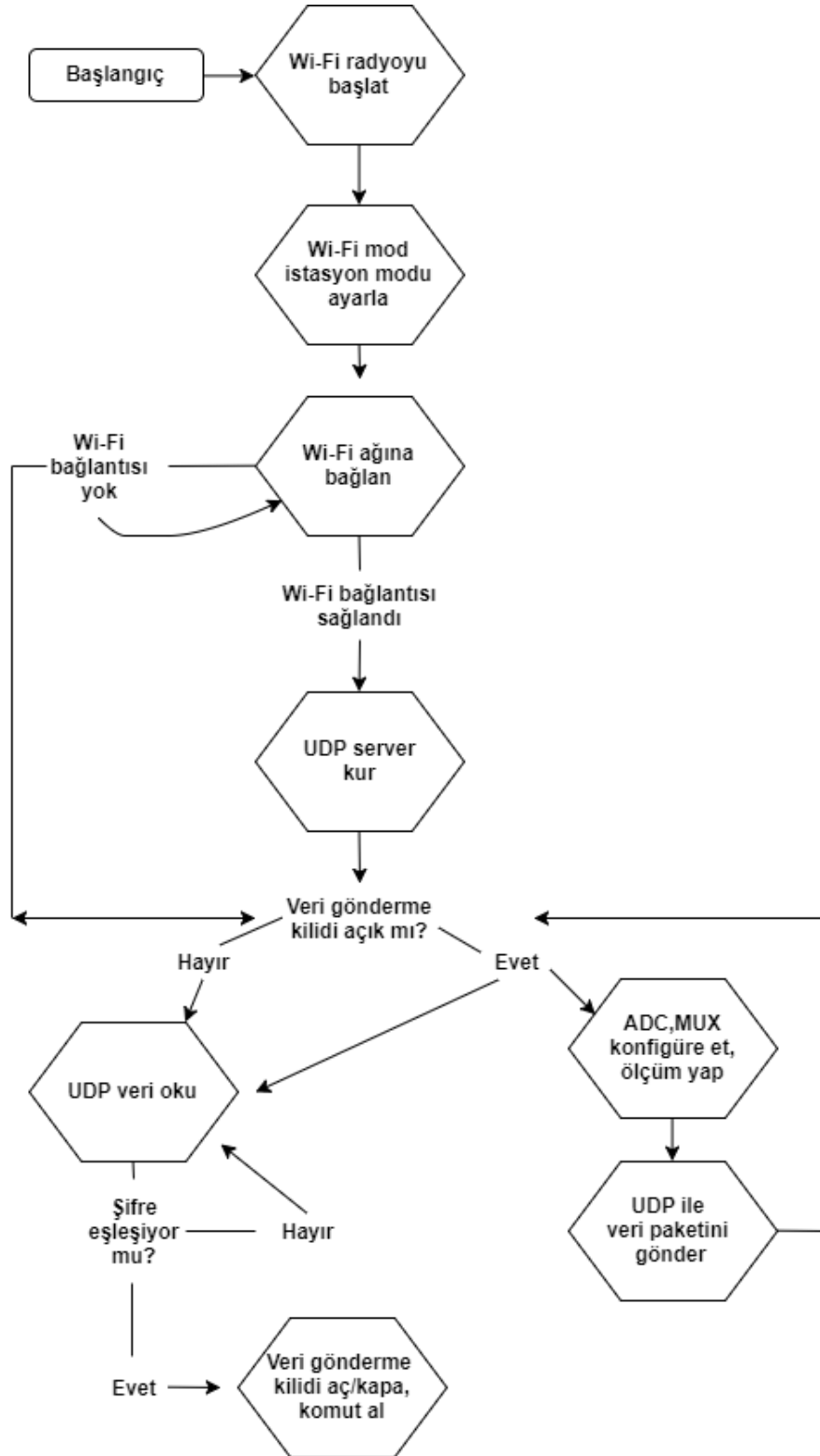
3.3 Veri Toplama Platformunun Geliştirilmesi

3.3.1 Gömülü Yazılım

Sensör düğümleri üzerinde bulunan mikrodnetleyicinin çalıştıracağı kodlara gömülü yazılım denilmektedir. Mikrodnetleyici ESP-12S, yaygın olarak kullanılan açık kaynaklı Arduino IDE mikrodnetleyici geliştirme platformu ile programlanmıştır.

Mikrodnetleyici üzerindeki gömülü yazılımın görevleri: sensörlerden gelen analog veriyi ADC (analog dijital çeviri) ile çevirmek, pil durumunu takip etmek, kablosuz sensör ağına bağlanmak, kullanıcıya yönelik hazırlanan ara yüz yazılımına komut göndermek ve ondan gelen komutları uygulamaktır. Mikrodnetleyici bu amaçlar için gerekli olan tüm giriş-çıkış bacaklarına (I/O pin) sahiptir. Sensör düğümü üzerinde çok sayıda farklı sensör olacağı için ve ADC giriş sayısının sınırlı olması nedeniyle , ADC ile mikrodnetleyici arasında kullanılması durumunda bir analog kanal sıralayıcı

ya da çoğaltıcı olarak isimlendirilen devrenin (MUX) kontrolü de yine mikrodnetleyici üzerindeki yazılım tarafından yapılmaktadır. Şekil 3.17’de mikrodnetleyicide gömülü yazılımın geliştirilen ağ kontrolü algoritması gösterilmiştir.

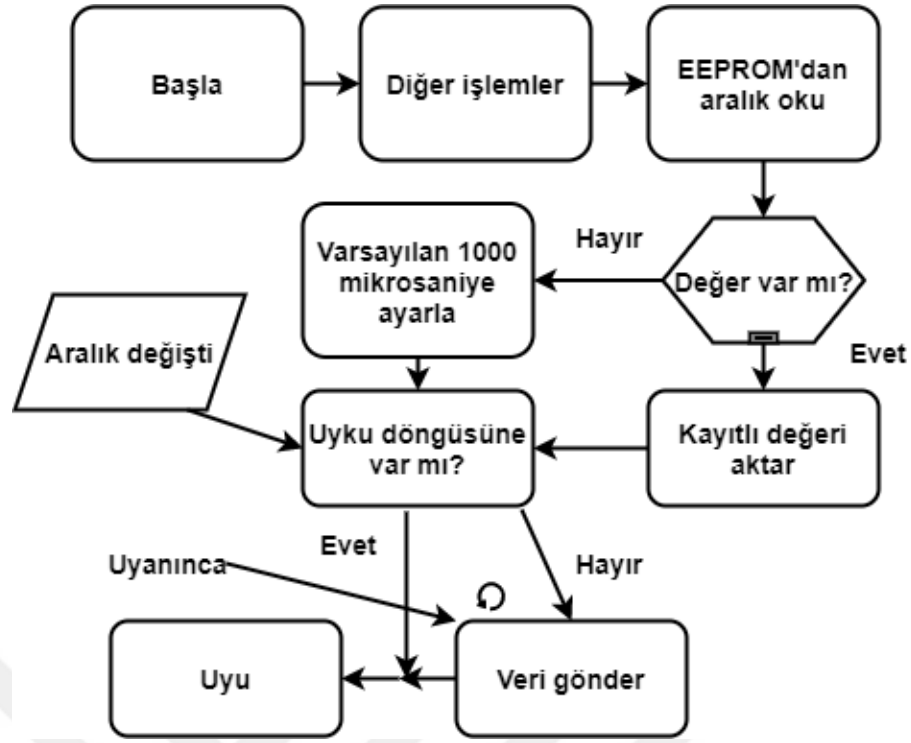


Şekil 3.17 Gömülü yazılımın algoritması

Gömülü yazılım mikrodenetleyici güç beslenme pinlerinden elektrik akımı sağlandığı anda çalışmaya başlamaktadır. Yazılım ilk önce mikrodenetleyici içerisindeki Wi-Fi radyosunu fiziksel olarak çalıştırmaya başlamaktadır. Ardından Wi-Fi ana istasyona bağlanmak için çalışma modu olarak Wi-Fi istemci moduna geçirilmektedir. Sensör düğümü bu moda geçmesinin ardından, önceden belirlenmiş bir ağ adı ve parolasıyla (SSID ve PASSWORD) bir Wi-Fi erişim noktası sunucusuna bağlanmaya başlamaktadır.

Çeşitli sebeplerden dolayı bağlantı sağlanamazsa yazılım bağlanmayı tekrar tekrar denemektedir. Bağlantı sağlandıktan sonra ise yazılım UDP protokollerini çalıştırmaya başlamaktadır. Bu andan itibaren yazılım kurulum aşamasından çıkmaktadır ve döngüye girmektedir. Bu döngü bir yandan sürekli olarak Wi-Fi bağlantısının sağlığını kontrol etmektedir. Bağlantının kopması durumunda döngüyü bekleterek yeniden ağa bağlanmayı tekrar tekrar denemektedir. Sağlıklı bağlantı varken yazılım, tanımlanmış bir "veri gönderme kilidi" değişkenine bakmaktadır. daqWise'dan gelen sensör düğümü tarama komutuyla aktarılan veriyi okuyan yazılım, şifrelerin uyuşması durumunda gelen ikinci komuta göre veri gönderme kilidini açabilir veya kapatabilir veya ek başka bir komut alabilir. Döngü bitince ve yeniden başlayınca veri gönderme kilidi değişkeni 1 değerini aldıysa, yazılım mikrodenetleyicinin sensörleri okumak üzere ADC ve MUX kontrollerini yapmasını sağlar. Veri okumanın ardından UDP portuyla göndermek üzere topladığı veriyi Şekil 3.12'de gösterildiği veri formatına çevirir. En son adımda elde edilen veri UDP portuyla gönderilir ve döngü yeniden başlar.

Gömülü yazılımın, kullanıcı arayüzünden aldığı komutlarla gerçekleştirdiği bir diğer eylem de derin uykuya geçerek, uykuya bağlı veri gönderme aralığını ayarlamaktır. ESP8266 modülünde standart olarak uyulabilecek en uzun süre yani aralık, yaklaşık olarak 71 dakikadır [111]. Gömülü sistem yazılımında bu aralıklar mikrosaniye cinsinden tanımlanmaktadır. Aralıklar dahili EEPROM da kayıt altındadır. Aralıklar, kullanıcı arayüzünden verilen komutla aktif olarak değiştirilmektedir. Şekil 3.18'de gömülü yazılımın genel çerçevesi ve derin uyku algoritması gösterilmiştir. Sistem veri gönderme aralığına uygun olarak veri gönderirken ille de uyumak zorunda değildir.



Şekil 3.18 Gömülü yazılımın uyku döngüsü

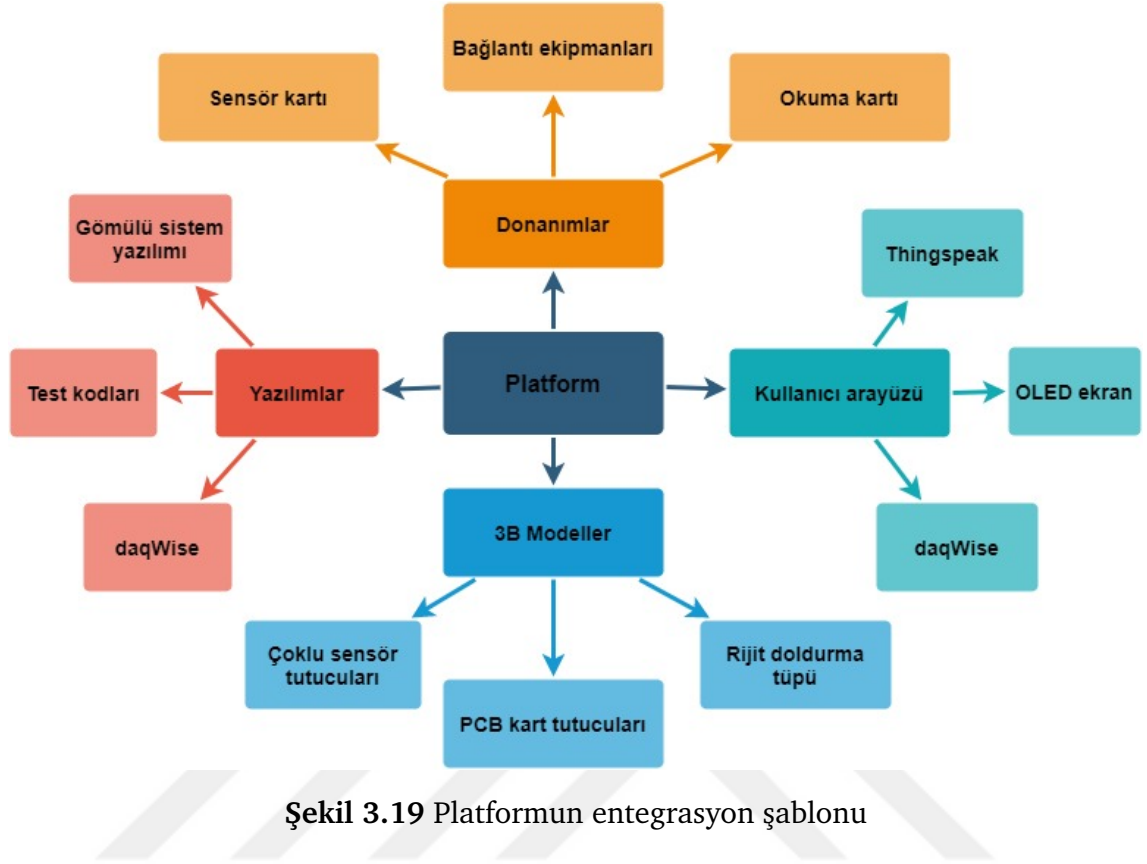
3.3.2 Üç Boyutlu Modellerin Üretimi

Tez çalışması boyunca kullanılan tüm üç boyutlu modellerin üretiminde (kart tutucuları, sensör tutucuları ve iç parçaları, sert malzemeden imal sensör tüpü, platform kutusu) Autodesk Inventor 2017 [112] programından yararlanıldı. Modellerin STL formatında kayıtları alındı ve Simplify3d [113] yazılımıyla dilimlendikten sonra Creality Ender 3 Pro modeli üç boyutlu yazıcıda baskıları alındı. Baskı parametreleri katman yüksekliği 0.3 mm, tabla sıcaklığı 60°C , nozzle sıcaklığı 200°C olarak ayarlandı. Yazıcının tekniği FDM'ye (Fusion Deposition Modeling) dayanmaktadır. Kullanılan filamentler PLA+ ismiyle bilinen poli laktik asit temelli bir polimerdir [114]. Bu filament esneklik ve dayanıklılık yönünden uygulamamızda gayet yeterlidir ve düşük maliyetlidir [115]. Ayrıca biyobozunur özelliği taşıyan bir polimer olması yönünden çevreyi daha az kirlettiği söylenmektedir [116].

3.3.3 Sistem Entegrasyonu

Bu aşamada kablosuz sensör ağı takip platformunun buraya kadar geliştirilmiş tüm alt parçaları (kullanıcı arayüzü yazılımı, gömülü donanım, kablosuz sensör ağı, veri toplama devreleri ve sensörler) bir sistemi oluşturmak üzere bir araya getirildi. Bu işlemle, birbirlerine uygun bir şekilde hem fiziksel hem de bilişsel (yazılım anlamında) olarak, mühendislik yapılmış ayrı parçaların bir araya getirilmesi gerçekleştirildi.

Sistem entegrasyonu bunu ifade etmektedir [117]. Şekil 3.19’da tüm parçalarıyla tam bir sistemin şablonu verilmiştir.



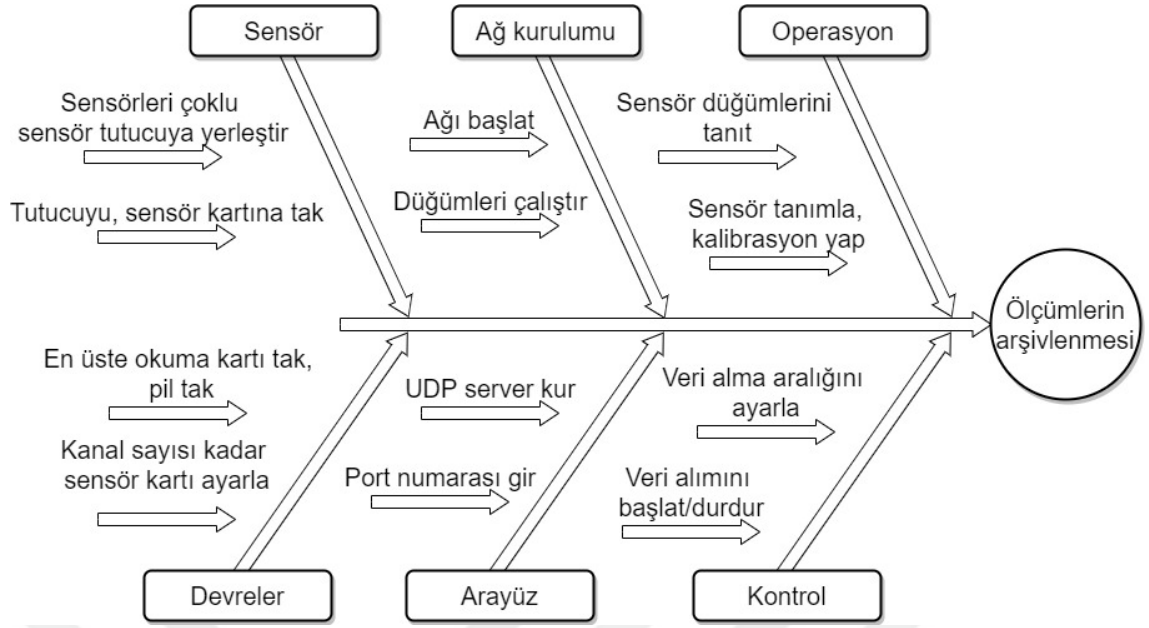
Şekil 3.19 Platformun entegrasyon şablonu

Böylece platformun bir bütün halinde sorunsuz çalışabilir halde olması sağlanmıştır. Sistemin kurulma ve çalışma prosedürü sonuçlandırılmıştır. Çalışan sistemin kurulum ve operasyon aşamaları aşağıda verilmiştir. Şekil 3.20’de ise operasyon algoritması şematik olarak ifade edilmiştir.

Kurulum:

1. Sensörler sensör tutucuya yerleştirildi.
2. Sensör tutucu okuma devresine takıldı.
3. Okuma devresine üst kartı takıldı.
4. Kablosuz ağ başlatıldı.
5. Kullanıcı arayüz yazılımı çalıştırıldı.
6. Sensör düğümlerine güç verilir ve aktif hale geçmesi sağlandı.

Operasyon:

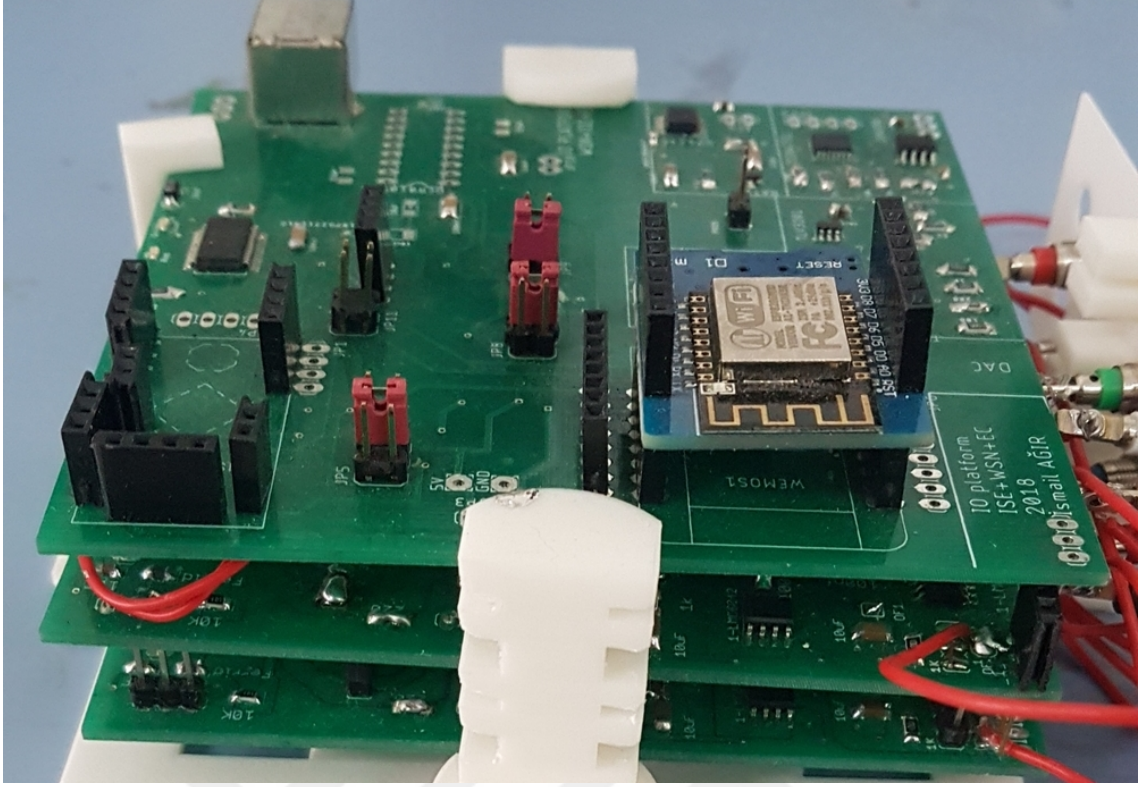


Şekil 3.20 Sistemi çalıştırma algoritması

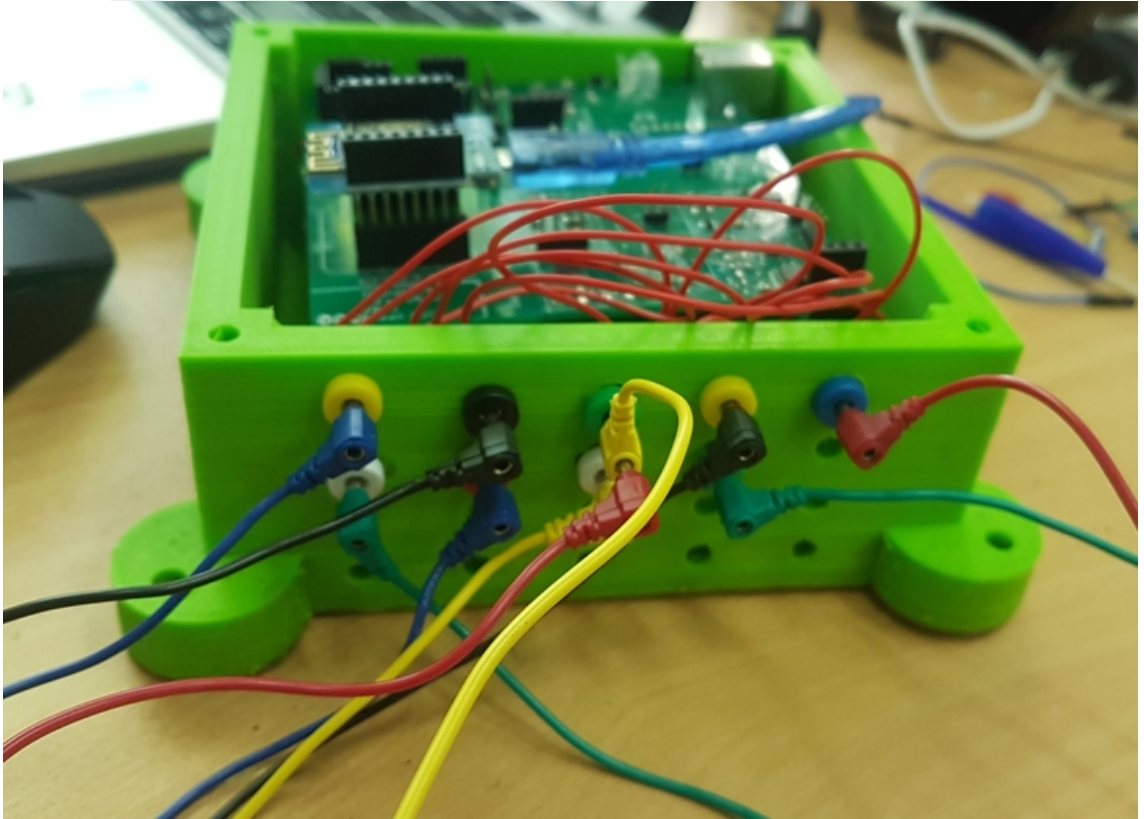
1. Kullanıcı arayüzüne sensör düğümleri tanıtıldı.
2. Sensör düğümlerinde sensörlerin tanımlama ve kalibrasyonları yapıldı.
3. Sensör düğümlerinin veri alma sıklığı ayarlandı.
4. Veri alımı başlatıldı.
5. Raporlanan veriler istenilen zamanda alınabildi.
6. Veri alımı durdurulabildi, bitirilebildi veya yeniden başlatılabildi.

