

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**SU PARAMETRELERİNİN ÇEVİRİMİÇİ İZLEMESİ VE CBS
KULLANILARAK DEĞERLENDİRİLMESİ AMACI İLE OTONOM İNSANSIZ
YÜZEY ARACI GELİŞTİRİLMESİ**

Hüseyin DURAN

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
UZAKTAN ALGILAMA VE COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ
ANABİLİM DALI**

DOKTORA TEZİ

HAZİRAN 2025

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**SU PARAMETRELERİNİN ÇEVİRİMİÇİ İZLEMESİ VE CBS
KULLANILARAK DEĞERLENDİRİLMESİ AMACI İLE OTONOM İNSANSIZ
YÜZEY ARACI GELİŞTİRİLMESİ**

Hüseyin DURAN

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
UZAKTAN ALGILAMA VE COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ
ANABİLİM DALI**

DOKTORA TEZİ

HAZİRAN 2025

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SU PARAMETRELERİNİN ÇEVİRİMİÇİ İZLEMESİ VE CBS
KULLANILARAK DEĞERLENDİRİLMESİ AMACI İLE OTONOM İNSANSIZ
YÜZEY ARACI GELİŞTİRİLMESİ**

Hüseyin DURAN

UZAKTAN ALGILAMA VE COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

Bu tez 26/06/2025 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof.Dr. Namık Kemal SÖNMEZ (Danışman)

Doç.Dr. Serdar SELİM

Doç.Dr. B. Ahmet BALCI

Doç.Dr. İlker ÜNAL

Dr.Öğr.Üyesi Mesut ÇOŞLU

ÖZET

SU PARAMETRELERİNİN ÇEVİRİMİÇİ İZLEMESİ VE CBS KULLANILARAK DEĞERLENDİRİLMESİ AMACI İLE OTONOM İNSANSIZ YÜZEY ARACI GELİŞTİRİLMESİ

Hüseyin DURAN

Doktora Tezi, Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Namık Kemal SÖNMEZ

Haziran 2025; 101 sayfa

Bu tez çalışmasında, deniz ve göl gibi su alanlarında fiziksel su parametrelerinin gerçek zamanlı ve otonom biçimde izlenmesini sağlayan bir İnsansız Yüzey Aracı (İYA) sistemi geliştirilmiştir. Sistem; sıcaklık, pH, iletkenlik, çözünmüş oksijen ve oksidasyon-redüksiyon potansiyeli gibi temel su kalitesi parametrelerini ölçebilen çoklu sensörler ile GPS, LiDAR, dijital pusula, haberleşme modülleri, batarya ve enerji birimlerinden oluşmaktadır. Yazılım altyapısı, İYA üzerinde Python (Raspberry Pi), ölçüm biriminde C (Atmega 324P), kontrol biriminde C++ (Arduino Uno), kontrol merkezinde ise C#, JavaScript, HTML ve CSS kullanılarak geliştirilmiştir. Motor kontrolü, engellerden kaçınma, veri iletimi ve görev yürütme işlemleri Python ile gerçekleştirilmiştir. İYA, hem manuel hem de otonom modda çalışacak şekilde tasarlanmış ve web tabanlı bir arayüz üzerinden yönetilmektedir. Kullanıcı, harita tabanlı arayüz aracılığıyla görev noktaları tanımlayabilmekte; sistem bu noktalara ulaşp gerekli ölçümleri yapmakta ve verileri gerçek zamanlı olarak kontrol paneline iletmektedir. Veri iletimi; donanım düzeyinde ZigBee ve GSM modülü, uygulama düzeyinde ise SignalR ve RESTful API gibi iletişim teknolojileri aracılığıyla sağlanmaktadır. Ayrıca, laboratuvar koşullarında test edilebilecek şekilde numune alma işlevi de sisteme entegre edilmiştir. Toplanan su verileri, Coğrafi Bilgi Sistemleri kapsamında IDW, Kriging, Spline ve Doğal Komşu gibi farklı enterpolasyon yöntemleriyle işlenmekte ve anlık alansal dağılım haritaları oluşturulabilmektedir. Bu sayede, çevresel değişimlerin mekânsal analizi mümkün hale gelmektedir.

Gerçekleştirilen dört farklı saha testinde İYA, toplam 2237,26 metre yol katetmiş ve kuş uçuşu mesafe ile karşılaştırıldığında yaklaşık %96,5 oranında en uygun rota

izlenebilmiştir. Görevler yaklaşık 79 dakikada tamamlanmış, bunun 44 dakikası su parametrelerinin ölçümü ve numune alımı süreci olarak gözlemlenmiştir. Toplam 24 görev noktasından görev noktalarına 3 metrelik toleransla ulaşımında %66 başarı elde edilmiştir. Engel tanıma testlerinde, karşısına çıkan 10 engelin 6'sı çarpmadan geçilmiş; otonom sürüş modunda ise tüm engellerden başarılı şekilde kaçınılmıştır. Saha testlerinde elde edilen 120 farklı su parametre değeri, kontrol paneli üzerinden gerçek zamanlı işlemlerden geçirilip IDW, Kriging, Spline ve Doğal Komşu gibi farklı enterpolasyon yöntemleriyle alansal dağılım haritaları oluşturulmuştur. Buna ek olarak gerçek zamanlı harita üzerinde parametre değerleri gösterilmiştir.