3.3.4 Testler

Platform bir önceki bölümde anlatıldığı gibi kurulup operasyona geçirildi ve bu işlemler defalarca kez tekrar edilerek sorunların çözümleri yapıldı. Şekil 3.21’de 8 kanallı bir sensör düğümünün devre kartlarının birleştirilmiş hali gösterilmiştir. Şekil 3.22’de bir sensör düğümünün 3 boyutlu baskı kutusuna koyulmuş hali gösterilmiştir. Şekil 3.23’de 5’li sensör tutucunun ölçüm sırasındaki hali gösterilmiştir. Şekil 3.24’de başka bir 3 boyutlu baskı kutusu içerisinde devre, 8’li ve 5’li sensör tutucuları ve çeşitli sensörler gösterilmiştir.



Şekil 3.21 İki sensör bir okuma kartının baskı devre kartı yığın yapısıyla birleştirilmiş hali



Şekil 3.22 Üç boyutlu baskıyla alınmış sensör düğümü kutusu



Şekil 3.23 Beşli sensör tutucu ve sistemin ölçme sırasındaki görüntüsü



Şekil 3.24 Başka bir 3B baskı kutu içerisinde kartlar, çoklu sensör tutucuları ve çeşitli sensörler

4

SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1 Sonuçlar

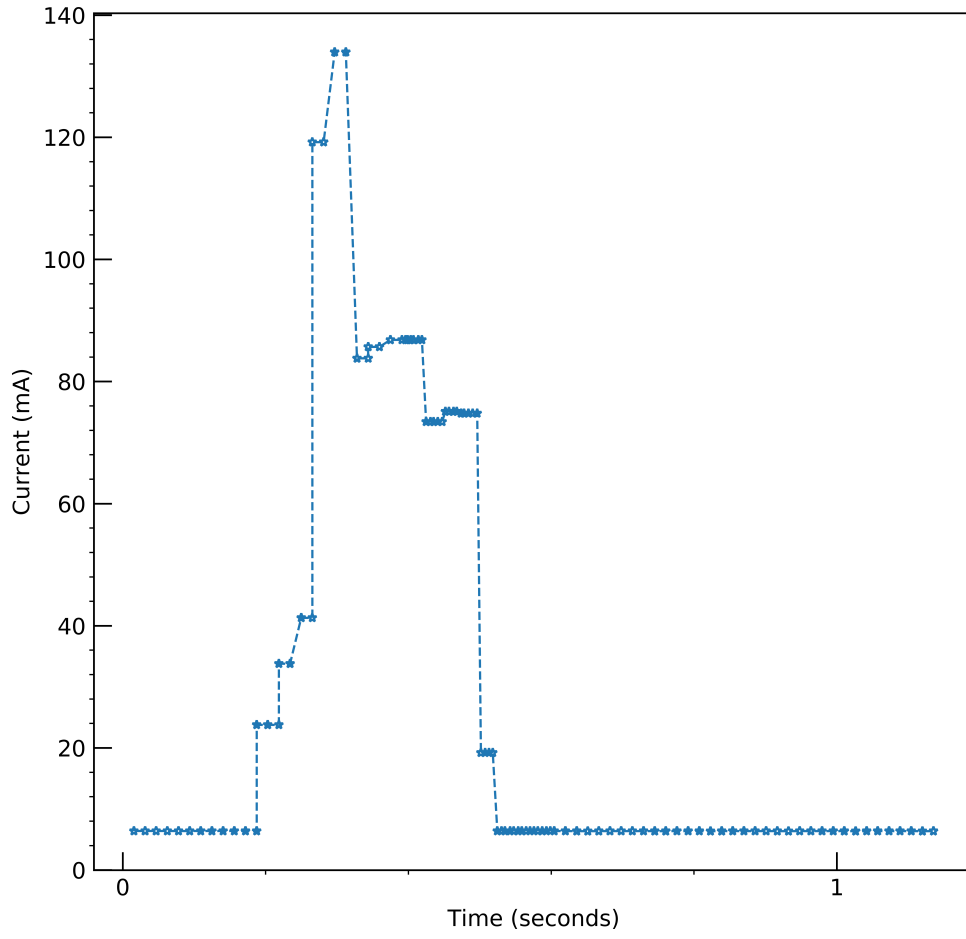
Her bir sensör kanalı için varsayılan giriş voltajı, Vin'in toprak pinine bağlanmasıyla ölçülmüştür. Voltaj değerlerinin sabit bir hata payıyla değiştiği dolayısıyla ölçümü etkilemediği görülmüştür (± 2 mV). Donanımın ağırlığı, kapladığı alan gibi fiziksel ölçüleri ölçülmüştür. Sonuçlar tablolar ve resimler halinde toplanmıştır. Sistemin kablosuz sensör ağı başarımını ortaya çıkartmak için gereken yazılım ve donanım testleri yapılmıştır. Gerçek dünya uygulamalarında çalışabilmesi amacıyla platformda kullanılan bütün elektronik birleşenler -40 ile 100 °C arası sıcaklıklarda çalışabilen modellerden seçilmiştir.

4.1.1 Harcanan Enerjinin Ölçümü

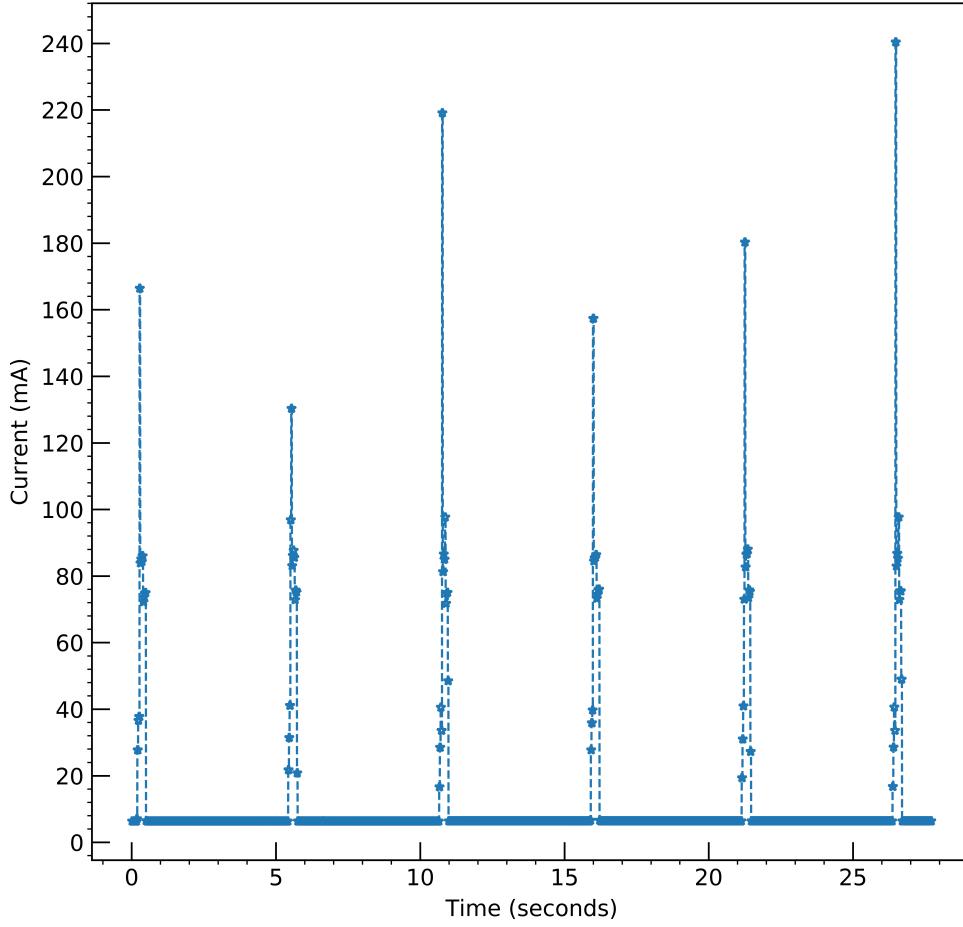
Sistemin temel algoritmasını koşturma sırasındaki harcadığı enerji ölçülmüştür. Enerji ölçümleri, IDM-8341 (RS PRO) [118], USB bağlantılı masaüstü multimetre ile akım ölçülerek yapılmıştır. Bu ölçümü gerçekleştirebilmek için cihaz bilgisayara bağlanmış ve Python programlama dili üzerinde "serial", "matplotlib" [119] ve "scipy" [120] kütüphaneleri kullanılarak mini bir program yapılmıştır. Programın kodları ek B.1'de verilmiştir, [121–123].

Öncelikli olarak ESP-12S IoT modülünün ilk açılışta, ilk Wi-Fi'ye bağlandığı anda ve veri gönderip derin uykuya geçtiği sürecin akım tüketimi grafiğe dökülmüştür. Bu süreç bir test algoritması olarak yazılmış ve IoT kartına programlanmıştır. Test kodları ek B.2'de verilmiştir. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi modül, uyanma, Wi-Fi ağına bağlanma ve veri gönderip tekrar derin uykuya geçme işlemini 0.5 saniyeden daha kısa bir sürede tamamlamaktadır. Daha sonra bu test, 5 saniye derin uyku aralıklarıyla toplamda 30 saniye boyunca tekrarlanmıştır. Şekil 4.2'de grafikte gösterildiği gibi, her bir döngüde modül, 0.5 saniyenin altında işlemleri tamamlayıp derin uykuya geçmiştir. Bu test yapılırken modül ile ana istasyon arasında 5 metre mesafe bırakılmıştır. Mesafe testleri yapılmamıştır ancak mesafe artarsa çekilen akımın değişmeyeceği

bilinmektedir.



Şekil 4.1 ESP-12S IoT modülünün harcadığı akım-zaman grafiği



Şekil 4.2 ESP-12S IoT modülünün 5 saniye aralıklarla harcadığı akım-zaman grafiği

Tablo 4.1’de ölçülen tüm parametreler gösterilmiştir. Modülün derin uykuda harcadığı akım 6 mA olarak ölçülmüştür. Bu, ultra düşük enerji hedefi için uygun olmasa da, düşük enerji tüketimi ve uzun süreli pil ömrü hedefleri için uygun bir değerdir. Fakat bu yüksekliğin sebebi modül üzerindeki dahili gösterge LED ışığı ve yine üzerinde var olan harici programlama entegre devresidir [124]. Bu iki element de sistemin çalışması için şart değildir ve isteğe bağlı olarak çıkartılabilir. Ancak böylece ESP-12S modülünün veri sayfasında yazdığı gibi 20 μ A gibi küçük değerlere ulaşmak mümkündür [111].

Ölçülen ortalama çalışma ve derin uyku akımları dikkate alınarak dört kanalın da aktif olarak kullanıldığı bir aylık bir ölçüm çalışmasında, sistemin bir veriyi göndermesi için ağa bağlanması, gönderme işlemi ve yeniden derin uykuya geçme süresi dahil en kötü ihtimalle iki saniye geçtiği düşünülürse, ortalama çalışma akımı ESP-12S’li Wemos

D1 Mini için 60 mAh ve 4 kanallı sistem için $12 \times 4 + 1$ mAh olarak alınırsa eşitlik 4.1'e göre 43.6 mAh güç aktarıma harcanmaktadır. Bu sırada derin uykuya harcanan akım ise saatlik 6 mA olarak alınırsa, $24 \text{ saat} \times 30 \text{ gün} \times 6 \text{ mAh} = 4320 \text{ mAh}$ olarak hesaplanır. Böyle bir aylık bir ölçüm için toplam 4.4 Ah veya 22 Wh (watt-saat) (5 V potansiyelde) bir pil yeterli gelecektir. Bu değer düşük güç başarısını sağlamaktadır.

Bir ay süre içerisinde veri gönderme sırasındaki harcanan enerjinin, uykuda harcanan enerjinin yüzde biri kadar küçük olması, daha önce bahsedilen derin uykuda ultra güç tasarrufuna geçilmesinin öneminin altını çizmektedir. Ayrıca deneylerde kullanılan, günlük hayatta yaygın olarak kullanılan 10000 mAh yani 37 Wh mobil pil kutusuyla, $37 / 4.4 = 1.6$ işleminden hareketle, yaklaşık olarak 50 günlük ölçümün yapılabileceği ortaya çıkmıştır.

$$\frac{60 \text{ mAh} + 12 \times 4 \text{ mAh} + 1 \text{ mAh}}{60 \times 60 \text{ saniye}} \times 2 \text{ saniye} \times 30 \text{ gün} \times 24 \text{ saat} = 43.6 \text{ mAh} \quad (4.1)$$

Tezimizde savunduğumuz Wi-Fi modülünde derin uyku kullanma yönteminin düşük güç tüketimi hedefini sağlamada ZigBee ile yarıştığını destekleyen yayınlar da mevcuttur [125], [126].

Tablo 4.1 Donanımın tüm parametreleri

Özellik	Değer
Boyutlar	10x10 cm kare X-Y düzlemi, opsiyonel Z, bir katman 10 mm
Ağırlık	Her bir PCB 22 gram
Pil kapasitesi	Opsiyonel kapasitede mobil güç deposu, kullanılan 10000 mAh @ 3.7 V
IoT modül derin uyku akımı	6 mA
IoT modül ortalama akım	60 mA
IoT modül en yüksek akım	350 mA
LMP7721 çalışma akımı ve voltajı	1.3 mA, 1.8-5.5 V
LM4140-ACM çalışma akımı ve voltajı	<1 μ A, 1.8-5.5 V
ADS1115 çalışma akımı ve voltajı	<150 μ A, 2-5.5 V
Ölçülen 4 kanal kart çalışma akımı	12 mA
Kanalların varsayılan giriş voltaj değerleri	1024 $\pm$ 2 mV
Kanalların hassaslığı	0.076 mV

4.1.2 Ağ Kalitesi Testleri

RSSI, alınan sinyalin güç göstergesi manasında olan ve ağın bağlantı kalitesini gösteren bir parametredir. Kullandığımız ESP-12S modülü olan Wemos D1 mini'nin

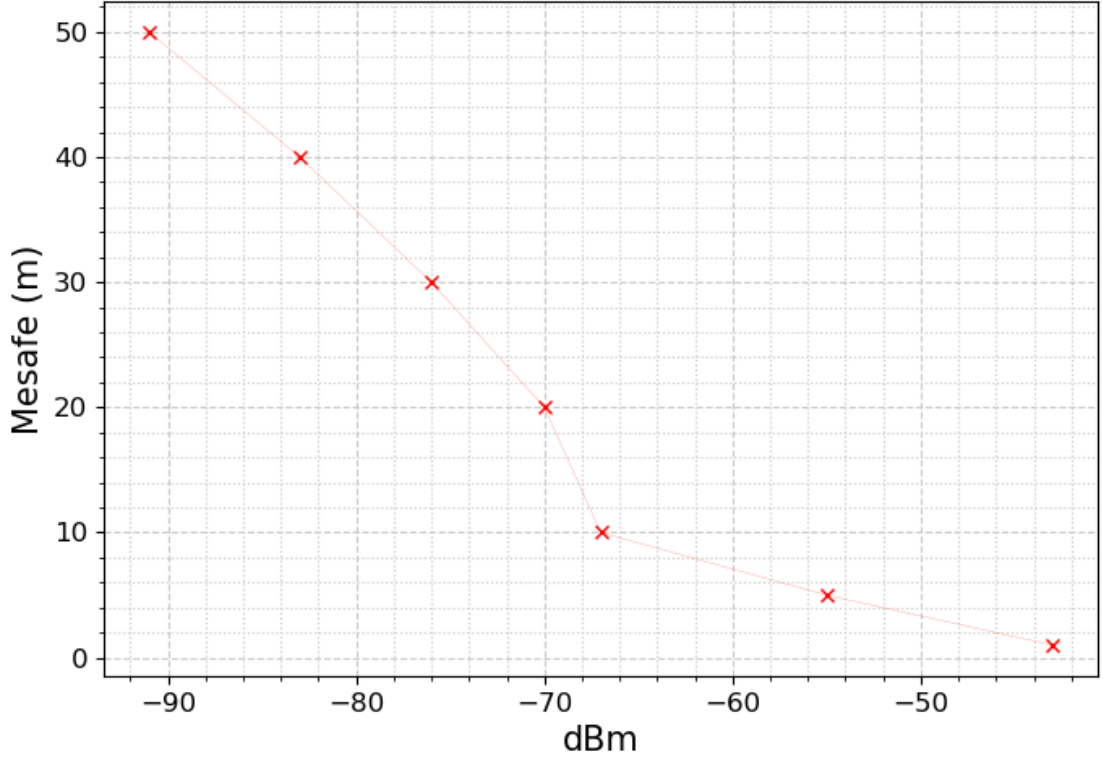
ana istasyona olan bağlantı kalitesini tespit için, menzillere göre RSSI ölçümü yapılmıştır. Yapılan testin kodları ek B.3'de verilmiştir. Genel mantık olarak, alıcı ile verici arasındaki mesafe arttıkça sinyalin gücü azalacaktır [127]. Ayrıca aradaki duvar gibi engellerin yanında sıcaklık ve nem gibi ortam şartları da RSSI değerlerini etkilemektedir. RSSI değeri -dBm birimiyle ifade edilmektedir. -dBm değeri sıfıra yaklaştıkça sinyalin kalitesi daha iyileşmekte, dolayısıyla aradaki mesafe de azalmaktadır. RSSI değerleri 1, 5, 10, 20, 30, 40 ve 50 metre mesafelerde, her defasında 5 ölçümün ortalaması olacak şekilde hesaplanmıştır [128], [129]. Şekil 4.3'de gösterildiği gibi ölçüm için modüle I2C girişi üzerinden bir OLED ekran takılmış ve programlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.4'de ve Tablo 4.2'de ilk 2 sütunda gösterilmiştir. Alınan sonucun literatürde aynı tip veya aynı aileden olan nesnelerin interneti kartlarıyla uyumlu olduğu görülmüştür. RSSI değerinin, -70 dBm seviyesinden düşük olduğu durumlarda bağlantı kalitesinin yetersizleşeceğinden bahsedilmektedir. -90 dBm'den itibaren ise bağlantının kopabileceği belirtilmiştir [130].



Şekil 4.3 OLED ekranda RSSI sonuçları

IoT modülüne programladığımız yazılım daha önce bahsedildiği gibi bağlantı kopma durumlarında yeniden bağlanma özelliğine sahiptir. RSSI testinde olduğu gibi açık görüş alanında, modülün gücü rastgele bir zamanda kesilip yeniden bağlanarak, ne kadar sürede ağıya yeniden dahil olabildiği ek B.4'de verilen kod ile test edilmiştir. Süre-mesafe verileri de Tablo 4.2'de 4. sütunda gösterilmiştir. Modülün derin uykudan çıkıp yeniden başladıktan sonra ağıya yeniden dahil olma süresinin mesafeye göre çok değişmediği tespit edilmiştir. Dolayısıyla çok hızlı bir şekilde bağlandığı tespit edilmiştir.

ICMP, internet kontrol mesaj protokolü, OSI'nin 2. katmanında yer alan tanı ve kontrol protokolüdür ve IP adresi operasyonlarını yürütmektedir. Bir kablosuz ağın kalitesini



Şekil 4.4 Mesafe-RSSI grafiği

test etmek için yaygın olarak kullanılan yöntem ICMP paketleri üzerinden soru-cevap şeklinde haberleşme yaparak süreleri ölçme üzerine dayanmaktadır. Ağa bağlı her hangi bir cihaza "ping" komutuyla bu gecikme testi yapılabilmektedir.

Ping sorgusu sonucunda "RTT", "round-trip time", gidiş-geliş zamanı veya gecikmesi denilen, ICMP paketinin çıktığı noktadan hedefine gidip tekrar geri gelmesine kadar geçen süreyi ifade eden milisaniyeler düzeyindeki bir parametre ölçülmektedir. Ayrıca gönderilen verinin ne kadarının başarılı bir şekilde hedefe ulaştığını yani ağın verileri kaybetmeden taşıyabilme başarısını gösteren "packet-loss", paket-kaybı değeri de ping sonucunda ortaya çıkmaktadır. Paket kaybının yüzde sıfır olması idealdir [131–134]. Test sonucunda minimum gecikme süresi, ortalama gecikme süresi, ve paket kaybı olarak ölçülmüştür ve yine Tablo 4.2’de 3. sütunda ortalama gecikme süreleri gösterilmiştir.

Ping ölçümü ESP8266-ping kütüphanesiyle yapılmıştır [135]. Kod içerisine hızlı kontrolü sağlama amacıyla RSSI gösterme komutları da eklenmiştir. Sonuçlar UART arayüzü üzerinden cep telefonuna aktarılaraq elde edilmiştir ve 30 metre mesafedeyken alınan sonuç ekranı örnek olarak Şekil 4.5’de gösterilmiştir.


```

16:05:00.149 Pinging default gateway with IP 192.168.1.1
16:05:00.149 Reply from 192.168.1.1: bytes=32 time=2ms TTL=64
16:05:00.149 -76
16:05:01.101 Reply from 192.168.1.1: bytes=32 time=1ms TTL=64
16:05:01.101 -77
16:05:02.103 Reply from 192.168.1.1: bytes=32 time=2ms TTL=64
16:05:02.103 -76
16:05:03.104 Reply from 192.168.1.1: bytes=32 time=1ms TTL=64
16:05:03.104 -78
16:05:04.308 Ping statistics for 192.168.1.1:
16:05:04.308    Packets: Sent = 4, Received = 4, Lost = 0 (0.00% loss),
16:05:04.308    Approximate round trip times in milli-seconds:
16:05:04.308    Minimum = 1ms, Maximum = 2ms, Average = 1.50ms
16:05:04.308 Destination host unreachable

```

Şekil 4.5 20 metre mesafeden örnek ping/ RTT testi sonuçları

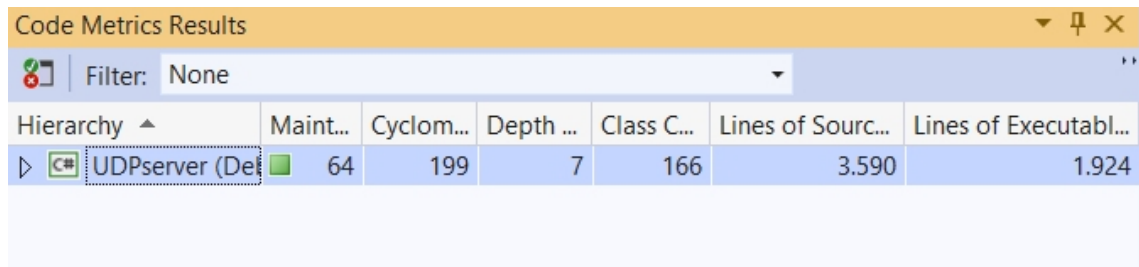
Tablo 4.2 Mesafe bağlantı kalitesi testi sonuçları

Mesafe (m)	RSSI (dBm)	Ortalama RTT (ms), Paket kaybı %	Yeniden Bağlanma
1	-43	1.75 , %0	<0.5 s
5	-55	2 , %0	<0.5 s
10	-67	1.75 , %0	<0.5 s
20	-70	2,0 , %0	<1 s
30	-76	2.75,0 , %0	<1 s
40	-83	5.75 , %0	<1.5 s
50	-91	7.5,0 , %0	<1.5 s

4.1.3 Arayüz Yazılımı

Yazılım Microsoft Visual Studio ortamında geliştirilmiştir. Bu IDE, programın derlenmesi ve hata ayıklama (debugging) işlemleri sırasında ayrıntılı olarak kullanılan işlemci ve RAM kaynakları tüketimini göstermektedir. Ayrıca iki kod bloğu arasında

geçen zamanı da görmek mümkündür. Yazılım geliştirme ortamında yer alan "calculate code metrics" aracıyla yazılımın çeşitli açılardan başarısı ölçülmüştür. Sonuçların ekran görüntüsü Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Hierarchy ▲	Maint...	Cyclom...	Depth ...	Class C...	Lines of Sourc...	Lines of Executabl...
▶ C# UDPserver (De	64	199	7	166	3.590	1.924

Şekil 4.6 Yazılım analizleri

Sonuçların soldan sağa birincisi olan "Maintainability Index" yani bakım dizini, yazılımdaki kodların sürekli geliştirme yani ileriye yönelik geliştirmeler için ne kadar kolay okunabilir olduğunu ifade etmektedir. Bu dizin 0 ile 100 arasında değer almaktadır. 20-100 arasındaki bölge iyi sayılmakta ve yeşil renk koduyla ifade edilmektedir. Yazılımın bakım dizini %68 çıkmıştır ve iyi bir değer olup yeşil bölgededir [136].

"Cyclomatic Complexity" veya döngüsel karmaşıklık, yazılımın ne kadar karmaşık olduğunun bir ölçüsüdür. Bu sayı ne kadar büyükse programın sağlığının korunması için daha çok geliştirme ve test süreçlerinden geçmesi gerektiği ve dolayısıyla geçtiği ortaya çıkmaktadır. Değer olarak 20'nin üstünde çıkması kompleks, 50'nin üstüne çıkması ise çok kompleks sınıfına dahildir. Yazılımın döngüsel karmaşıklık testi 199 çıkmıştır ve böylece çok yüksek karmaşıklığa sahip olduğu anlaşılmaktadır. [137], [138].

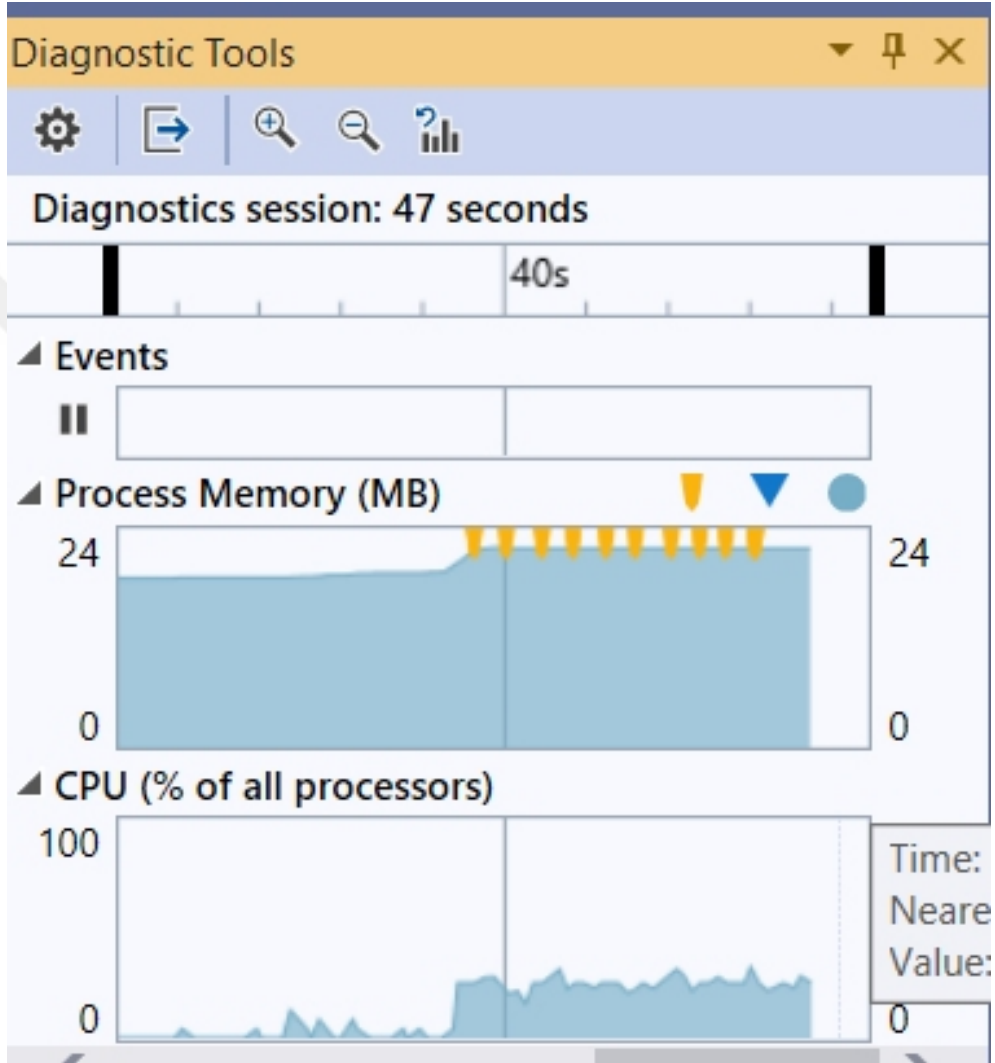
"Depth of Inheritance", devralma derinliği, yazılım kodlarındaki sınıflar arasında devir alınan değerlerin sayısını yani kaç farklı sınıfın birbirine bağlı olarak çalıştırıldığını gösteren bir ölçüdür. Bu değer düşük olması yazılımın daha problemsiz çalışması için gereklidir. Test sonucunda yazılımımız 7 devralma derinliğine sahip çıkmıştır. Bir Windows Forms uygulaması için bu, düşük ve makul bir değerdir [137], [138].

"Class Coupling" veya sınıf kavrama değeri, yazılımın genelinde yer alan çeşitli tipden tüm parametreler için bunlara hükmeden sınıfların birbirleriyle olan ilişkisinin toplam değeridir. Bu değer yüksek olması yazılımın idaresini zorlaştırmaktadır. Yazılım testimizin sonucunda bu değer 166 çıkmıştır ve yüksektir [137], [138].

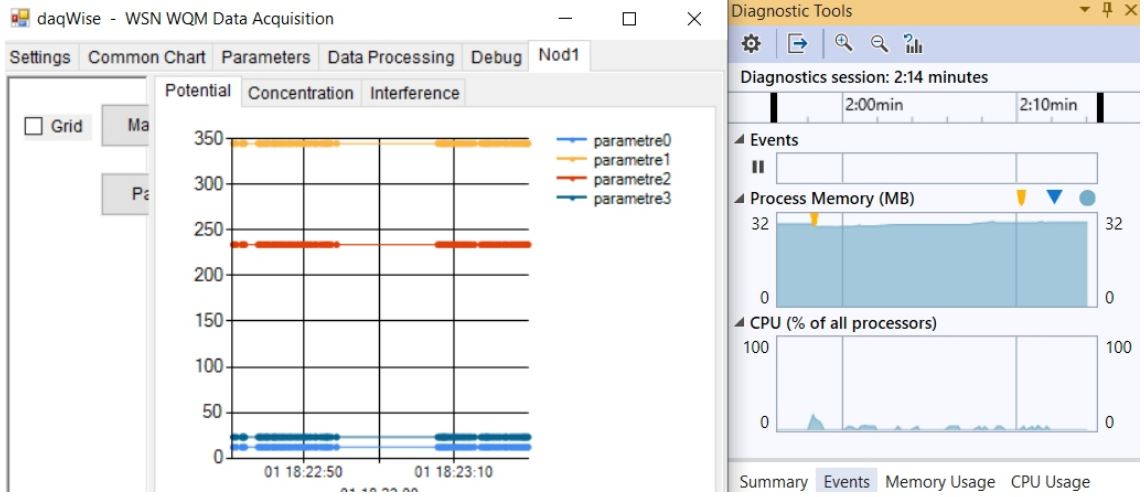
Toplan kod ve toplam uygulanan kod sayısı, sırasıyla yazılımdaki tüm kodları ve yazılımdaki çalışabilen kod sayılarını göstermektedir. Yazılımımız toplam 3590 satır koda ve 1924 toplam uygulanabilir koda sahiptir. Bu da 11 punto kolay okuma fontu

formatında yaklaşık olarak 112 sayfa A4 çıktısı demektir.

Yazılım çalışma sırasında boştayken %1'den düşük işlemci ve yaklaşık olarak 9 MB RAM bellek tüketmektedir. Şekil 4.7'de gösterildiği gibi düğüm tarama algoritması sırasında işlemci kapasitesi tüketimi %25'e, RAM ise 100 MB'a ulaşmaktadır (ortalama 30 MB). Şekil 4.8' de gösterildiği gibi düğümler eklendikten sonra ise işlemci tüketimi yeniden ortalama olarak %1'in altına inmektedir.



Şekil 4.7 Düğüm tarama sırasında harcanan kaynaklar

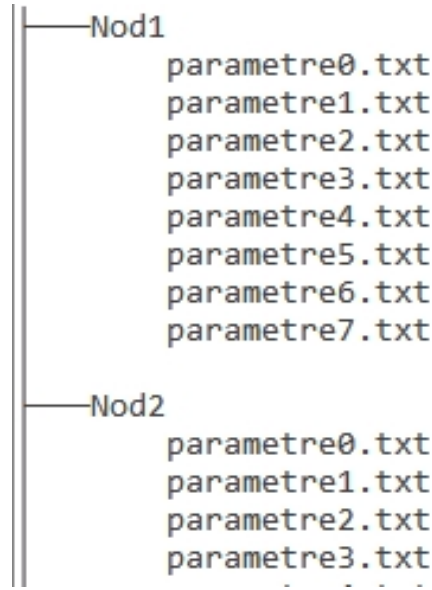


Şekil 4.8 Veri alma sırasında harcanan kaynaklar

RAM tüketimi ise toplanan verinin büyüklüğü ve ölçüm süresine bağlı olarak 25 MB'dan başlayarak GB'lar seviyesine çıkabilmektedir. Tüm bu değerler gayet düşüktür ve aynı zamanda yazılımında aşırı işlemci veya RAM tüketimine sebep olacak bir sızıntı olmadığını göstermektedir.

4.1.4 Verilerin Arşivlenmesi

Yazılım sensör düğümlerinden gelen verileri ayrı klasörlerde, her bir sensör için ayrı bir dosya olarak kaydetmektedir. Örnek bir veri kayıt ağacı Şekil 4.9 'da verilmiştir. Ayrı ayrı kaydetme sayesinde veri düzenleme ve sonradan okuma kolaylığı sağlanmıştır. Her bir sensör verisi seçenekli olarak ".txt" veya ".csv" uzantısıyla kayıt edilmektedir. Veri formatı bir satırda sırasıyla: mV cinsinden potansiyel, bir boşluk karakteri " " ve 10^{-15} x saniye cinsinden zaman şeklindedir. Her bir nokta arasında yeni satır karakteri vardır.

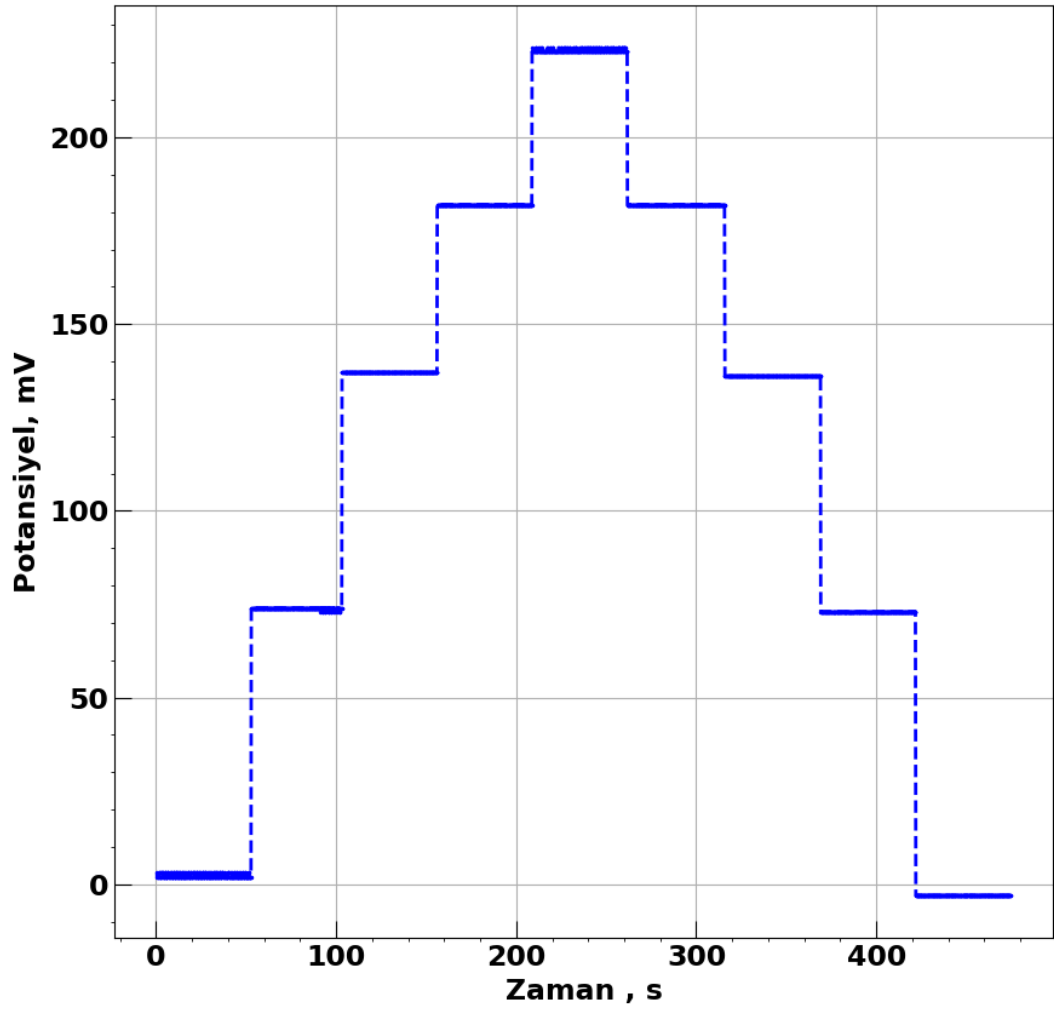


Şekil 4.9 Yazılımın düğüm ve sensör verileri arşivleme şeması

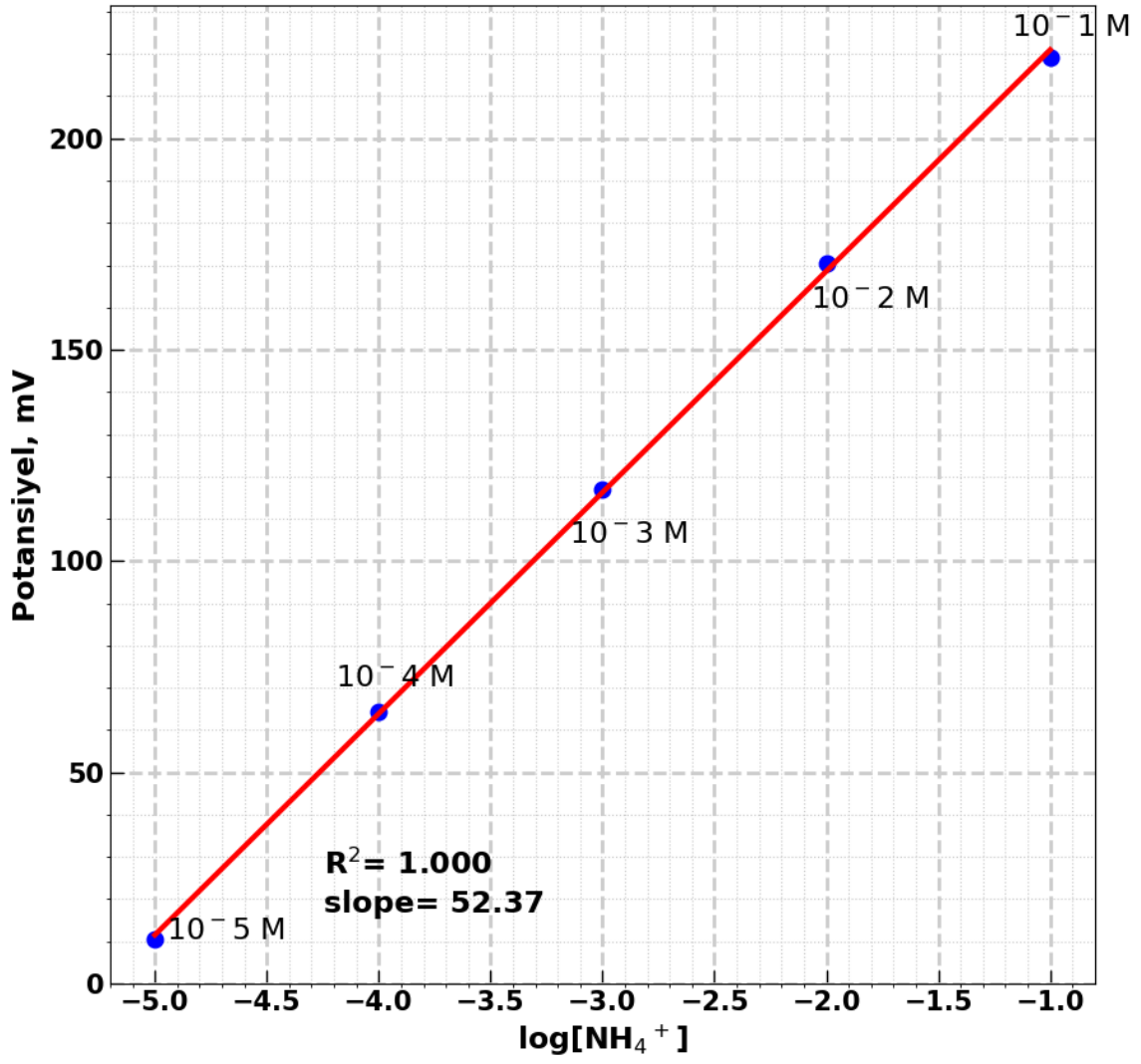
Örnek bir veri satırı "1102 0,20318603515625CRLF" şeklindedir. Burada her bir karakter bir bayt yer kaplamaktadır ve dolayısıyla bu veri 22 bayt yer kaplamaktadır. Buradan yola çıkılarak örnek olarak bir sensörden 1 dakika aralıklarla 1 ay boyunca ölçüm yapılması durumunda, $30 \text{ gün} \times 24 \text{ saat} \times 60 \text{ dakika} \times 22 \text{ byte} = 928.126$ kilobayt alan gerekli olacaktır. Yine örnek bir çalışmada, 10 tane sensör düğümü ve her bir düğümde 4 iyon seçici elektrot olduğu düşünülürse, 1 dakika aralıkla 1 ay boyunca ölçüm yapılması durumunda verilerin saklanması için $928.126 \times 40 = 36.25$ megabayt hafıza gerektirecek ve deney sonucunda 40 adet veri dosyası oluşacaktır.

4.1.5 İyon Seçici Elektrot Testleri

Amonyum sensörünün her çözelti içerisinde sensörü daldırdıktan sonra birer dakika bekletilerek yapılan basamaklı testleri sonucu Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Her bir basamak soldan sağa sırasıyla 10^{-5} , 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} , 10^{-1} molar çözeltilere karşılık gelmektedir. Buradan elde edilen basamakların ortalaması alınmış ve Nernst denkleminde $-\log(C)$ parametresinde, C değerlerine karşılık gelen molar cinsinden değerleri girildikten sonra elde edilen noktaların kalibrasyonu sonucu Şekil 4.11'de gösterilmiştir.

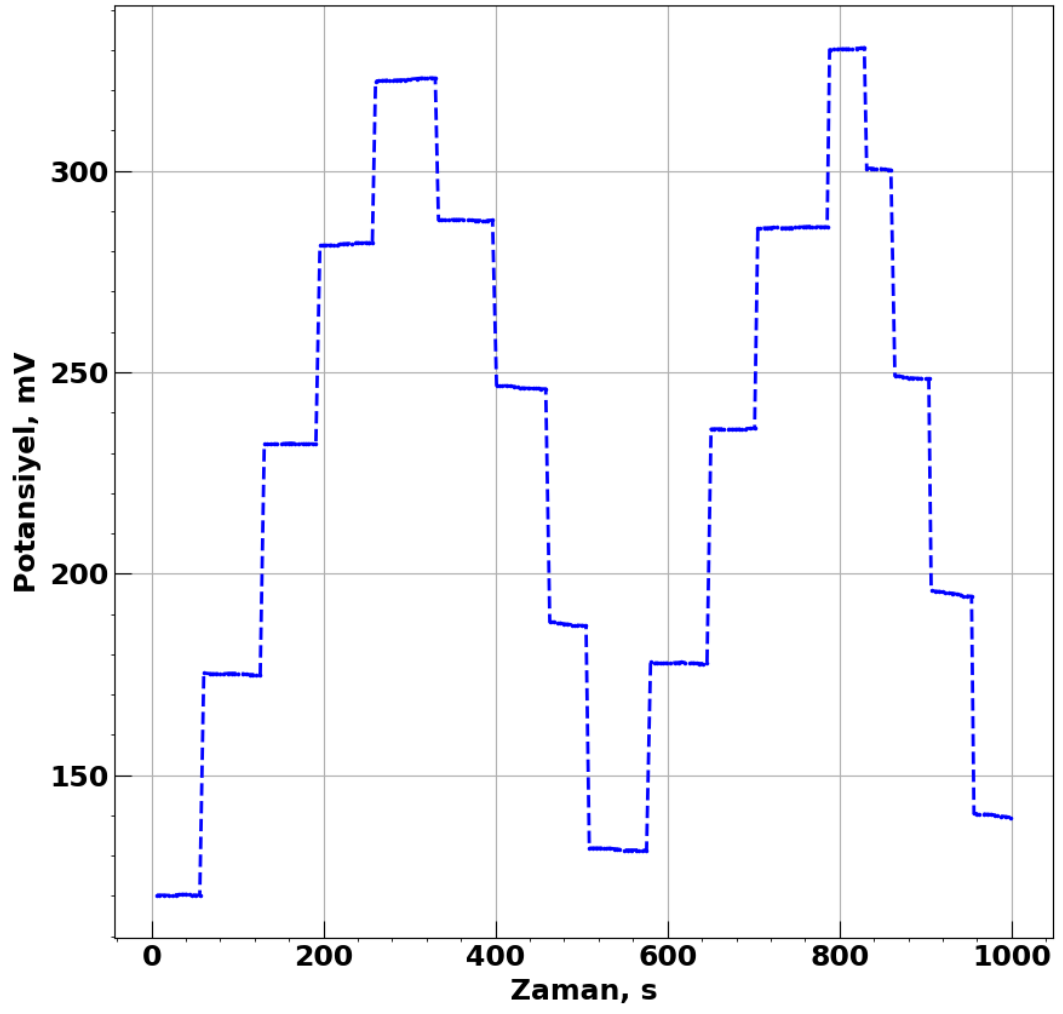


Şekil 4.10 Amonyum basamaklı ölçümleri

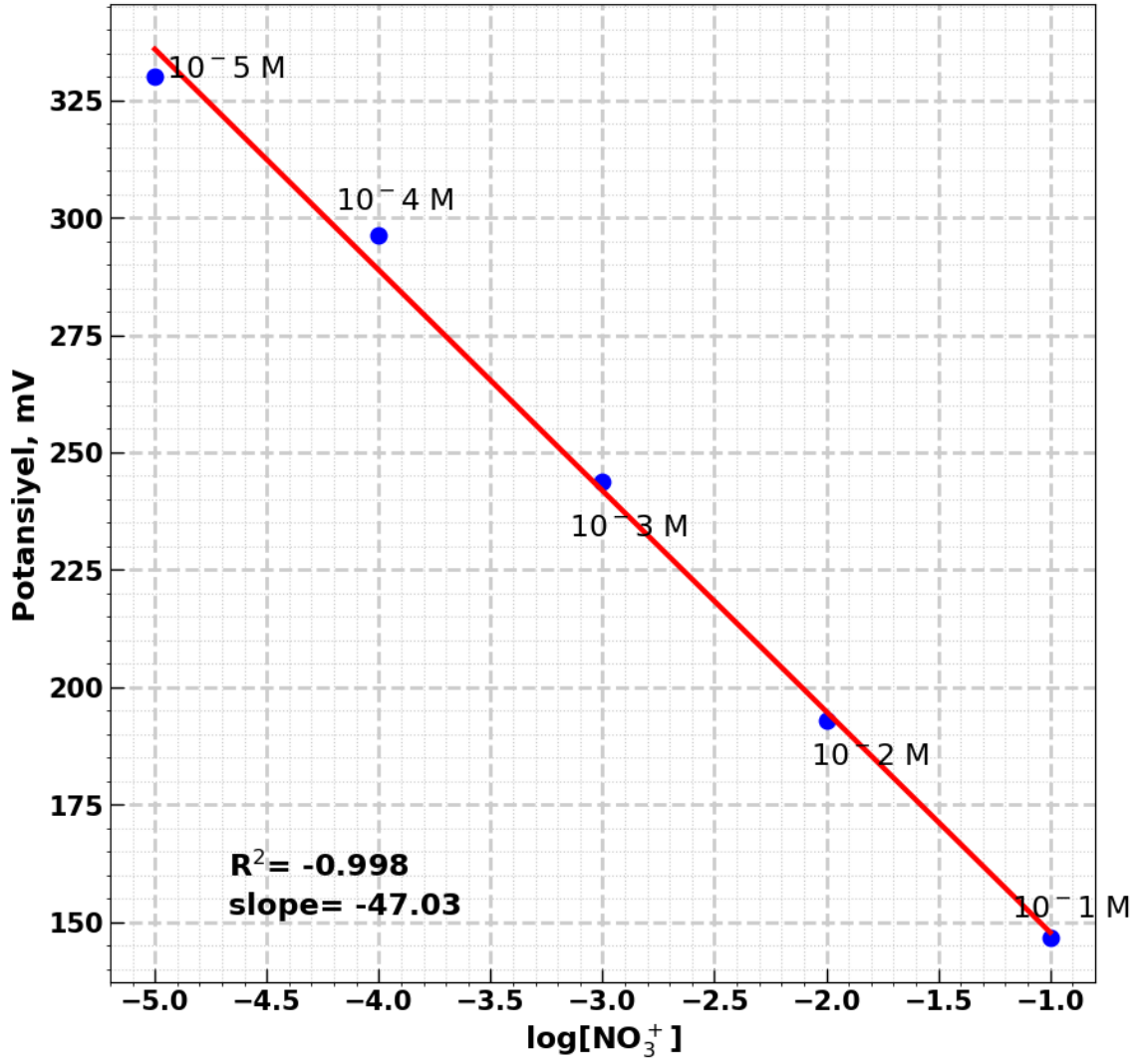


Şekil 4.11 Amonyum sensörü ortalama kalibrasyon grafiği

Nitrat sensörünün birer dakika beklenerek yapılan basamak testleri sonucu Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Yapılan kalibrasyon sonucu sensörün performansı ise Şekil 4.13’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12 Nitrat için basamaklı ölçümler grafiği



Şekil 4.13 Nitrat sensörü ortalama kalibrasyon grafiği

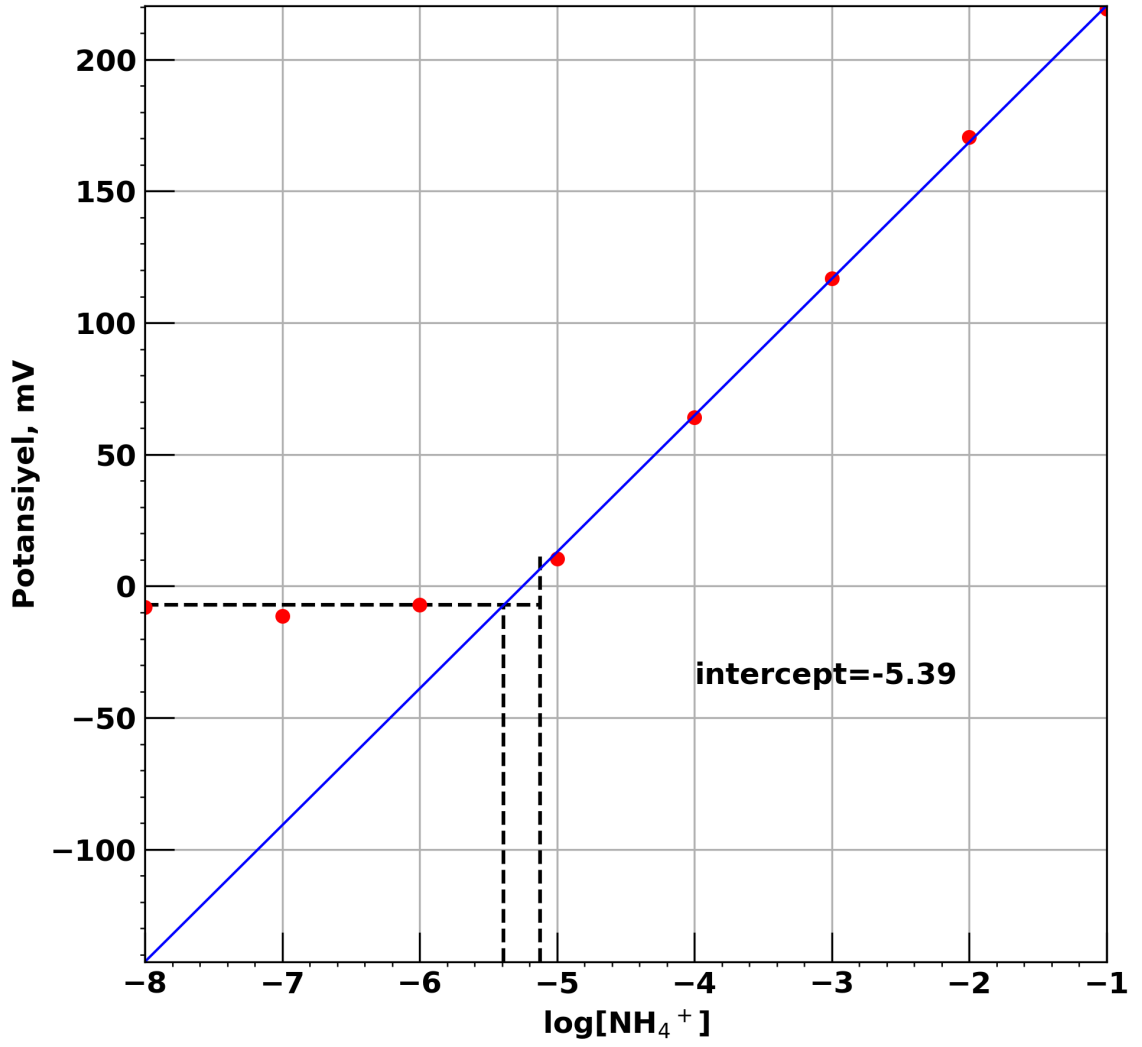
Tablo 4.3’de sensörlerin hesaplanan korelasyon kat sayısı ve eğim değerleri listelenmiştir. Amonyum ve nitrat elektrot için Python dilinde programlama yapılarak en küçük tayin limiti hesaplanmıştır. Gereken değerleri elde etmek amacıyla her iki elektrot için ayrı ayrı 8 tane çözeltide ölçüm yapılmıştır.

Tablo 4.3 Tüm sensörlerin hesaplanan kalibrasyon değerleri

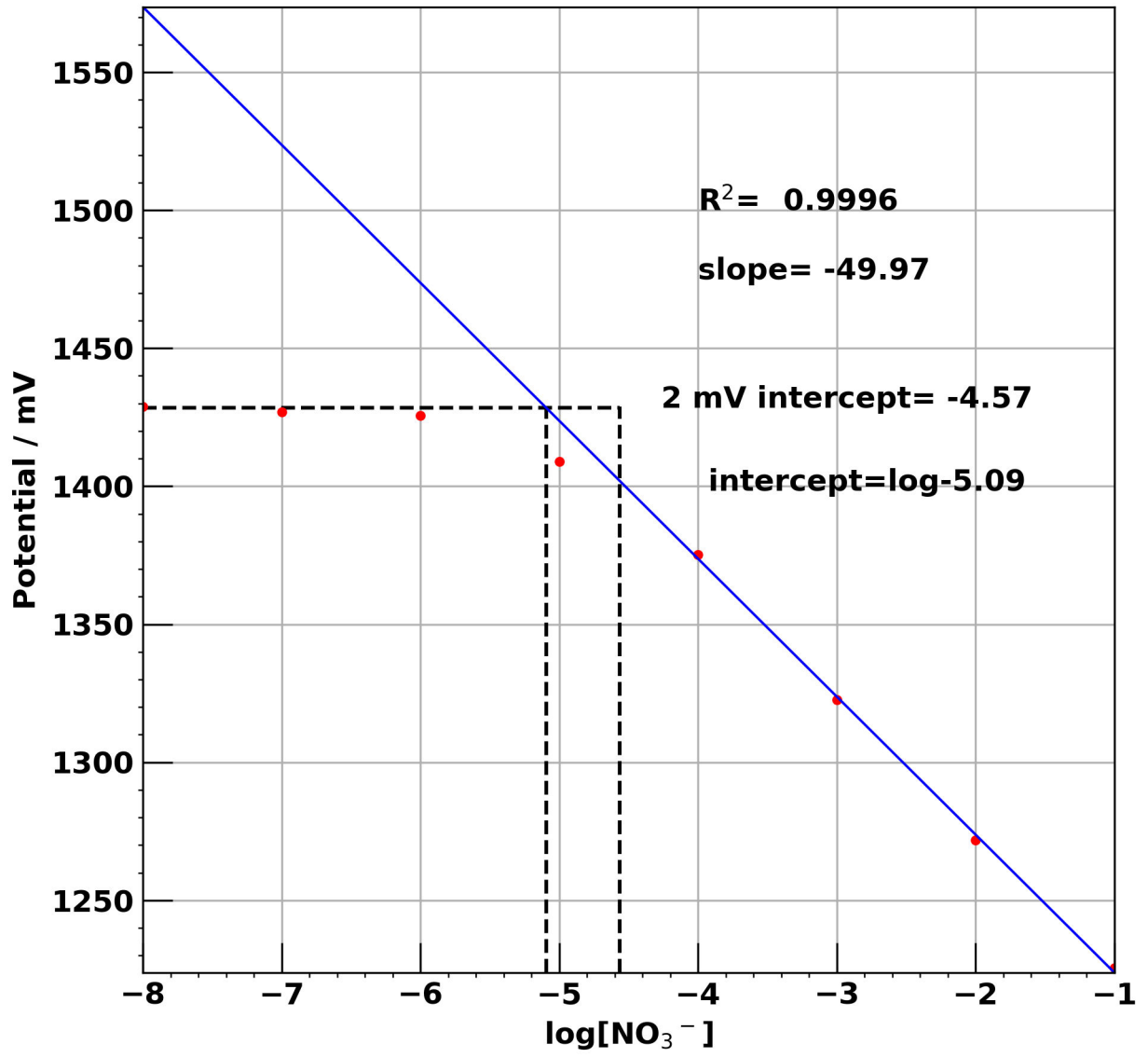
Sensör	R ²	Nernst eğrisi	Kesme değeri	EKTL
Nitrat	0.998	-47.03	100.73	10 ^{-5.09} molar
Amonyum	0.999	52.37	273.35	10 ^{-5.39} molar
Potasyum	0.994	34.24	258.71	
pH	0.996	51.24	395.42	

Hesaplamalar sonucunda Şekil 4.14’de gösterildiği gibi en küçük tayin limiti amonyum

için $10^{-5.39}$ molar, Şekil 4.15’de gösterildiği gibi nitrat için ise $10^{-5.09}$ molar olarak bulunmuştur.

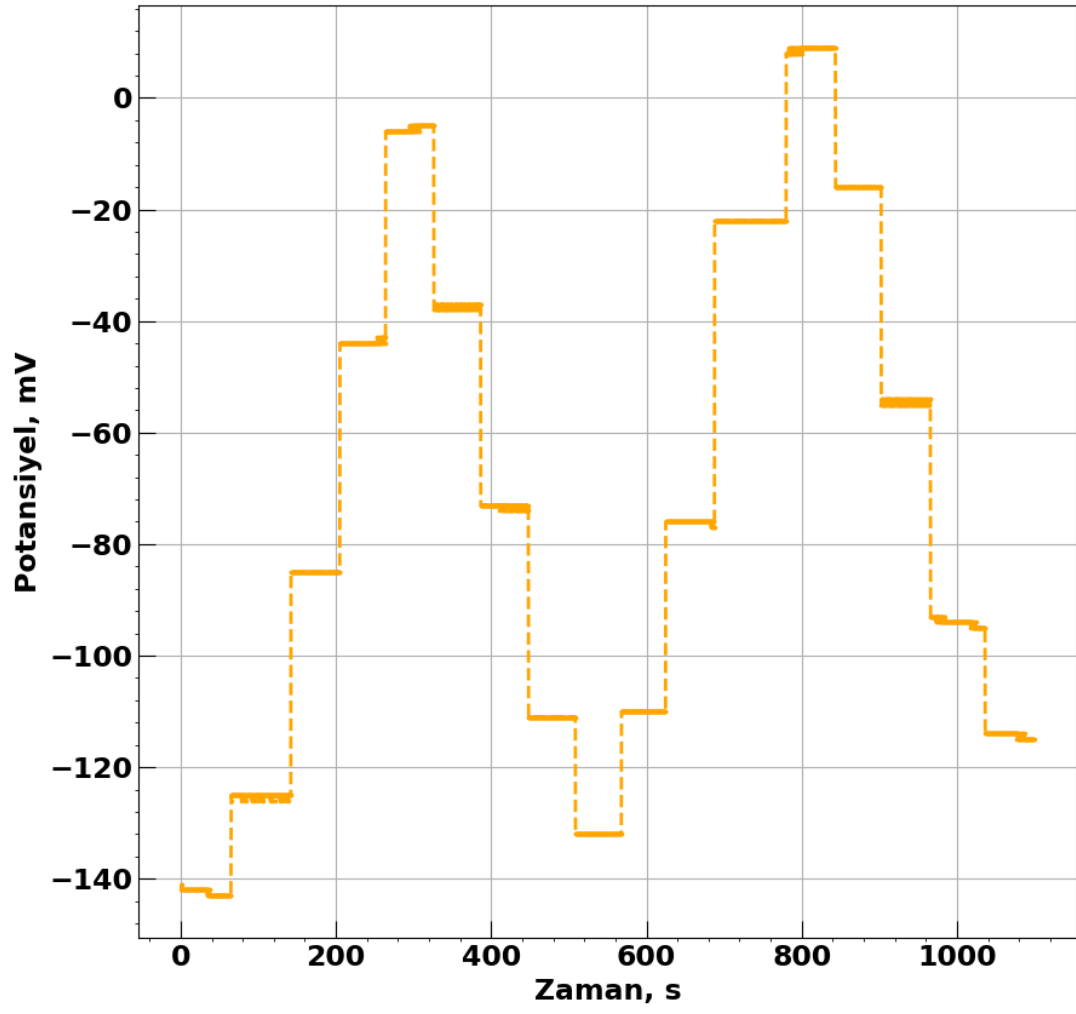


Şekil 4.14 Amonyum sensörün en küçük tayin limitinin bulunması

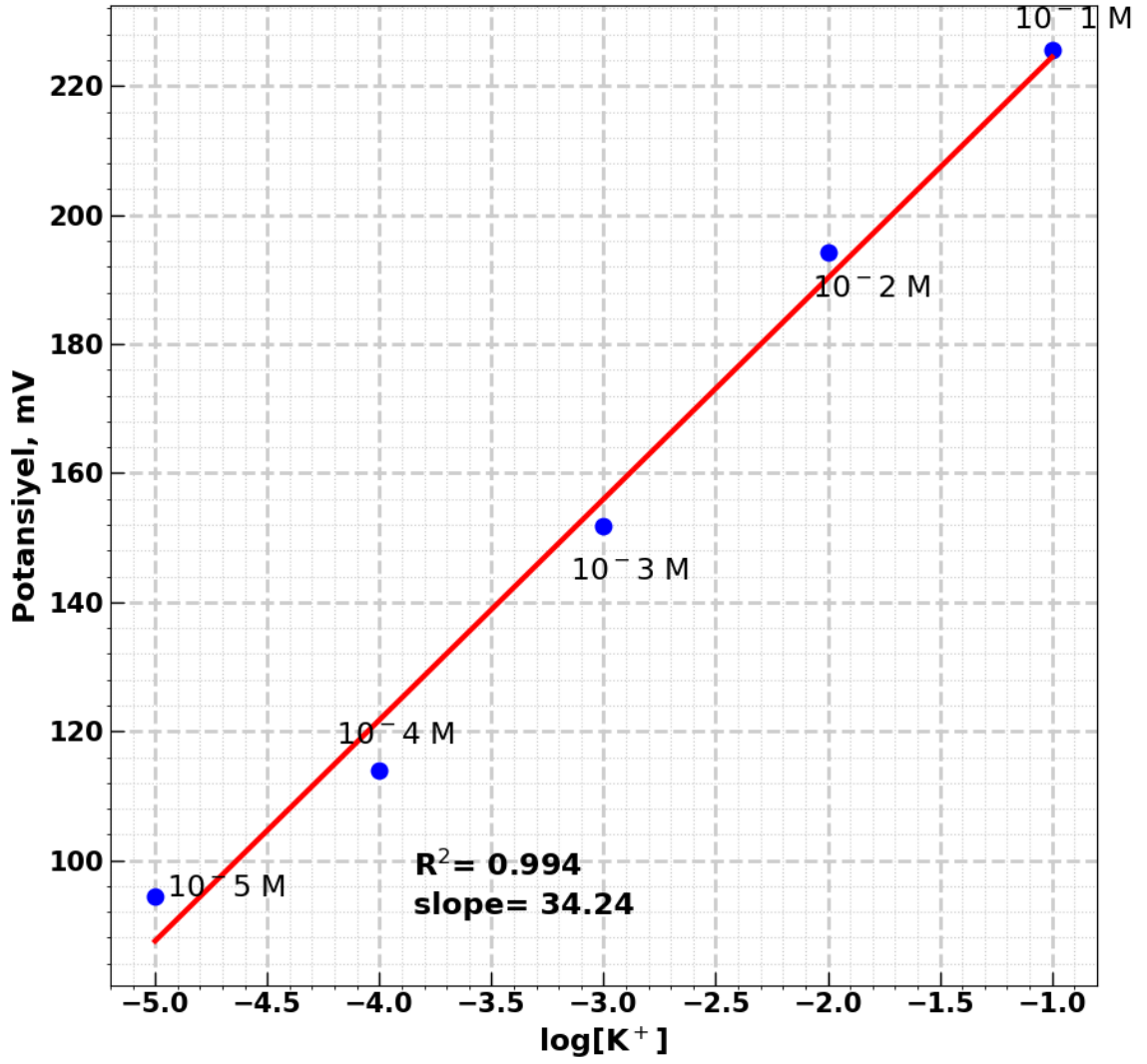


Şekil 4.15 Nitrat sensörün en küçük tayin limitinin bulunması

Potasyum sensörünün yaklaşık birer dakika beklenerek yapılan basamak testleri sonucu Şekil 4.16'de gösterilmiştir. Yapılan kalibrasyon sonucu sensörün performansı ise Şekil 4.17'da gösterilmiştir.



Şekil 4.16 Potasyum basamaklı ölçümleri grafiği



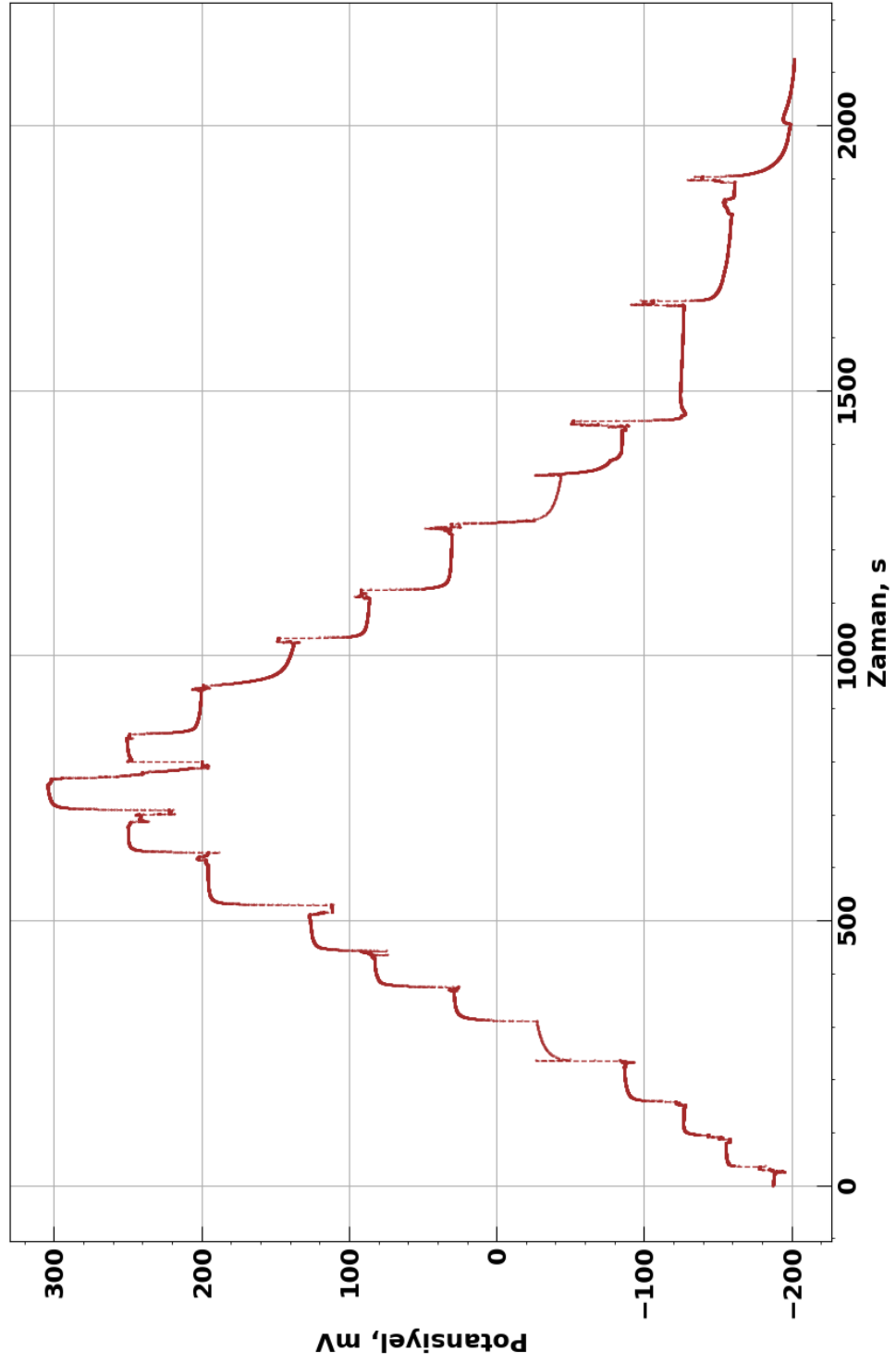
Şekil 4.17 Potasyum sensörü ortalama kalibrasyon grafiği

pH elektrotu, pH 2-12 arasında hazırlanan tampon çözeltilerde basamaklı bir şekilde ölçülmüştür. Ortaya çıkan pH-potansiyel grafiği Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Ardından bu verilerden yola çıkılarak kalibrasyon eğrisi hesaplanmış ve Şekil 4.19’da gösterilmiştir.

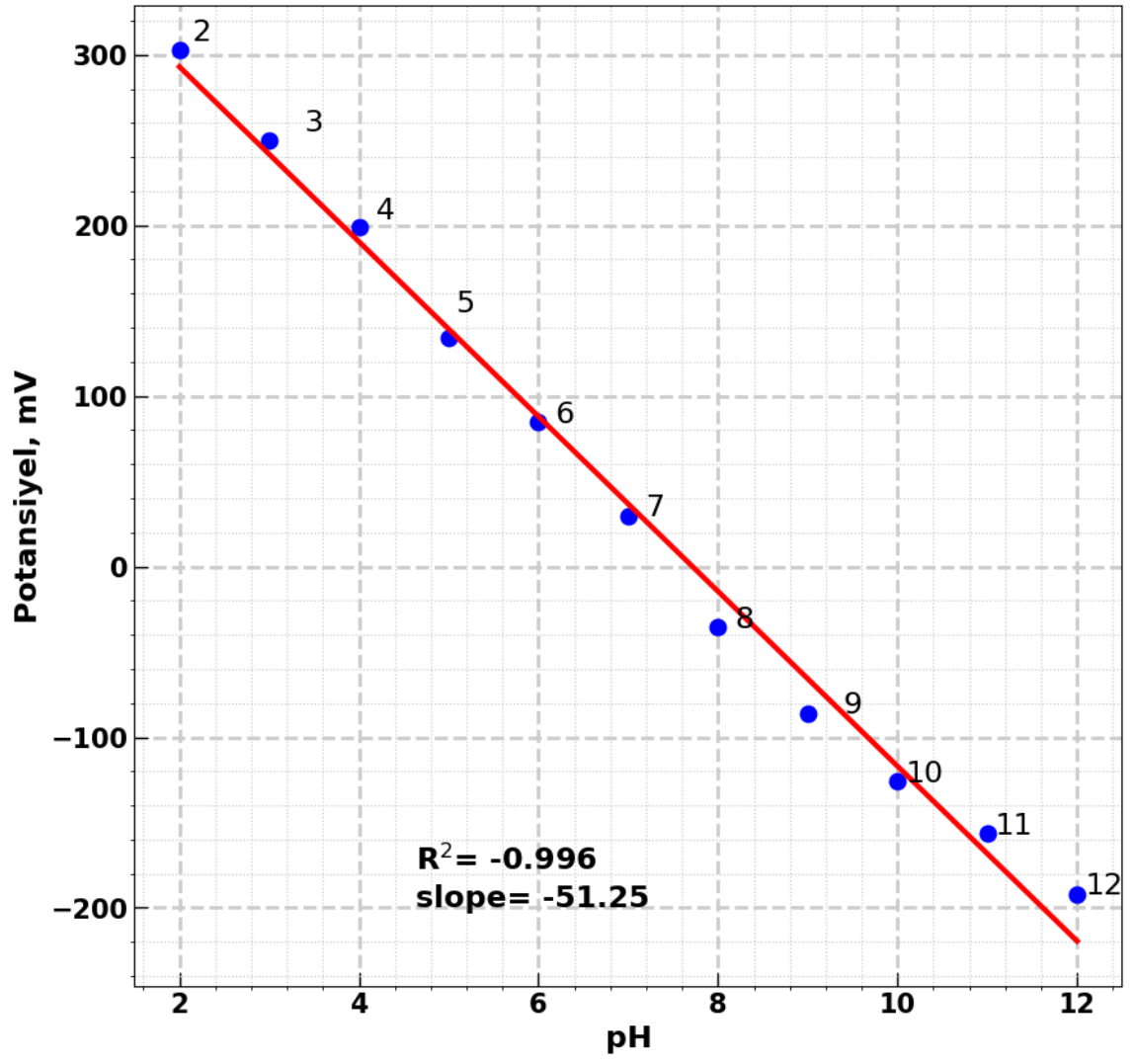
pH sensör için son olarak tekrarlama testleri yapılmıştır. Bu test basamaklı teste göre daha uzun sürelerde ve tekrarlarla pH 4, 7 ve 10 değerleri için yapılmıştır ve sonuçlar Şekil 4.20’de gösterilmiştir.

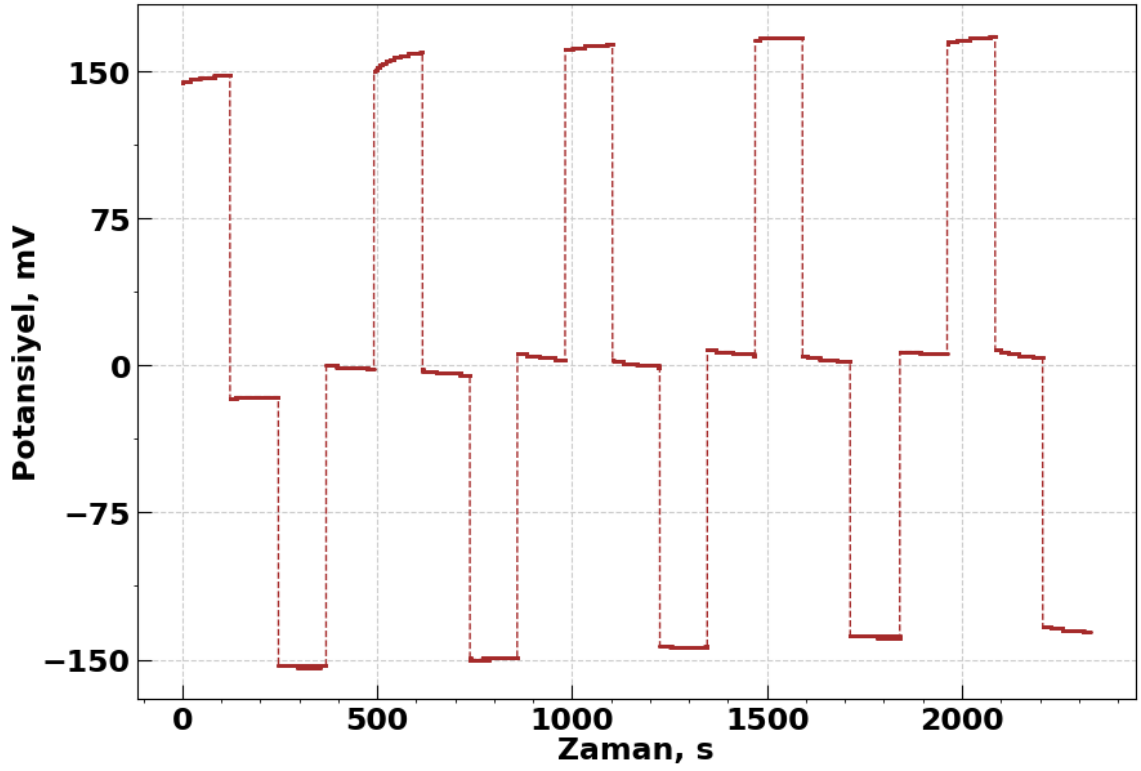
Nitrat, amonyum, pH ve potasyum elektrotları grafiklerde verildiği gibi kalibre edildikten sonra hazırlanan karışım çözeltilerde sensör dizisine konarak molar sıralı basamak testlerine tabi tutulmuştur. Bu amaçla KNO₃ ve NH₄Cl tuzlarının 10⁻¹ ve 10⁻⁵ molar arası çözeltileri hazırlanmıştır.

Çoklu sensör tutucuya ISE’ler ve referans elektrot yerleştirilmiştir ve ölçümler



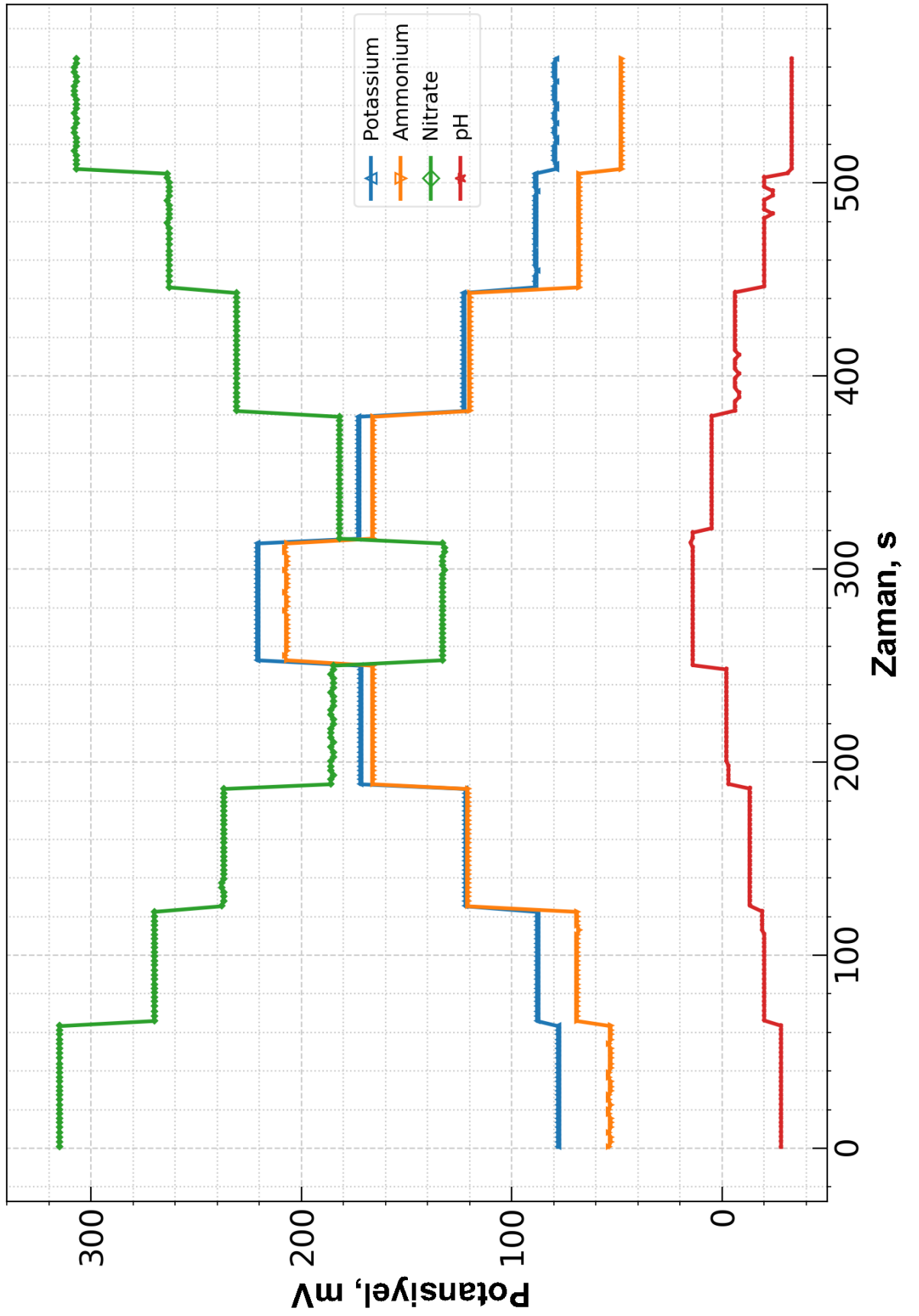
Şekil 4.18 pH sensör 2-12 pH aralığı basamaklı ölçümleri grafiği



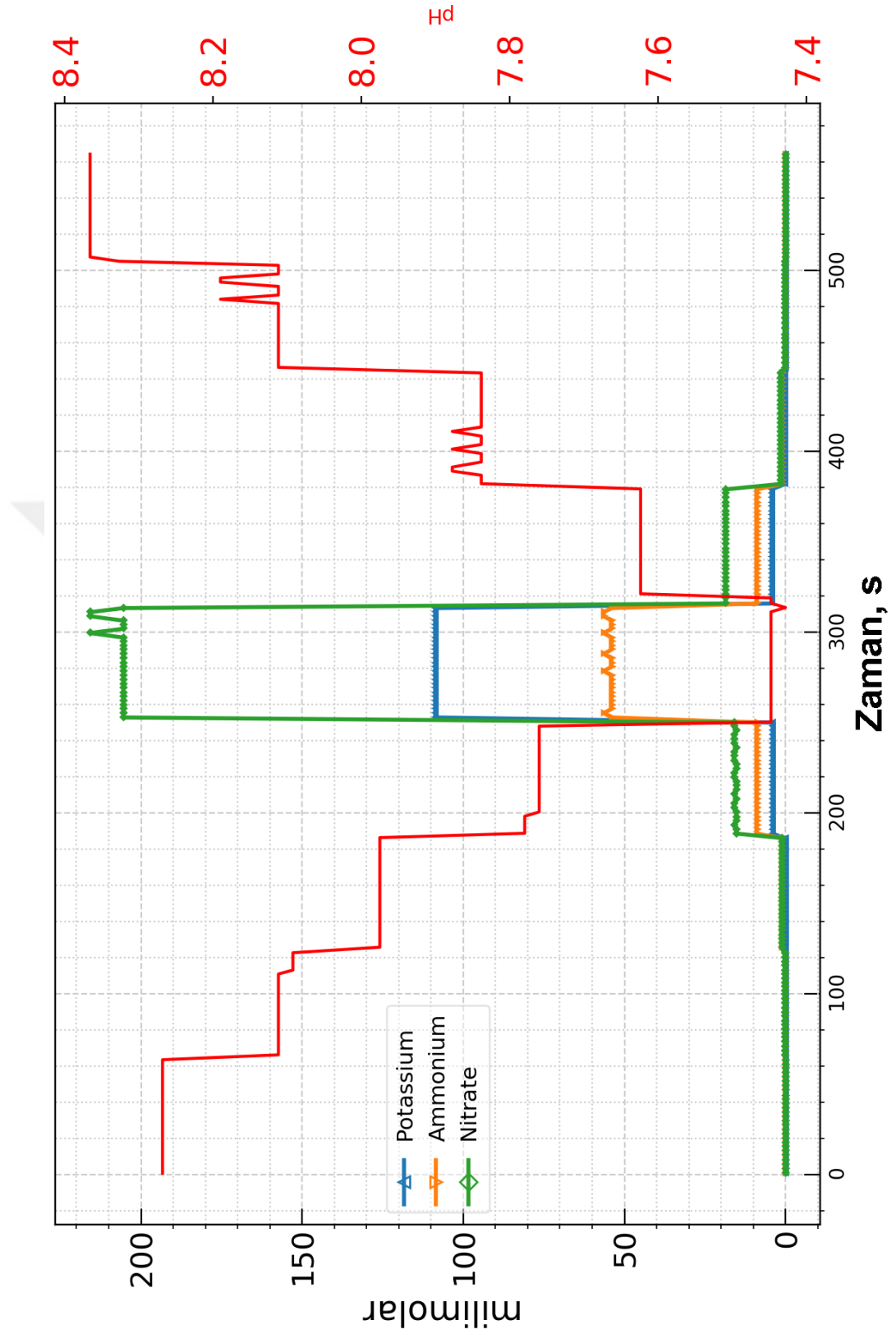


Şekil 4.20 pH sensörünün pH 4,7 ve 10 değerlerinde tekrar testleri grafiği

alınmıştır. Çözeltilerin pH değerleri ticari bir cam pH elektrotla (SenTix 41, WTW) ölçülmüştür, ilk çözeltinin pH değeri 8.4, son çözeltinin ise 7.4 olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.21’de bu ölçümün kalibrasyonsuz potansiyel mV cinsinden hali, Şekil 4.22’de ise her bir elektrot için kalibre edilmiş hali birleştirilerek tek grafikte gösterilmiştir. Burada birimler milimolar cinsinde verilmişken, pH sensörü sonuçları kırmızı çizgiyle sağ taraftaki 2. Y eksenini üzerinde gösterilmiştir (X eksenleri ortaktır).



Şekil 4.21 Çoklu sensör tutucuyla tüm sensörlerin birlikte testi potansiyel-zaman grafiği



Şekil 4.22 Çoklu sensör tutucuyla tüm sensörlerin birlikte testi milimolar, pH -zaman grafiği

4.1.6 Maliyet Analizi

Geliştirilen sistem düşük maliyet prensiplerine tamamen uymaktadır. Sistemi geliştirilmek için kullanılan tüm yazılım ve donanım geliştirme araçları açık kaynak olarak geliştirilen, ücretsiz kullanım lisanslarına sahip araçlardır. Elektronik donanımlarda kullanılan parçaların en önde gelen satıcılardaki farklılıklarıyla beraber güncel fiyatları Tablo 4.4’de verilmiştir [139], [140]. Düşük maliyetli olmasına rağmen yüksek performans oranını tutturmak aynı zamanda önde gelen bir mühendislik hedefidir. Yerli üretim ve araştırma geliştirmenin de ne kadar önemli olduğu, T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından yayınlanan bir raporda da vurgulandığı gibi çok iyi bilinmektedir [141].

Tablo 4.4 Kullanılan parçaların güncel fiyatları tablosu (2020)

Parça	Digikey fiyatı	Mouser fiyatı
LMP7721MA/NOPB	5.25 USD	4.46 euro
LM4140ACM-1.0/NOPB	4.73 USD	4.01 euro
ADS1115IDGSR	5.30 USD	4.50 euro
OP07CDR	0.52 USD	yok
DCR010505P	9.99 USD	8.39 euro
FT232RL-REEL	4.5	3.81 euro
Direnç, kapasitör vb. Toplam <10 USD		
Wemos D1 mini, Aliexpress fiyatı <2 USD		
PLA+ filament 1 kilogram fiyatı <100 TL		
FR-4 PCB kart başı maliyet <50 TL		
4 kanal için kablo ve vidalar toplam maliyet <100 TL		
Kullanılan yazılımların lisans ücretleri = 0 TL		

Buna göre toplam elektronik parça maliyeti 4 kanal bir sensör kartında 4 sinyal, 8 filtre op-amp’ı ve 1 ADC bulunduğu hesaba katılarak 30 ABD dolarının altında çıkmaktadır. Buna baskı kartı ve kablo gibi diğer parçaların maliyeti de eklendiğinde, 2020 dolar kuru ortalaması 7 TL alınırsa toplam maliyet Türk lirasıyla 4 kanallı bir sensör düğümü için 350 TL’nin altında çıkmaktadır. Bu da yerli üretim ve ArGe ürünü olan tezimizin sonucunun, özellikle kablosuz sensör ağları çalışmalarında kullanılan hazır sistemler veya elektrokimyasal masaüstü bilgisayar bağlantılı çok kanallı sistemlerin fiyatları ele alındığında, yazılım lisanslarıyla beraber 50 kata kadar daha düşük maliyetle elde edildiğini ortaya çıkartmaktadır [142].

4.2 Öneriler

Çalışmamız sonucunda elde edilen bütün sonuçları ve kazanımları sistematik olarak değerlendirmek için bir bütün olarak platformu ele alarak, bölüm 3'deki Şekil 3.19'da verilen şablona bakarak tüm bileşenleri gözden geçirmek gerekmektedir. Bu doğrultuda Tablo 4.5'de sistemin elemanlarının özgün katkıları özetlenmiştir. Tabloda özgün katkının hangi birimde olduğu ve katkıların ne olduğu sıralanmıştır.

Tablo 4.5 Özgün katkıların özet tablosu

Madde	Özgün Katkı
Sensör kartı	-Geçmeli yığın baskılı devre kartı (PCB stack) mantığı geliştirildi. Bu sayede esnek tip ve sayıda sensörle özelleştirilebilir sensör düğümlerinin hızlı bir şekilde kurulumu avantajı kazanıldı.
Okuma kartı	-Arduino, ESP, NRF gibi yaygın kitlelere doğrudan uyumlu devre tasarım yapıldı. Bu sayede farklı KSA uygulamalara esneklik kazandırıldı. -Güç filtresi opsiyonlu olarak konuldu. Bu sayede gürültü izolasyonu sağlandı. -Farklı tipten güç girişleri için seçici pinler ve girişler konuldu. Bu sayede enerji hasadı, güneş pili gibi uygulamaların alt yapısı yerleştirildi.
Bağlantı ekipmanları	-Yaygın bulunan krokodil kablo seçilmesi sayesinde uygulama kolaylığı ve maliyet tasarrufu elde edildi.
Çoklu sensör tutucu kafası	-Çoklu sensör tasarımının 3B teknolojilerle yapılması sayesinde sensörlerin kolaylıkla bir araya getirilmesi ve değişimi sağlandı.
Cihaz kutusu tasarımları	-PCB stack yapısını koruyacak ve destekleyecek aynı zamanda da çoklu sensör girişlerini kolaylaştıracak 3B tasarım yapıldı.

Kurulan kablosuz ağ	-Wi-Fi'nin kullanılmasını ve yaygınlaşmasını engelleyen pil tüketimi, karmaşık yazılım gerekliliği, maliyet gibi sorunlara çözüm getirildi. -Broker veya gateway gibi aracı yazılım veya donanım temelli desteklere ihtiyaç ortadan kaldırıldı. -Ağdan düşen veya düşürülen düğümlerin de kontrolü sağlandı. -Her uygulamanın ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla esnek veri tipi ve düğüm sayısında bir ağ tasarlandı.
Gömülü sistem yazılımı	-0.5 saniyeden daha kısa sürelerde ağa bağlanmayı sağlayacak şekilde yazıldı. -Ağdan düşmesi durumunda yeniden bağlanma özelliği eklendi. -Değiştirilebilir derin uyku aralıklarına sahip olarak yazıldı. -Derin uyku kontrolünü ve düğüm kimliğini dahili EEPROM kullanarak stabil şekilde yapılması sağlandı. -UDP ile hızlı iletişim sağlandı. -IoT desteği eklendi.
Arayüz yazılımı	-Veri yönetimi sensör düğümlerine ve her bir sensöre ayrı kimlik atanması sayesinde kolaylıkla yapıldı. -Çok sayıda sensör düğümünün kolay kontrolü sağlandı. -Özelleştirilebilir grafik arayüz yapıldı. -Kalibrasyon ve özel toplama sonrası veri işleme seçenekleri eklendi. -Yazılımın hataları giderildi, az boyutlarda ve düşük kaynaklar tüketerek tam performansta çalışması sağlandı. -Sorunsuz bir şekilde mikrosaniye hassaslığında veri arşivlenmesi sağlandı.
Test kodları	- Geliştirilen özgün katkılarının kolaylıkla ve standart yöntemlerle test edilmesi sağlandı. - Ayrıca test sonuçlarının grafik ve tablolar halinde elde edilmesi sağlandı.

Platform, sensör düğümleri kolaylıkla çoğaltılabilir şekilde üretildi. Sensör düğümleri pil temelli mobil güç kaynağına bağlandıktan sonra çalışmaya hazır hale geldi. Gömülü yazılım ve arayüz yazılımı (daqWise) sayesinde kurulan kablosuz ağ genişletilebilir ve kolay idare edilebilir şekilde tasarlandı. Çok sayıda sensör düğümünün ve her bir sensör düğümünün içerisinde yer alabilecek çok sayıda sensörün karmaşıklığa neden olmadan bağımsız takiplerinin yapılması sağlandı.

Tüm sensör verilerinin hangi düğümden olursa olsunlar, kendi kimliğiyle tanınması ve okunması sağlandı. Her bir sensörün ayrıca kalibre edilmesi, verisinin gösterilmesi ve arşivlenmesi sağlandı. İsteğe bağlı olarak tüm verilerin eş zamanlı bir şekilde bulut sunuculara aktarılabilmesi ve dolayısıyla nesnelerin interneti konseptinin tamamlandığı uygulama başarıyla gerçekleştirildi.

Platformun donanımları elektronik devreler ve bağlantı ekipmanlarından oluşturuldu. Platformun çok yönlü yapıda ve esnek genişletilebilir yapıda olması açısından, sensör düğümlerindeki sensör sayılarının sabit değil de isteğe bağlı şekilde değiştirilebilir olması sağlandı. Geliştirilen sensör kartı-okuma kartı yığın baskılı devre kartı tekniği sayesinde istenilen sayıda sensörün bir okuma kartıyla birleştirilerek, sensör sayısı ve sensör tipi yönünden özelleştirilmiş sensör düğümlerinin hızlıca oluşturulması sağlandı. Böylece ağın veri tipi homojen veya heterojen olarak değiştirilebilir oldu.

Sensör kartı iyon seçici elektrotlar için geliştirildi. Her bir kart dört kanallı olarak tasarlandı. Sensör kartları da yine esnek çalışmaya uygun şekilde özelleştirilebilir bir şekilde açık veya kapalı duruma getirilebilen, sensör öncesi ve sonrası olmak üzere iki adet analog alçak geçiren filtreyle üretildi. Sensör kartlarına iyon seçici elektrotlar haricinde analog sinyal çıkışı veren (0-5 V aralığında olmak şartıyla) her hangi bir sensör de takılabilir durumdaydı.

Okuma kartı isteğe bağlı olarak kablosuz veya kablolu haberleşme yapabilen, en yaygın mikrodenetleyici geliştirme platformlarını destekleyen (başta Arduino, ESP Nrf ve LoRa olmak üzere) bir yapıda tasarlandı. Okuma kartının güç girişleri özelleştirilebilir yapıda seçenekli olarak belirlendi. Bağlantı ekipmanları olarak silikon kılıflı krokodil kablolar kullanılması sayesinde mekanik olarak sağlam yapı elde edilmiş oldu.

Platformun okuma kartına takılan mikrodenetleyicinin gömülü yazılımı tüm sistemle uyumlu olacak şekilde tasarlandı. Bu yazılım ağa katılmak ve durumunu ağa bildirmek için gereken tüm haberleşme algoritmalarıyla beraber programlandı. Böylece her bir sensör düğümünün birbirinden bağımsız bir şekilde ağ üzerinde tanınması ve kontrolü yapıldı.

Arayüz yazılımı Wi-Fi temelli bir ağı idare etmek amacıyla UDP protokolüne dayalı olarak yapıldı. Yazılım sensör düğümlerinin durumlarını sürekli takip ve kayıt altında tuttu. Düğüm tarama algoritması vasıtasıyla ağın dinamik olarak genişletilmesi mümkün oldu. Yazılım elde ettiği verileri sonradan kolay erişim için arşivledi. Arayüz yazılımının düşük kaynaklar tüketerek sorunsuz şekilde çalışması sağlandı. Kullanıcının ağı takip edebilmesi ve pratik anlamda kablosuz sensör ağı üzerinde iyon seçici elektrotlar ile su üzerinde ölçüm alabilmesi için gereken veri izleme ekranı arayüzle sağlanmış oldu. Ayrıca testler sırasında eklenen OLED ekran vasıtasıyla istenilen bazı parametrelerin yerinde doğrudan düğüm üzerinde gösterilmesi sağlandı.

Platformun harcadığı gücü, uzun vadede ağın kontrolünü sağlayabilmesi adına bağlantı kopma denemeleri, derin uyku sürecinin takipleri gibi performans kriterleri için test kodları geliştirildi. Ayrıca ping ve RSSI değerlerinin tespiti için yine test kodları üretildi. Yazılan kodlar sayesinde ağ kalitesi, donanım stabilitesi ve harcanan gücün hangi seviyede olduğu tespit edildi.

Platformda nesnelerin interneti konseptini tamamlayan en son teknoloji trendleri kullanıldı. Üç boyutlu modelleme tekniğiyle sensörlerin yapımında, çoklu sensör tutucunun üretilmesinde platform bağlantılarının mekanik desteklenmesinde mevcut ihtiyaçlara tam olarak cevap verildi. Üç boyutlu yazıcıdan alınan çıktılarda çevreye daha az zararlı biyobozunur malzeme seçildi.

Geliştirilen çoklu sensör tutucu modeli sensörlerin kolaylıkla takılıp değiştirilebilir olması amacıyla üretildi. Model istenilen kanal sayısında yeniden tasarlanabilecek pratiklikte geliştirildi. Sensörlerin yapımında kullanılan rijit tüpler bu sensör tutucuya tam uyumlulukta tasarlandı.

Platformun gerek yazılımları gerek ise donanımlarında mümkün olduğu kadar yüksek oranda açık kaynak yazılım ve donanım bilgi havuzlarından faydalanıldı. Açık kaynak konseptinin sunduğu ileriye yönelik uygulamalarda hızlı geliştirme, güncel teknolojiye tam uyum sağlama ve ticari olan ürünlere göre oldukça düşük maliyet avantajlarından faydalanılmış olundu.

Tezimizde geliştirilen prototip platformda su kalitesi takibi amacıyla iyi bilinen ve önceden karakterize edilmiş bazı iyon seçici elektrotlar ile ölçüm denemeleri yapıldı. Platformun çok daha fazla sayıda sensör ve sensör düğümüyle çalışabildiği gösterildi. Bu platform ile yerinde ve gerçek şartlarda coğrafi veya çevresel ölçümler yapabilmek için çevreye uygun ölçüm istasyonları kurulmalı ve sensör düğümleri buralara yerleştirilmelidir. Platform daha önce bahsedildiği gibi çoklu güç girişi seçeneklerine sahiptir. Böyle bir gerçek uygulama için platform kolaylıkla güneş paneli, rüzgar türbini veya enerji hasatlama gibi yöntemlerle entegre edilme

kabiliyetindedir. Platformda kurulan ağın kolay kurulumu ve genişletilebilir yapıda tasarlanması sayesinde gerçek dünya uygulamaları: sel, çevre kirliliği, kuraklık, tarımsal aşırı kirliliğin veya gübrelemenin takibi, dere göl ve akarsu gibi yerlerde ekolojik parametrelerin takibi gibi çeşitli durumlara göre farkedirılabilen ölçekte yapılabilecektir.



- [1] R. P. Schwarzenbach, T. Egli, T. B. Hofstetter, U. von Gunten, B. Wehrli, "Global Water Pollution and Human Health," *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 35, no. 1, pp. 109–136, Nov. 2010, ISSN: 1543-5938. DOI: 10.1146/annurev-environ-100809-125342. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-100809-125342> <http://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-environ-100809-125342>.
- [2] D. Li, S. Liu, "Chapter 4 - Water Quality Evaluation," in *Water Quality Monitoring and Management*, D. Li, S. Liu, Eds., Academic Press, 2019, pp. 113–159, ISBN: 978-0-12-811330-1. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811330-1.00004-1>. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128113301000041>.
- [3] J. Yick, B. Mukherjee, D. Ghosal, "Wireless sensor network survey," 2008. DOI: 10.1016/j.comnet.2008.04.002.
- [4] *Disease and Impact | The Safe Water System | CDC*. [Online]. Available: <https://www.cdc.gov/safewater/disease.html> (visited on 05/16/2019).
- [5] P. Levallois, C. M. Villanueva, *Drinking water quality and human health: An editorial*, Feb. 2019. DOI: 10.3390/ijerph16040631. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6406761/>.
- [6] S. Amiri, M. Mazaheri, J. M. V. Samani, "Introducing a general framework for pollution source identification in surface water resources (theory and application)," *Journal of Environmental Management*, vol. 248, p. 109281, 2019, ISSN: 0301-4797. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109281>. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479719309831>.
- [7] World Health Organization, "Developing Drinking-Water Quality Regulations And Standards General guidance with a special focus on countries with limited resources," Tech. Rep., 2018.
- [8] R. A. Bórquez López, L. R. Martinez Cordova, J. C. Gil Nuñez, J. R. Gonzalez Galaviz, J. C. Ibarra Gamez, R. Casillas Hernandez, "Implementation and Evaluation of Open-Source Hardware to Monitor Water Quality in Precision Aquaculture," *Sensors*, vol. 20, no. 21, p. 6112, Oct. 2020, ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s20216112. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/21/6112>.

- [9] O. N. Samijayani, F. G. Sulistya, M. T. Wulansari, A. Mujadin, S. Rahmatia, "Wireless sensor network for pH and turbidity of river water monitoring," in *AIP Conference Proceedings*, vol. 2043, American Institute of Physics Inc., Nov. 2018, p. 020 019, ISBN: 9780735417694. DOI: 10.1063/1.5080038. [Online]. Available: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5080038>.
- [10] H.-C. Yu, M.-Y. Tsai, Y.-C. Tsai, J.-J. You, C.-L. Cheng, J.-H. Wang, S.-J. Li, "Development of Miniaturized Water Quality Monitoring System Using Wireless Communication," *Sensors*, vol. 19, no. 17, p. 3758, Aug. 2019, ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s19173758. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/17/3758>.
- [11] N. A. Cloete, R. Malekian, L. Nair, "Design of Smart Sensors for Real-Time Water Quality Monitoring," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 3975–3990, 2016, ISSN: 21693536. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2592958.
- [12] S. O. Olatinwo, T.-H. Joubert, "Enabling Communication Networks for Water Quality Monitoring Applications: A Survey," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 100 332–100 362, Aug. 2019. DOI: 10.1109/access.2019.2904945.
- [13] J. V. Capella, A. Bonastre, R. Ors, M. Peris, "A Wireless Sensor Network approach for distributed in-line chemical analysis of water," *Talanta*, vol. 80, no. 5, pp. 1789–1798, Mar. 2010, ISSN: 00399140. DOI: 10.1016/j.talanta.2009.10.025. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0039914009008145>.
- [14] *Water quality monitoring - search results - PubMed*. [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/?term=water%20quality%20monitoring&filter=years.1996-2020&timeline=expanded> (visited on 12/10/2020).
- [15] *History of the Clean Water Act | Laws & Regulations | US EPA*. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/laws-regulations/history-clean-water-act> (visited on 08/16/2020).
- [16] Ç. Güler, *Çevre Sağlığı Temel Kaynak Dizisi*. Ankara: T.C. Sağlık Bakanlığı, 1997.
- [17] World Health Organization, *Guidelines for Drinking-Water Quality: Fourth Edition Incorporating the First Addendum*. World Health Organization, 2014, p. 541, ISBN: 9789241549950. [Online]. Available: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/254637/9789241549950-eng.pdf;jsessionid=C9942C5DBCC2BDC53A892D79B3844EE8?sequence=1>.
- [18] K. S. Adu-Manu, C. Tapparello, W. Heinzelman, F. A. Katsriku, J. D. Abdulai, *Water quality monitoring using wireless sensor networks: Current trends and future research directions*, Jan. 2017. DOI: 10.1145/3005719. [Online]. Available: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=3027492.3005719>.
- [19] *Ammonia | CADDIS Volume 2 | US EPA*. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/caddis-vol2/ammonia> (visited on 08/16/2020).

- [20] “Ammonia in Drinking-water Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality,” Tech. Rep., 2003.
- [21] “Potassium in drinking-water Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality,” Tech. Rep., 2009.
- [22] A. Melo, E. Pinto, A. Aguiar, C. Mansilha, O. Pinho, I. M. Ferreira, “Impact of intensive horticulture practices on groundwater content of nitrates, sodium, potassium, and pesticides,” *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 184, no. 7, pp. 4539–4551, Jul. 2012, ISSN: 01676369. DOI: 10.1007/s10661-011-2283-4.
- [23] *pH | CADDIS Volume 2 | US EPA*. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/caddis-vol2/caddis-volume-2-sources-stressors-responses-ph> (visited on 08/16/2020).
- [24] K. Voudouris, D. Voutsas, *Water Quality Monitoring and Assessment*. InTech, May 2012. DOI: 10.5772/2411. [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/books/water-quality-monitoring-and-assessment>.
- [25] A. K. Covington, C. R. Company, *Ion-selective Electrode Methodology*, ser. Ion-selective Electrode Methodology 1. c. CRC Press, 1979, ISBN: 9780849352485. [Online]. Available: <https://books.google.com.tr/books?id=XwjwAAAAMAAJ>.
- [26] Freiser Henry, *Ion-Selective Electrodes in Analytical Chemistry*. Springer US, 1978. DOI: 10.1007/978-1-4684-2592-5.
- [27] K. N. Mikhelson, “Introductory Issues,” in, 2013, pp. 1–10. DOI: 10.1007/978-3-642-36886-81.
- [28] P. Westbroek, “Electrochemical methods,” in *Analytical Electrochemistry in Textiles*, Elsevier Inc., Jan. 2005, pp. 37–69, ISBN: 9781855739192. DOI: 10.1533/9781845690878.1.37.
- [29] W. Clarke, P. D’Orazio, “Electrochemistry,” in *Contemporary Practice in Clinical Chemistry*, Elsevier, Jan. 2020, pp. 159–170. DOI: 10.1016/B978-0-12-815499-1.00009-0. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128154991000090>.
- [30] S. Makarychev-Mikhailov, A. Shvarev, E. Bakker, “New trends in ion-selective electrodes,” in *Electrochemical Sensors, Biosensors and their Biomedical Applications*, Elsevier Inc., Jan. 2008, pp. 71–114, ISBN: 9780123737380. DOI: 10.1016/B978-012373738-0.50006-4.
- [31] D. Ammann, D. Ammann, “Classification of Ion-Selective Electrodes,” in *Ion-Selective Microelectrodes*, Springer Berlin Heidelberg, 1986, pp. 3–8. DOI: 10.1007/978-3-642-52507-0_2. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-52507-0_2.
- [32] R. B. Fischer, “Number 6,” Tech. Rep., 1969, p. 10. [Online]. Available: <https://pubs.acs.org/sharingguidelines>.

- [33] Y. Shao, Y. Ying, J. Ping, *Recent advances in solid-contact ion-selective electrodes: Functional materials, transduction mechanisms, and development trends*, Jul. 2020. DOI: 10.1039/c9cs00587k. [Online]. Available: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2020/cs/c9cs00587k> %20https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/cs/c9cs00587k.
- [34] R. Yan, S. Qiu, L. Tong, Y. Qian, "Review of progresses on clinical applications of ion selective electrodes for electrolytic ion tests: from conventional ISEs to graphene-based ISEs," *Chemical Speciation & Bioavailability*, vol. 28, no. 1-4, pp. 72–77, Oct. 2016, ISSN: 0954-2299. DOI: 10.1080/09542299.2016.1169560. [Online]. Available: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09542299.2016.1169560>.
- [35] W. Simon, D. Ammann, W. Bussmann, P. C. Meier, "ION SELECTIVE ELECTRODES IN BIOLOGY AND MEDICINE," in *Frontiers of Chemistry*, Elsevier, Jan. 1982, pp. 217–226. DOI: 10.1016/b978-0-08-026220-8.50022-1.
- [36] T. r. Yu, "Application of Ion-selective Electrodes In Soil Science.," *Ion-selective electrode reviews*, vol. 7, no. 2, pp. 165–202, Jan. 1985, ISSN: 01915371. DOI: 10.1016/b978-0-08-034150-7.50008-5.
- [37] K. J., G. R., T. Astatkie, J. F., P. C., "In-Field Measurement of Soil Nitrate Using an Ion-Selective Electrode," in *Advances in Measurement Systems*, InTech, Apr. 2010. DOI: 10.5772/8741. [Online]. Available: www.intechopen.com.
- [38] *Applications of Ion electrodes - HORIBA*. [Online]. Available: <https://www.horiba.com/br/application/material-property-characterization/water-analysis/water-quality-electrochemistry-instrumentation/the-story-of-ph-and-water-quality/the-basis-of-ion/applications-of-ion-electrodes/> (visited on 09/09/2020).
- [39] M. Maj-Żurawska, A. Hulanicki, "ION-selective electrodes | Food applications," in *Encyclopedia of Analytical Science*, Elsevier, Jan. 2019, pp. 226–230, ISBN: 9780081019832. DOI: 10.1016/B978-0-12-409547-2.00264-X.
- [40] P. L. Bailey, "The Application of Ion-Selective Electrodes to Industrial Monitoring," in *Meß- und Automatisierungstechnik*, Springer Berlin Heidelberg, 1980, pp. 15–24. DOI: 10.1007/978-3-642-45521-6_{_}2. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-45521-6_2.
- [41] *Application of ISE – Monokrystaly*. [Online]. Available: <http://www.monokrystaly.cz/en/fields-of-application-ise.html> (visited on 08/11/2020).
- [42] J. Thomas, "Ion-selective Electrodes in Environmental and Toxicological Analysis," in *Analytical Techniques in Environmental Chemistry*, Elsevier, Jan. 1980, pp. 543–562. DOI: 10.1016/b978-0-08-023809-8.50055-2.

- [43] R. J. Forster, T. E. Keyes, "Ion-Selective Electrodes in Environmental Analysis," in *Encyclopedia of Analytical Chemistry*, Wiley, Oct. 2000. DOI: 10.1002/9780470027318.a0837. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470027318.a0837>.
- [44] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "Wireless sensor networks: A survey," *Computer Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, Mar. 2002, ISSN: 13891286. DOI: 10.1016/S1389-1286(01)00302-4.
- [45] F. K. Shaikh, S. Zeadally, *Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review*, Mar. 2016. DOI: 10.1016/j.rser.2015.11.010.
- [46] M. C. Vuran, I. F. Akyildiz, "Channel model and analysis for wireless underground sensor networks in soil medium," *Physical Communication*, vol. 3, no. 4, pp. 245–254, Dec. 2010, ISSN: 18744907. DOI: 10.1016/j.phycom.2010.07.001.
- [47] C. Tziortzioti, D. Amaxilatis, I. Mavrommati, I. Chatzigiannakis, "IoT sensors in sea water environment: Ahoy! Experiences from a short summer trial," in *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, vol. 343, Elsevier B.V., May 2019, pp. 117–130. DOI: 10.1016/j.entcs.2019.04.014.
- [48] S. H. Lee, S. Lee, H. Song, H. S. Lee, "Wireless sensor network design for tactical military applications: Remote large-scale environments," in *Proceedings - IEEE Military Communications Conference MILCOM*, 2009, ISBN: 9781424452385. DOI: 10.1109/MILCOM.2009.5379900.
- [49] M. Winkler, M. Street, K.-D. Tuchs, K. Wrona, "Wireless Sensor Networks for Military Purposes," in, Springer, Berlin, Heidelberg, 2012, pp. 365–394. DOI: 10.1007/5346{_}2012{_}40. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/5346_2012_40.
- [50] B. Prabhu, M. Pradeep, E. Gajendran, *Military Applications of Wireless Sensor Network System*, Jan. 2017. [Online]. Available: <https://papers.ssrn.com/abstract=2905627>.
- [51] S. Ullo, M. Gallo, G. Palmieri, P. Amenta, M. Russo, G. Romano, M. Ferrucci, A. Ferrara, M. De Angelis, "Application of wireless sensor networks to environmental monitoring for sustainable mobility," in *2018 IEEE International Conference on Environmental Engineering, EE 2018 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jun. 2018, pp. 1–7, ISBN: 9781538641828. DOI: 10.1109/EE1.2018.8385263.
- [52] F. Mao, K. Khamis, S. Krause, J. Clark, D. M. Hannah, "Low-Cost Environmental Sensor Networks: Recent Advances and Future Directions," *Frontiers in Earth Science*, vol. 7, p. 221, Sep. 2019, ISSN: 2296-6463. DOI: 10.3389/feart.2019.00221. [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/feart.2019.00221/full>.
- [53] J. Valverde, V. Rosello, G. Mujica, J. Portilla, A. Uriarte, T. Riesgo, "Wireless Sensor Network for Environmental Monitoring: Application in a Coffee Factory," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 8, no. 1, p. 638067, Jan. 2012, ISSN: 1550-1477. DOI: 10.1155/2012/638067. [Online]. Available: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1155/2012/638067>.

- [54] J. Polastre, R. Szewczyk, A. Mainwaring, D. Culler, J. Anderson, "Analysis of Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring," in *Wireless Sensor Networks*, Springer US, Dec. 2006, pp. 399–423. DOI: 10.1007/978-1-4020-7884-2_{_}18. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-7884-2_18.
- [55] E. N. Udo, E. Isong, "Flood Monitoring and Detection System using Wireless Sensor Network," *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 2013.
- [56] C. Abreu, P. Mendes, "Wireless sensor networks for biomedical applications," in *3rd Portuguese Bioengineering Meeting, ENBENG 2013 - Book of Proceedings*, 2013, ISBN: 9781467348591. DOI: 10.1109/ENBENG.2013.6518413.
- [57] B. Abidi, A. Jilbab, M. E. Haziti, "Wireless sensor networks in biomedical: Wireless body area networks," in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 520, Springer Verlag, 2017, pp. 321–329, ISBN: 9783319465678. DOI: 10.1007/978-3-319-46568-5_{_}33. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-46568-5_33.
- [58] M. S. Wegmueller, M. Hediger, T. Kaufmann, F. Buerger, W. Fichtner, "Wireless implant communications for biomedical monitoring sensor network," in *Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2007, pp. 809–812. DOI: 10.1109/iscas.2007.378029.
- [59] R. A. Khan, A.-S. K. Pathan, "The state-of-the-art wireless body area sensor networks: A survey," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 14, no. 4, p. 155 014 771 876 899, Apr. 2018, ISSN: 1550-1477. DOI: 10.1177/1550147718768994. [Online]. Available: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1550147718768994>.
- [60] A. Belghith, M. S. Obaidat, "Wireless sensor networks applications to smart homes and cities," in *Smart Cities and Homes: Key Enabling Technologies*, Elsevier Inc., May 2016, pp. 17–40, ISBN: 9780128034637. DOI: 10.1016/B978-0-12-803454-5.00002-X.
- [61] W. Yifeng, "The design of smart home system based on wireless sensor network," in *ICEIEC 2013 - Proceedings of 2013 IEEE 4th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication*, IEEE Computer Society, 2013, pp. 106–108, ISBN: 9781467349314. DOI: 10.1109/ICEIEC.2013.6835464.
- [62] M. G. R. Maldonado, "Wireless sensor network for smart home services using optimal communications," in *Proceedings - 2017 International Conference on Information Systems and Computer Science, INCISCOS 2017*, vol. 2017-November, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Mar. 2018, pp. 27–32, ISBN: 9781538626443. DOI: 10.1109/INCISCOS.2017.21.
- [63] A. Flammini, P. Ferrari, D. Marioli, E. Sisinni, A. Taroni, "Wired and wireless sensor networks for industrial applications," *Microelectronics Journal*, vol. 40, no. 9, pp. 1322–1336, Sep. 2009, ISSN: 00262692. DOI: 10.1016/j.mejo.2008.08.012.

- [64] J. Aponte-Luis, J. Gómez-Galán, F. Gómez-Bravo, M. Sánchez-Raya, J. Alcina-Espigado, P. Teixido-Rovira, "An Efficient Wireless Sensor Network for Industrial Monitoring and Control," *Sensors*, vol. 18, no. 2, p. 182, Jan. 2018, ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s18010182. [Online]. Available: <http://www.mdpi.com/1424-8220/18/1/182>.
- [65] X. Shen, Z. Wang, Y. Sun, "Wireless sensor networks for industrial applications," in *Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, vol. 4, 2004, pp. 3636–3640. DOI: 10.1109/wcica.2004.1343273.
- [66] R. Budampati, S. Kolavennu, *Industrial Wireless Sensor Networks: Monitoring, Control and Automation*. Elsevier Inc., Jan. 2015, pp. 1–234, ISBN: 9781782422372. DOI: 10.1016/C2013-0-16492-6.
- [67] S. Bai, X. Li, Z. Xie, Z. Zhou, J. Ou, "A Wireless Fatigue Monitoring System Utilizing a Bio-Inspired Tree Ring Data Tracking Technique," *Sensors*, vol. 14, no. 3, pp. 4364–4383, Mar. 2014, ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s140304364. [Online]. Available: <http://www.mdpi.com/1424-8220/14/3/4364>.
- [68] B. S. S. Tejesh, S. Neeraja, "Warehouse inventory management system using IoT and open source framework," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 57, no. 4, pp. 3817–3823, Dec. 2018, ISSN: 11100168. DOI: 10.1016/j.aej.2018.02.003.
- [69] F. Viani, M. Salucci, P. Rocca, G. Oliveri, A. Massa, "A multi-sensor WSN backbone for museum monitoring and surveillance," in *Proceedings of 6th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2012*, 2012, pp. 51–52, ISBN: 9781457709180. DOI: 10.1109/EuCAP.2012.6206050.
- [70] R. I. D. Silva, V. D. D. Almeida, A. M. Poersch, J. M. S. Nogueira, "Wireless sensor network for disaster management," in *Proceedings of the 2010 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium, NOMS 2010*, IEEE Computer Society, 2010, pp. 870–873, ISBN: 9781424453672. DOI: 10.1109/NOMS.2010.5488351.
- [71] I. Benkhelifa, N. Nouali-Taboudjemmat, S. Moussaoui, "Disaster management projects using wireless sensor networks: An overview," in *Proceedings - 2014 IEEE 28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, IEEE WAINA 2014*, IEEE Computer Society, 2014, pp. 605–610, ISBN: 9781479926527. DOI: 10.1109/WAINA.2014.99.
- [72] Q. F. Shang, L. Zhang, "Automation control system of pharmaceutical factory based on wireless sensor network," in *Applied Mechanics and Materials*, vol. 397-400, Trans Tech Publications Ltd, 2013, pp. 1271–1277, ISBN: 9783037858431. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.397-400.1271. [Online]. Available: <https://www.scientific.net/AMM.397-400.1271>.
- [73] M. J. McGrath, C. N. Scanail, *Sensor technologies: Healthcare, wellness, and environmental applications*. Apress Media LLC, Jan. 2013, pp. 1–302, ISBN: 9781430260141. DOI: 10.1007/978-1-4302-6014-1.

- [74] I. F. Akyildiz, M. C. Vuran, *Wireless Sensor Networks*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, Aug. 2010, ISBN: 9780470515181. DOI: 10 . 1002 / 9780470515181. [Online]. Available: <http://doi.wiley.com/10.1002/9780470515181>.
- [75] L. Costa, "Open Systems Interconnect (OSI) Model," *JALA: Journal of the Association for Laboratory Automation*, vol. 3, no. 1, pp. 28–35, Mar. 1998, ISSN: 1535-5535. DOI: 10 . 1177 / 221106829800300108. [Online]. Available: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/221106829800300108>.
- [76] C. Panek, "Defining Networks with the OSI Model," in *Networking Fundamentals*, Wiley, Nov. 2019, pp. 43–73. DOI: 10 . 1002 / 9781119650768 . ch2. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119650768.ch2>.
- [77] *TCP/IP protocols*. [Online]. Available: https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/SSGMCP_5.3.0/com.ibm.cics.ts.internet.doc/topics/dfhtl23.html (visited on 06/16/2020).
- [78] F. Sadikin, T. v. Deursen, S. Kumar, "A ZigBee Intrusion Detection System for IoT using Secure and Efficient Data Collection," *Internet of Things*, vol. 12, p. 100306, Dec. 2020, ISSN: 25426605. DOI: 10 . 1016 / j . iot . 2020 . 100306.
- [79] P. K. Khatua, V. K. Ramachandaramurthy, P. Kasinathan, J. Y. Yong, J. Pasupuleti, A. Rajagopalan, *Application and assessment of internet of things toward the sustainability of energy systems: Challenges and issues*, Feb. 2020. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101957.
- [80] C. W. Badenhop, S. R. Graham, B. W. Ramsey, B. E. Mullins, L. O. Mailloux, "The Z-Wave routing protocol and its security implications," *Computers and Security*, vol. 68, pp. 112–129, Jul. 2017, ISSN: 01674048. DOI: 10.1016/j.cose.2017.04.004.
- [81] C. E. Fehri, M. Kassab, S. Abdellatif, P. Berthou, A. Belghith, "LoRa technology MAC layer operations and Research issues," in *Procedia Computer Science*, vol. 130, Elsevier B.V., Jan. 2018, pp. 1096–1101. DOI: 10.1016/j.procs.2018.04.162.
- [82] L. Hamami, B. Nassereddine, *Application of wireless sensor networks in the field of irrigation: A review*, Dec. 2020. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105782.
- [83] A. Kochhar, N. Kumar, *Wireless sensor networks for greenhouses: An end-to-end review*, Aug. 2019. DOI: 10.1016/j.compag.2019.104877.
- [84] K. Hasan, K. Biswas, K. Ahmed, N. S. Nafi, M. S. Islam, *A comprehensive review of wireless body area network*, Oct. 2019. DOI: 10.1016/j.jnca.2019.06.016.
- [85] J. Tournier, F. Lesueur, F. L. Mouël, L. Guyon, H. Ben-Hassine, "A survey of IoT protocols and their security issues through the lens of a generic IoT stack," *Internet of Things*, p. 100264, Jul. 2020, ISSN: 25426605. DOI: 10.1016/j.iot.2020.100264.
- [86] *Arduino Yún Rev 2 | Arduino Official Store*. [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-yun-rev-2> (visited on 08/08/2020).

- [87] *Arduino* için Intel® Edison Anakartı Ürün Teknik Özellikleri*. [Online]. Available: <https://ark.intel.com/content/www/tr/tr/ark/products/84574/intel-edison-board-for-arduino.html> (visited on 09/10/2020).
- [88] *Raspberry Pi hardware - Raspberry Pi Documentation*. [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/raspberrypi/README.md> (visited on 09/10/2020).
- [89] *BeagleBoard.org - black-wireless*. [Online]. Available: <https://beagleboard.org/black-wireless> (visited on 09/10/2020).
- [90] *Hardware Overview | Mbed*. [Online]. Available: <https://os.mbed.com/hardware/> (visited on 09/10/2020).
- [91] *Long Range, Low Power RF Transceiver with LoRa Technology | Semtech*. [Online]. Available: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lor-transceivers> (visited on 09/10/2020).
- [92] *ESP32 Wi-Fi & Bluetooth MCU I Espressif Systems*. [Online]. Available: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32> (visited on 09/10/2020).
- [93] "International Journal of Computer Science and Mobile Computing," Tech. Rep., 2014. [Online]. Available: www.ijcsmc.com.
- [94] D. Ganesan, A. Cerpa, W. Ye, Y. Yu, J. Zhao, D. Estrin, "Networking issues in wireless sensor networks," *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 64, no. 7, pp. 799–814, Jul. 2004, ISSN: 07437315. DOI: 10.1016/j.jpdc.2004.03.016.
- [95] A. Willig, "Wireless sensor networks: Concept, challenges and approaches," *Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 123, no. 6, pp. 224–231, Jun. 2006, ISSN: 0932383X. DOI: 10.1007/s00502-006-0351-1. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00502-006-0351-1>.
- [96] R. Yugha, S. Chithra, *A survey on technologies and security protocols: Reference for future generation IoT*, Nov. 2020. DOI: 10.1016/j.jnca.2020.102763.
- [97] I. Agir, R. Yildirim, M. Nigde, I. Isildak, "Internet of Things Implementation of Nitrate and Ammonium Sensors for Online Water Monitoring," *Analytical Sciences*, 20P396, 2020, ISSN: 0910-6340. DOI: 10.2116/analsci.20p396.
- [98] I. Isildak, M. Yolcu, O. Isildak, N. Demirel, G. Topal, H. Hosgoren, "All-solid-state PVC membrane Ag⁺-selective electrodes based on diaza-18-crown-6 compounds," *Microchimica Acta*, vol. 144, no. 1-3, pp. 177–181, Nov. 2004, ISSN: 00263672. DOI: 10.1007/s00604-003-0072-7. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00604-003-0072-7>.
- [99] H. Kahlert, J. R. Pörksen, I. Isildak, M. Andac, M. Yolcu, J. Behnert, F. Scholz, "Application of a New pH-Sensitive Electrode as a Detector in Flow Injection Potentiometry," *Electroanalysis*, vol. 17, no. 12, pp. 1085–1090, Jun. 2005, ISSN: 1040-0397. DOI: 10.1002/elan.200403218. [Online]. Available: <http://doi.wiley.com/10.1002/elan.200403218>.

- [100] I. Agir, "Simple and Fast 3D Printing Method for Fabrication of Ion Selective Sensor Arrays," in *Icece-25*, Rome: icece, 2017, p. 103.
- [101] *The Python Language Reference — Python 3.9.1 documentation*. [Online]. Available: <https://docs.python.org/3/reference/> (visited on 08/10/2020).
- [102] J. A. Manrique, J. S. Rueda-Rueda, J. M. Portocarrero, "Contrasting Internet of Things and Wireless Sensor Network from a Conceptual Overview," in *2016 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData)*, IEEE, Dec. 2016, pp. 252–257, ISBN: 978-1-5090-5880-8. DOI: 10.1109/iThings-GreenCom-CPSCom-SmartData.2016.66. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7917094/>.
- [103] *Amcewen/HttpClient: Arduino HTTP library*. [Online]. Available: <https://github.com/amcewen/HttpClient> (visited on 04/01/2020).
- [104] *ThingSpeak Documentation*. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/thingspeak/> (visited on 07/01/2020).
- [105] Z. Abbas, W. Yoon, "A Survey on Energy Conserving Mechanisms for the Internet of Things: Wireless Networking Aspects," *Sensors*, vol. 15, no. 10, pp. 24818–24847, Sep. 2015, ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s151024818. [Online]. Available: <http://www.mdpi.com/1424-8220/15/10/24818>.
- [106] "Getting Started in KiCad," Tech. Rep., 2019.
- [107] M. T. Thompson, "Analog Low-Pass Filters," in *Intuitive Analog Circuit Design*, Elsevier, Jan. 2014, pp. 531–583. DOI: 10.1016/b978-0-12-405866-8.00014-0.
- [108] *LMP7721 data sheet, product information and support | TI.com*. [Online]. Available: <https://www.ti.com/product/LMP7721#tech-docs>.
- [109] S. J. Tilden, S. Max, J. Blair, F. Alegria, E. Balestrieri, N. Bjorsell, J. Calvin, D. Dallet, P. Daponte, L. De Vito, A. Goncharenko, D. Greer, R. Liggiero, T. E. Linnenbrink, S. Rapuano, F. Xu, *IEEE Std.1241-2010 - IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters (Revision of IEEE Std.1241-2000)*, 1241. 2011, pp. 1241–2000. DOI: 10.1109/IEEESTD.2011.5692956. [Online]. Available: <http://dx.medra.org/10.1109/IEEESTD.2011.5692956>.
- [110] *Try-catch-C# başvurusu | Microsoft Docs*. [Online]. Available: <https://docs.microsoft.com/tr-tr/dotnet/csharp/language-reference/keywords/try-catch> (visited on 07/05/2020).
- [111] "ESP8266EX Datasheet," Tech. Rep. [Online]. Available: <https://www.espressif.com/en/subscribe>. (visited on 07/10/2020).
- [112] *Inventor | Mechanical Design & 3D CAD Software | Autodesk*. [Online]. Available: <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview?plc=INVPROSA&term=1-YEAR&support=ADVANCED&quantity=1>.

- [113] *Simplify3D Software | All-In-One 3D Printing Software*. [Online]. Available: <https://www.simplify3d.com/> (visited on 05/07/2020).
- [114] Z. Liu, Y. Wang, B. Wu, C. Cui, Y. Guo, C. Yan, "A critical review of fused deposition modeling 3D printing technology in manufacturing polylactic acid parts," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 102, no. 9-12, pp. 2877–2889, Jun. 2019, ISSN: 14333015. DOI: 10.1007/s00170-019-03332-x. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-019-03332-x>.
- [115] S. R. Rajpurohit, H. K. Dave, "Analysis of tensile strength of a fused filament fabricated PLA part using an open-source 3D printer," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 101, no. 5-8, pp. 1525–1536, Apr. 2019, ISSN: 14333015. DOI: 10.1007/s00170-018-3047-x. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-018-3047-x>.
- [116] S. A. Raj, E. Muthukumaran, K. Jayakrishna, "A Case Study of 3D Printed PLA and Its Mechanical Properties," in *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, Elsevier Ltd, Jan. 2018, pp. 11 219–11 226. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.01.146.
- [117] M. Rajabalinejad, L. van Dongen, M. Ramtahalsing, "Systems integration theory and fundamentals," *Safety and Reliability*, vol. 39, no. 1, pp. 83–113, Jan. 2020, ISSN: 0961-7353. DOI: 10.1080/09617353.2020.1712918. [Online]. Available: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09617353.2020.1712918>.
- [118] *8341 GW Instek*. [Online]. Available: https://www.gwinstek.com/en-global/products/detail/GDM-8342_GDM-8341 (visited on 06/05/2020).
- [119] *Matplotlib: Python plotting — Matplotlib 3.3.3 documentation*. [Online]. Available: <https://matplotlib.org/> (visited on 07/01/2020).
- [120] *SciPy.org — SciPy.org*. [Online]. Available: <https://www.scipy.org/> (visited on 07/05/2020).
- [121] *Short introduction — pySerial 3.4 documentation*. [Online]. Available: <https://pyserial.readthedocs.io/en/latest/shortintro.html> (visited on 03/03/2020).
- [122] P. Virtanen, R. Gommers, T. E. Oliphant, M. Haberland, T. Reddy, D. Cournapeau, E. Burovski, P. Peterson, W. Weckesser, J. Bright, S. J. van der Walt, M. Brett, J. Wilson, K. J. Millman, N. Mayorov, A. R. J. Nelson, E. Jones, R. Kern, E. Larson, C. J. Carey, Í. Polat, Y. Feng, E. W. Moore, J. VanderPlas, D. Laxalde, J. Perktold, R. Cimrman, I. Henriksen, E. A. Quintero, C. R. Harris, A. M. Archibald, A. H. Ribeiro, F. Pedregosa, P. van Mulbregt, A. Vijaykumar, A. P. Bardelli, A. Rothberg, A. Hilboll, A. Kloeckner, A. Scopatz, A. Lee, A. Rokem, C. N. Woods, C. Fulton, C. Masson, C. Häggström, C. Fitzgerald, D. A. Nicholson, D. R. Hagen, D. V. Pasechnik, E. Olivetti, E. Martin, E. Wieser, F. Silva, F. Lenders, F. Wilhelm, G. Young, G. A. Price, G.-L. Ingold, G. E. Allen, G. R. Lee, H. Audren, I. Probst, J. P. Dietrich, J. Silterra, J. T. Webber, J. Slavič, J. Nothman, J. Buchner, J. Kulick, J. L. Schönberger, J. V. de Miranda Cardoso, J. Reimer, J. Harrington, J. L. C. Rodríguez, J. Nunez-Iglesias, J. Kuczynski,

- K. Tritz, M. Thoma, M. Newville, M. Kümmerer, M. Bolingbroke, M. Tartre, M. Pak, N. J. Smith, N. Nowaczyk, N. Shebanov, O. Pavlyk, P. A. Brodtkorb, P. Lee, R. T. McGibbon, R. Feldbauer, S. Lewis, S. Tygier, S. Sievert, S. Vigna, S. Peterson, S. More, T. Pudlik, T. Oshima, T. J. Pingel, T. P. Robitaille, T. Spura, T. R. Jones, T. Cera, T. Leslie, T. Zito, T. Krauss, U. Upadhyay, Y. O. Halchenko, Y. Vázquez-Baeza, S. 1. Contributors, “SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python,” *Nature Methods*, vol. 17, no. 3, pp. 261–272, 2020, ISSN: 1548-7105. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>.
- [123] J. D. Hunter, “Matplotlib: A 2D graphics environment,” *Computing in Science and Engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 90–95, 2007, ISSN: 15219615. DOI: 10.1109/MCSE.2007.55.
- [124] B. Srbinovski, G. Conte, A. P. Morrison, P. Leahy, E. Popovici, “ECO: An IoT platform for wireless data collection, energy control and optimization of a miniaturized wind turbine cluster: Power analysis and battery life estimation of IoT platform,” in *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Apr. 2017, pp. 412–417, ISBN: 9781509053209. DOI: 10.1109/ICIT.2017.7913266.
- [125] D. Thomas, R. McPherson, G. Paul, J. Irvine, “Optimizing Power Consumption of Wi-Fi for IoT Devices: An MSP430 processor and an ESP-03 chip provide a power-efficient solution,” *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 5, no. 4, pp. 92–100, Oct. 2016, ISSN: 21622256. DOI: 10.1109/MCE.2016.2590148.
- [126] K. H. Kim, H. D. Kim, “Deep Sleep Mode Based NodeMCU-Enabled Humidity Sensor Nodes Monitoring for Low-Power IoT,” *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, vol. 21, no. 6, pp. 617–620, Dec. 2020, ISSN: 20927592. DOI: 10.1007/s42341-020-00236-6. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42341-020-00236-6>.
- [127] A. Guidara, G. Fersi, F. Derbel, M. B. Jemaa, “Impacts of Temperature and Humidity variations on RSSI in indoor Wireless Sensor Networks,” in *Procedia Computer Science*, vol. 126, Elsevier B.V., Jan. 2018, pp. 1072–1081. DOI: 10.1016/j.procs.2018.08.044.
- [128] Yoppy, R. H. Arjadi, H. Candra, H. D. Prananto, T. A. W. Wijanarko, “RSSI Comparison of ESP8266 Modules,” in *2018 Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar, EECCIS 2018*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jul. 2018, pp. 150–153, ISBN: 9781538652510. DOI: 10.1109/EECCIS.2018.8692892.
- [129] S. Barai, D. Biswas, B. Sau, “Estimate distance measurement using NodeMCU ESP8266 based on RSSI technique,” in *2017 IEEE Conference on Antenna Measurements and Applications, CAMA 2017*, vol. 2018-January, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jan. 2018, pp. 170–173, ISBN: 9781509050284. DOI: 10.1109/CAMA.2017.8273392.
- [130] *Wi-Fi Signal Strength: What Is a Good Signal And How Do You Measure It*. [Online]. Available: <https://eyesaa.com/wi-fi-signal-strength/> (visited on 02/05/2019).

- [131] *What is round-trip time? | RTT definition | Cloudflare*. [Online]. Available: <https://www.cloudflare.com/learning/cdn/glossary/round-trip-time-rtt/> (visited on 02/05/2020).
- [132] *ICMP Echo - ESP32 - — ESP-IDF Programming Guide latest documentation*. [Online]. Available: https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/protocols/icmp_echo.html (visited on 07/05/2020).
- [133] *Understanding the Ping and Traceroute Commands - Cisco*. [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/ios-nx-os-software/ios-software-releases-121-mainline/12778-ping-traceroute.html> (visited on 07/05/2020).
- [134] *Ping | Microsoft Docs*. [Online]. Available: <https://docs.microsoft.com/en-us/windows-server/administration/windows-commands/ping> (visited on 07/05/2020).
- [135] *ESP8266-ping - Arduino Reference*. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/esp8266-ping/> (visited on 07/10/2020).
- [136] *Maintainability Index Range and Meaning | Microsoft Docs*. [Online]. Available: <https://docs.microsoft.com/tr-tr/archive/blogs/codeanalysis/maintainability-index-range-and-meaning> (visited on 07/02/2020).
- [137] P. Oman, J. Hagemester, “Metrics for assessing a software system’s maintainability,” in *Proceedings - Conference on Software Maintenance, ICSM 1992*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 1992, pp. 337–344, ISBN: 0818629800. DOI: 10.1109/ICSM.1992.242525.
- [138] *Calculate code metrics - Visual Studio | Microsoft Docs*. [Online]. Available: <https://docs.microsoft.com/en-us/visualstudio/code-quality/code-metrics-values?view=vs-2019> (visited on 03/08/2020).
- [139] *DigiKey Electronics - Electronic Components Distributor*. [Online]. Available: https://www.digikey.com/?utm_adgroup=Misspelling&gclid=Cj0KCQiA60r_BRC_ARIsAPzuer-iHrFf5KZ7TclVkcC5w11yrXmzd4N7tFOC0UPnPMjSsPwCW6J9JU8aAo1PEALw_wcB (visited on 05/09/2020).
- [140] *Electronic Components Distributor - Mouser Electronics Turkey*. [Online]. Available: https://www.mouser.com.tr/?gclid=Cj0KCQiA60r_BRC_ARIsAPzuer8C-b_UGpSUz1GK0qSJhi99IVr0TdhkmMzanV7Dr0WGwaU63CBFwPoaAhdBEALw_wcB (visited on 05/09/2020).
- [141] *2023 sanayi strateji belgesi*. [Online]. Available: <https://www.sanayi.gov.tr/assets/pdf/SanayiStratejiBelgesi2023.pdf> (visited on 05/09/2020).
- [142] *TCMB - Kurlar*. [Online]. Available: https://www.tcmb.gov.tr/kurlar/kurlar_tr.html (visited on 05/09/2020).

A

3B model ve devre çizimleri

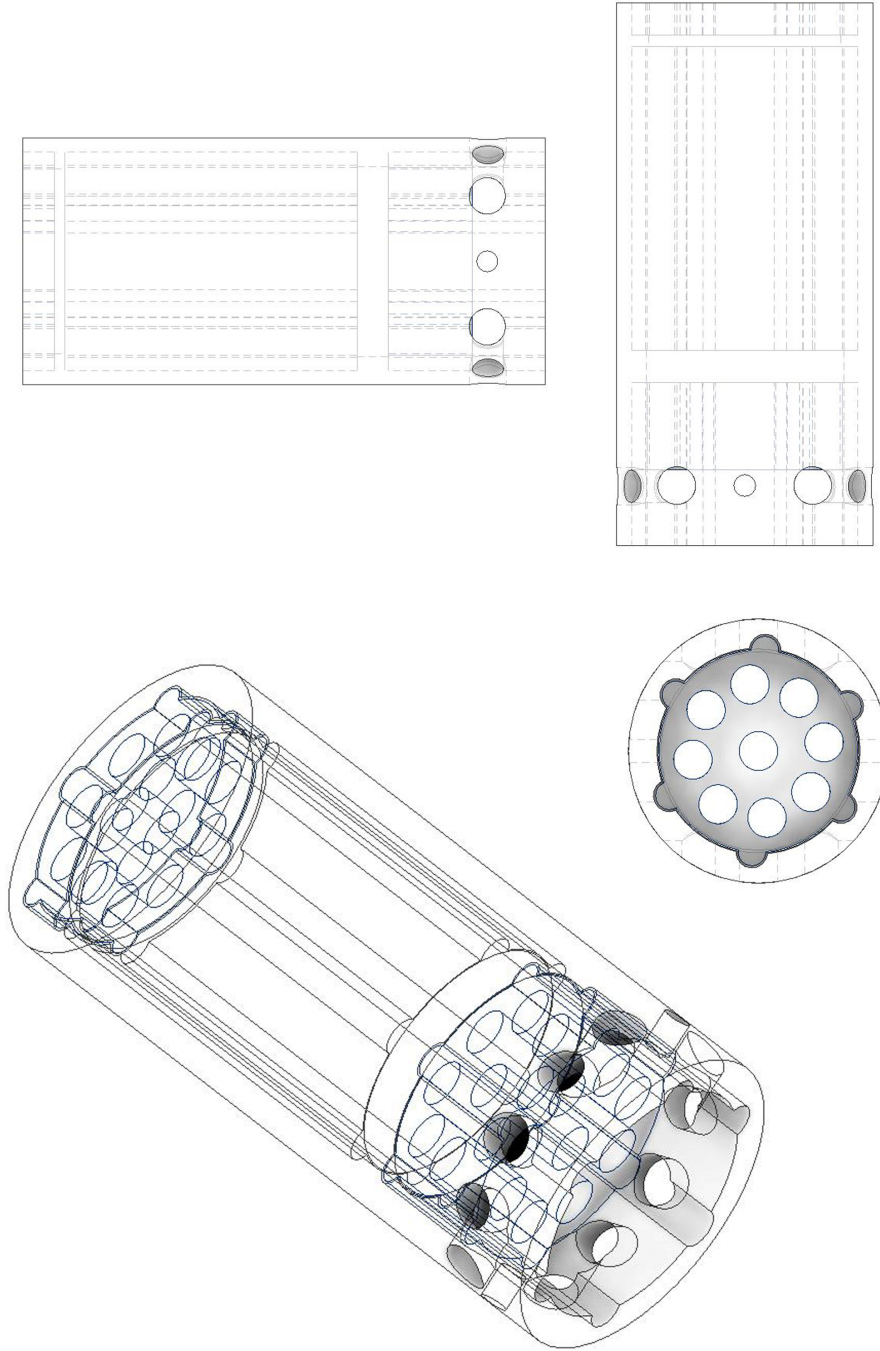
A.1 Modeller

A.1.1 5 kanallı sensör tutucu



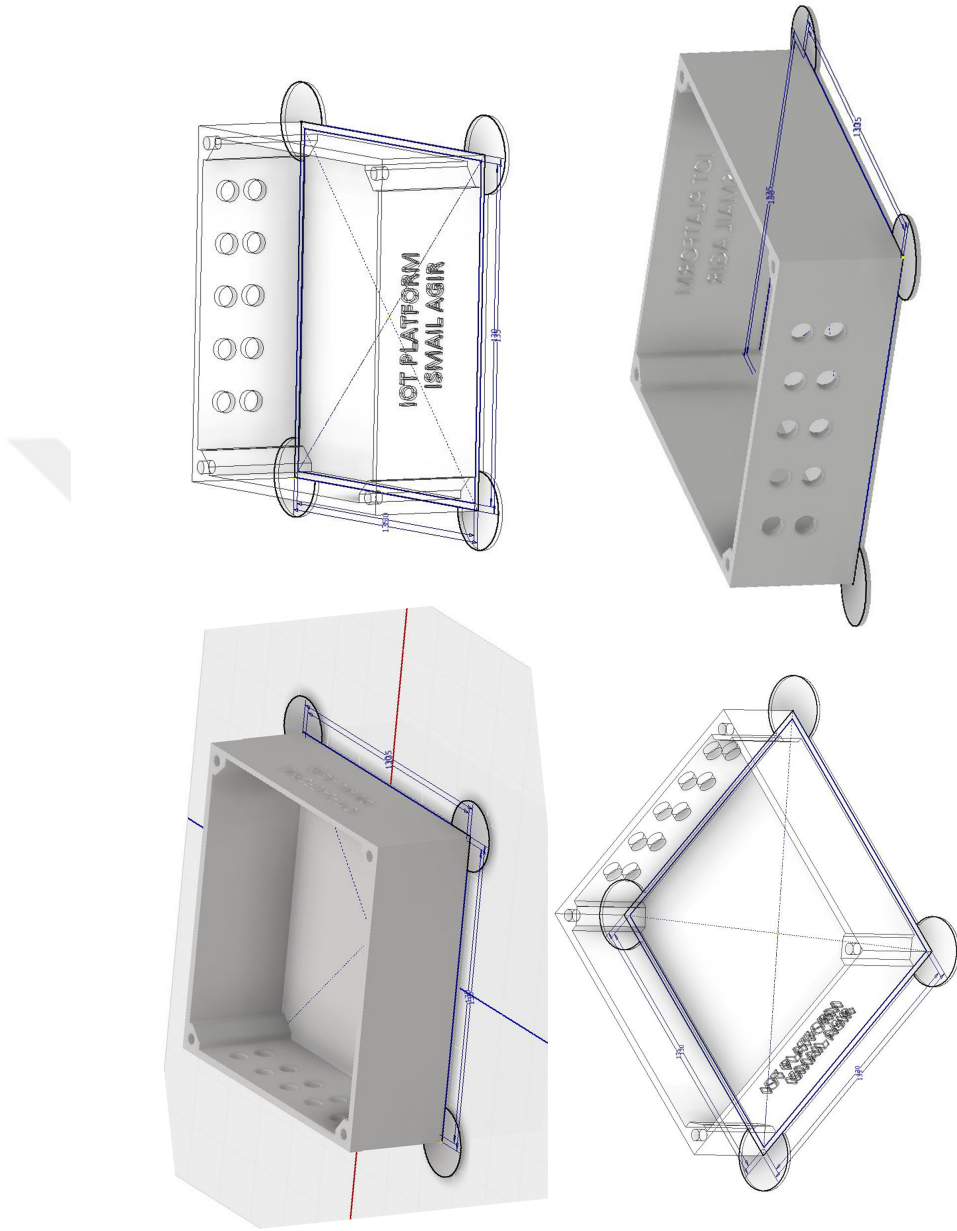
Şekil A.1 Farklı açılardan 5 kanallı tutucunun çizimi

A.1.2 9 kanallı sensör tutucu



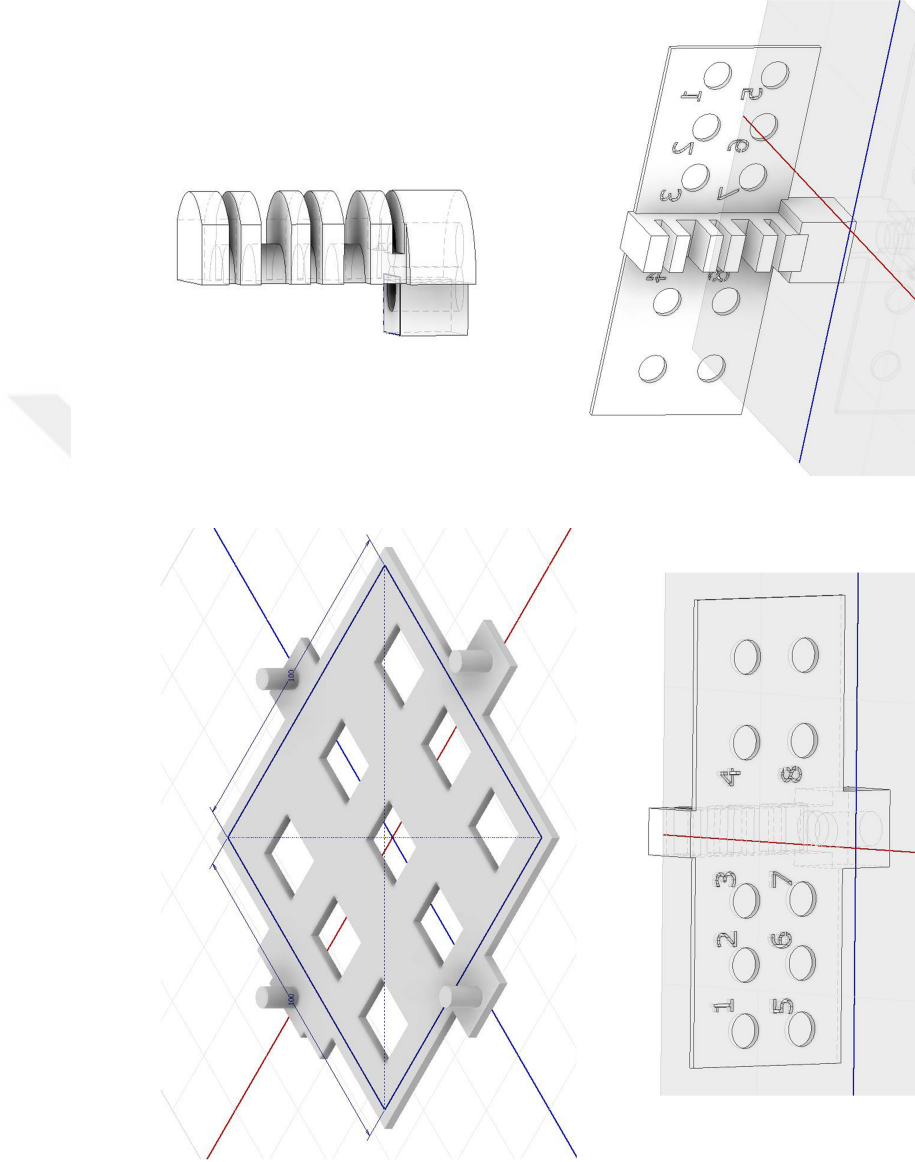
Şekil A.2 Farklı açılardan 9 kanallı tutucunun çizimi

A.1.3 Platform kutu tasarımı



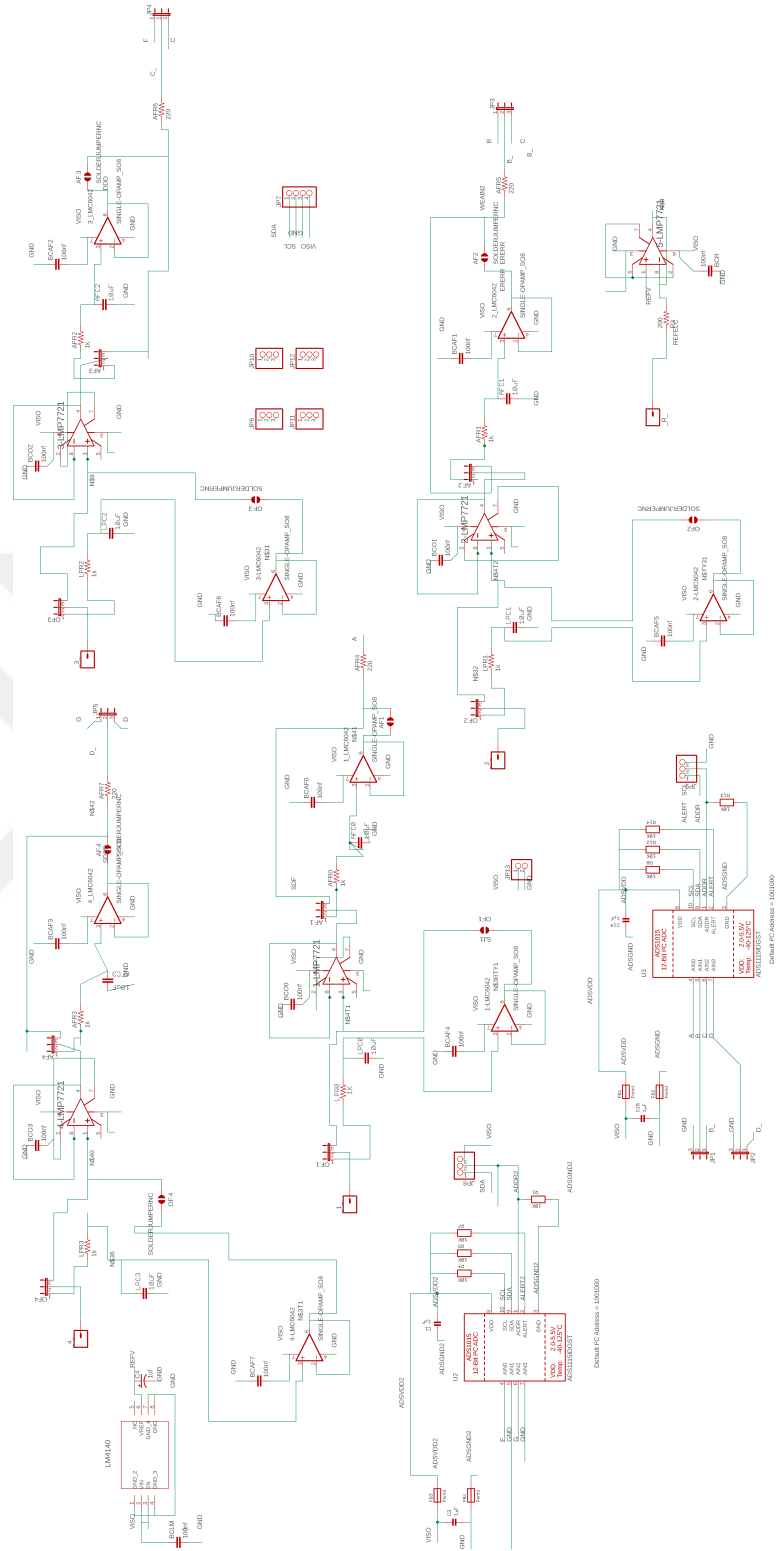
Şekil A.3 9 kanal yollu platform kutusu tasarımı

A.1.4 4 katmanlı PCB stack tutucu



Şekil A.4 9 kanal yollu, 4 katman PCB yığın yapabilen tutucunun parçaları

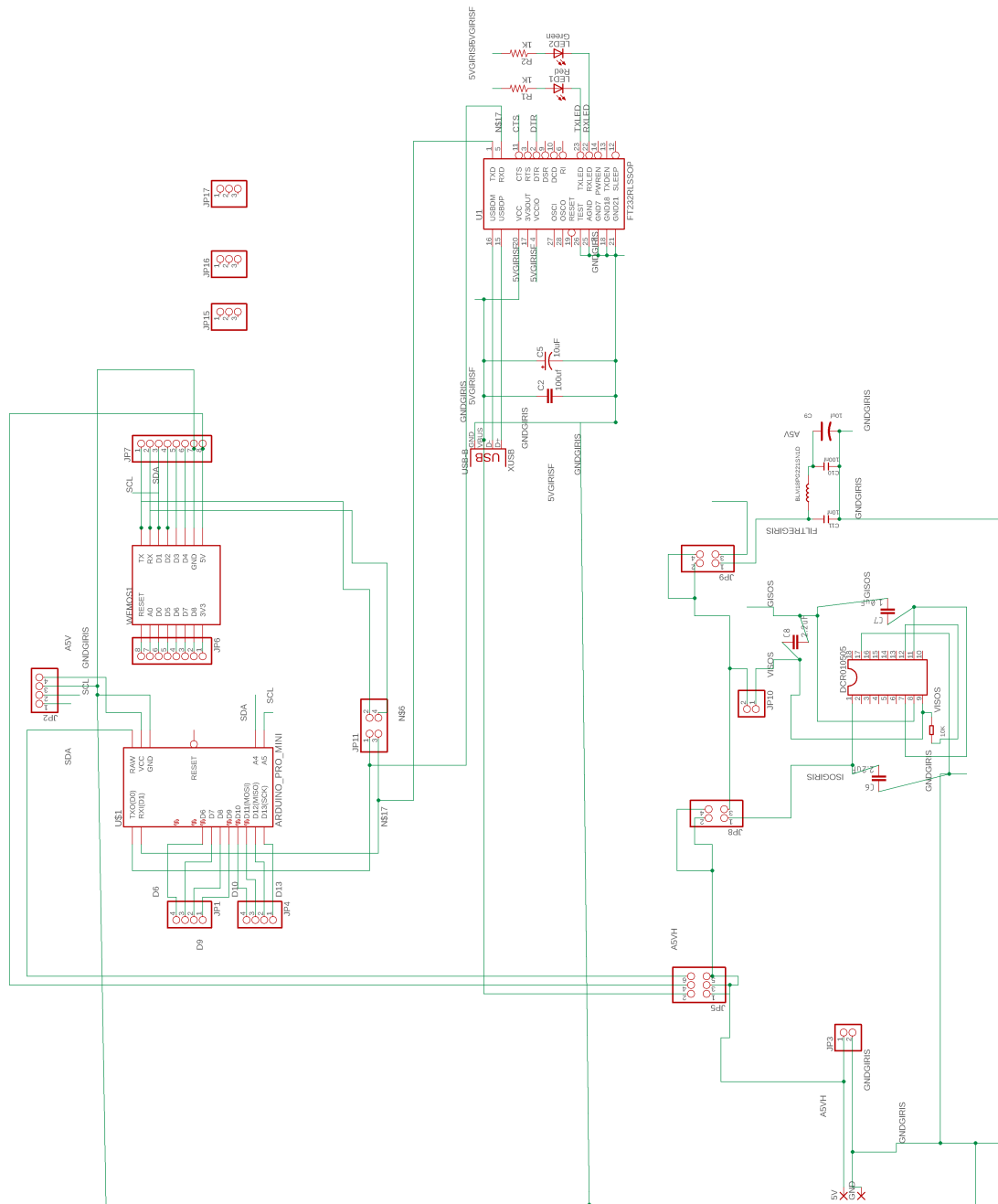
A.2.2 Basılı devre kartı üst katman şematiği 2



Şekil A.6 Basılı devre kartı üst katman şematiği 2

102

A.2.4 Basılı devre kartı alt katman şematiği 2



Şekil A.8 Basılı devre kartı alt katman şematiği 2

B.1 Güç tasarrufu, derin uyku testi

```
1 # -*- coding: utf-8 -*-
2 """
3 IDM-8341 multimeter USB current measurement script.
4 -Set current measurement profile on the multimeter before
   running file.
5 -This scripty only saves what the multimeter shows on its first
   display.
6 @author: ismail agir
7 e-mail: agr.isml@gmail.com
8 http://github.com/ismailagir
9 """
10 import serial
11 import time
12 import matplotlib.pyplot as plt
13 from matplotlib.ticker import (AutoMinorLocator,
14                               MultipleLocator)
15 fig, ax = plt.subplots(1, 1, figsize=(7, 7))
16 DefaultSize = fig.get_size_inches()
17 print (DefaultSize)
18 s = serial.Serial('COM3', 115200)
19 yyy = []
20 xxx = []
21 ke=0
22 start = time.time()
23 while ke<5000:
24     #s.write("MEASure:CURRent:DC?\n".encode())
25     s.write("VAL1?\n".encode())
26     res = s.readline()
27     res =res.decode('utf-8')
28     res =res.rstrip()
29     end = time.time()
30     print(res)
31     xxx.append(end - start)
32     yyy.append(float(res))
33     ke=ke+1
34 s.close()
35 ax.plot(xxx, yyy, '--', linewidth=1, markersize=4, fillstyle='none')
36 plt.xlabel('Time (seconds)', fontsize=10, weight='normal')
37 plt.ylabel('Current (mA)', fontsize=10, weight='normal')
38 plt.xticks(fontsize=10, rotation=0, weight='normal')
39 plt.yticks(fontsize=10, rotation=0, weight='normal')
40 ax.xaxis.set_major_locator(MultipleLocator(5))
```

```

40 ax.yaxis.set_major_locator(MultipleLocator(20))
41 ax.xaxis.set_minor_locator(AutoMinorLocator(5))
42 ax.yaxis.set_minor_locator(AutoMinorLocator(5))
43 ax.tick_params(axis="y",direction="in", length=8)
44 ax.tick_params(axis="x",direction="in", length=8)
45 fig.savefig('test2png.png', dpi=1000)
46 plt.show()
47 zipped=zip(xxx,yyy)
48 with open('output.txt', 'w') as f:
49     for item in zipped:
50         f.write('%s\n'%str(item))

```

B.2 Derin uygu güç tasarrufu gömülü test kodu

```

1  /*
2  ESP8266 arduino code to test deep sleep power consumption and
    wake up time
3  @author: ismail agir
4  e-mail: agr.isml@gmail.com
5  http://github.com/ismailagir
6  */
7  #include <ESP8266WiFi.h>
8  #include <WiFiUdp.h>
9  long f;
10 void setup() {
11     f=millis();
12     Serial.begin(115200);
13 }
14 WiFiUDP Udp;
15 void loop() {
16     const char* ssid7 = "***";
17     const char* password7 = "****";
18     WiFi.mode(WIFI_STA);
19     Serial.printf("Connecting to %s/n" , ssid7);
20     WiFi.begin(ssid7, password7);
21     Udp.begin(4343);
22     Serial.printf("IP %s, UDP port %d\n", WiFi.localIP().toString
        ().c_str(), 4343);
23     Serial.println("Connected");
24     IPAddress ip(192, 168, 1, 1);
25     Udp.beginPacket(ip, 4343);
26     char h[] = "Ping"; // cevap
27     sprintf (h, "%s", WiFi.localIP().toString().c_str());
28     Udp.write(h);
29     Udp.endPacket();
30     Serial.println(millis()-f);
31     //delay(3000);
32     ESP.deepSleep(2*1000*1000);
33 }

```

B.3 RSSI ölçme testi

```

1  /*@author: ismail agir
2  e-mail: agr.isml@gmail.com
3  http://github.com/ismailagir */

```

```

4 #include <Wire.h>
5 #include <Adafruit_SSD1306.h> //
6 #include <Adafruit_GFX.h>
7 #include <WiFi.h>
8 #include <WiFiClient.h>
9 Adafruit_SSD1306 display(128, 64, &Wire, -1);
10 void setup() {
11     Serial.begin(115200);
12     WiFi.mode(WIFI_STA);
13     WiFi.disconnect();
14     delay(100);
15     Serial.println("tamam!");
16     Wire.begin(5, 4);
17
18     if(!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C, false, false))
19     {
20         Serial.println(F("hata"));
21         for(;;);
22     }
23     display.clearDisplay();
24     display.display();
25 }
26 void loop() {
27     Serial.println("tara");
28     int n = WiFi.scanNetworks();
29     Serial.println("tarama tamam");
30     if (n == 0) {
31         Serial.println("bulunan ag yok");
32     } else {
33         Serial.print(n);
34         Serial.println(" bulunan aglar");
35         for (int i = 0; i < n; ++i) {
36
37             Serial.print(i + 1);
38             Serial.print(": ");
39             Serial.print(WiFi.SSID(i));
40             Serial.print(" (");
41             Serial.print(WiFi.RSSI(i));
42             Serial.print(")");
43             Serial.println((WiFi.encryptionType(i) ==
WIFI_AUTH_OPEN)? " ":"*");
44             if(WiFi.SSID(i)=="isn"||WiFi.SSID(i)=="ism2"||WiFi.
SSID(i)=="Sss")
45             {
46                 display.clearDisplay();
47                 display.display();
48                 display.setTextSize(3);
49                 display.setTextColor(WHITE);
50                 display.setCursor(0, 0);
51                 display.println(WiFi.SSID(i)); display.display();
52                 display.print(WiFi.RSSI(i));
53                 display.println(" dBm");
54                 display.display();
55                 delay(10);
56             }
57         }
58         delay(10);

```



```

59     }
60
61     Serial.println("");
62     delay(2000);
63 }

```

B.4 Yeniden bağlanma testi

Kod sadeleştirilmiştir.

```

1  /*@author: ismail agir
2  e-mail: agr.isml@gmail.com
3  http://github.com/ismailagir */
4  void loop()
5  {
6
7      if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
8          connectiontimes++;
9          WiFi.begin(ssid, password);
10         Serial.printf("Baglanan yer %s" , ssid);
11         while (WiFi.status() != WL_CONNECTED)
12         {
13             delay(500);
14             Serial.print(".");
15         }
16         Serial.print(connectiontimes);
17         Serial.println(" tekrar baglanildi");
18     }
19     .
20     .
21     .
22     .
23     if (started == true)
24     {
25
26         if ((millis() - stime) > interval&&uyku==0||ilkatis)
27         {
28             ilkatis=false;
29             Udp.beginPacket(rip, 4343);
30             .
31             .
32             //4 kanal ISE
33             sprintf (replyPacekt, "%d %d %d %d", adc0, adc1, adc2, adc3);
34             // 8 kanal
35             //sprintf (replyPacekt, "%d %d %d %d %d %d %d %d", adc0,
36             adc1, adc2, adc3, adc20, adc21, adc22, adc23);
37             Serial.print("sent ");
38             Serial.println(replyPacekt);
39             Udp.write(replyPacekt);
40             Udp.endPacket();
41             stime = millis();
42         }
43         .
44         .
45     }

```

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makale

1. I. Agir, R. Yildirim, M.Nigde, I. Isildak, 'Internet of Things Implementation of Nitrate and Ammonium Sensors for Online Water Monitoring', Analytical Sciences, 20P396, 2020, DOI:10.2116/analsci.20p396.

Konferans Bildirisi

1. I. Agir, 'Simple and Fast 3D Printing Method for Fabrication of Ion Selective Sensor Arrays', in Icce-25, Rome: icce, 2017, p. 103.