Bu tez çalışması, düşük maliyetli, modüler ve kullanıcı dostu yapısıyla çevresel izleme sistemlerine yenilikçi bir yaklaşım sunmakta hem akademik araştırmalar hem de uygulamalı çalışmalar için etkin ve sürdürülebilir bir çözüm oluşturmaktadır.

ANAHTAR KELİMELELER: Coğrafi Bilgi Sistemleri, Enterpolasyon, Gerçek Zamanlı İzleme, İnsansız Yüzey Aracı, Otonom Sistemler, Su Kalitesi İzleme

JÜRİ: Prof.Dr. Namık Kemal SÖNMEZ

Doç.Dr. Serdar SELİM

Doç.Dr. B. Ahmet BALCI

Doç.Dr. İlker ÜNAL

Dr.Öğr.Üyesi Mesut ÇOŞLU

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF AUTONOMOUS UNMANNED SURFACE VEHICLE FOR ONLINE MONITORING AND EVALUATION OF WATER PARAMETERS USING GIS

Hüseyin DURAN

PhD, Thesis in Remote Sensing and Geographic Information Systems Department

Supervisor: Prof. Dr. Namık Kemal SÖNMEZ

June 2025; 101 pages

In this thesis, an Unmanned Surface Vehicle (USV) system has been developed to enable real-time and autonomous monitoring of physical water parameters in aquatic environments such as seas and lakes. The system comprises multiple sensors capable of measuring key water quality parameters including temperature, pH, conductivity, dissolved oxygen and oxidation-reduction potential as well as components such as GPS for location tracking, LiDAR for obstacle detection, a digital compass for directional control, communication modules, a battery, and a power system. The software infrastructure has been developed using Python on the Raspberry Pi for the USV, C on the Atmega 324P microcontroller for the water measurement unit, C++ on the Arduino Uno for the control unit, and C#, JavaScript, HTML, and CSS for the web-based control center. Tasks such as motor control, obstacle avoidance, data transmission, and mission execution are performed using Python on the USV. The USV is designed to operate in both manual and autonomous modes and is managed through a web-based interface integrated into the control center. Through the map-based interface, the user can define mission points; the system then navigates to these points, conducts the necessary measurements, and transmits the data to the control panel in real time. Data transmission is achieved through communication technologies such as ZigBee and the GSM module at the hardware level, and SignalR and RESTful API at the application level. Additionally, the system includes a sample collection mechanism suitable for testing in laboratory conditions. The collected water quality data are processed within the scope of Geographic Information Systems using various interpolation methods, including IDW, Kriging, Spline, and Natural Neighbor, to generate real-time spatial distribution maps. This capability allows for the spatial analysis of environmental changes.

In four different field tests, the USV travelled a total distance of 2,237.26 meters. When compared to the straight-line (as-the-crow-flies) distance, it was observed that the USV followed an optimal route with an accuracy of approximately 96.5%. The missions were completed in approximately 79 minutes, of which 44 minutes were dedicated to measuring water parameters and collecting samples. Out of 24 designated task points, the vehicle successfully reached 66% of them within a 3-meter tolerance. In obstacle detection tests, 6 out of 10 obstacles encountered were avoided without collision; in autonomous driving mode, all obstacles were avoided. A total of 120 different water parameter values obtained during field tests were processed in real-time through the control panel, and spatial distribution maps were generated using various interpolation methods such as IDW, Kriging, Spline, and Natural Neighbor. In addition, the parameter values were displayed in real time on the map.

This thesis contributes a novel approach to environmental monitoring systems through a low-cost, modular, and user-friendly design, offering an effective and sustainable solution for both academic research and practical field applications.

KEYWORDS: Autonomous Systems, Geographic Information Systems, Interpolation, Real-Time Monitoring, Unmanned Surface Vehicle, Water Quality Monitoring

COMMITTEE: Prof.Dr. Namık Kemal SÖNMEZ

Assoc.Prof.Dr. Serdar SELİM

Assoc.Prof.Dr. B. Ahmet BALCI

Assoc.Prof.Dr. İlker ÜNAL

Asst.Prof.Dr. Mesut ÇOŞLU

ÖNSÖZ

Su, yaşamın en temel yapı taşlarından biri olmasına rağmen, artan nüfus, kentleşme, endüstriyel gelişmeler ve iklim değişikliği gibi nedenlerle her geçen gün daha fazla kirlenmekte ve ulaşılması güç hale gelmektedir. Bu durum, su kaynaklarının daha hassas, sürekli ve bilimsel temellere dayalı biçimde izlenmesini zorunlu kılmaktadır. Gelişen teknoloji ile çevresel izleme yöntemlerinde de önemli dönüşümler yaşanmakta; klasik yöntemlerin yerini, gerçek zamanlı, otomatik ve otonom sistemler almaktadır.

Bu bağlamda yürütülen bu tez çalışmasında, su kalitesinin çevrim içi ve otonom bir şekilde izlenmesini sağlayan bir İnsansız Yüzey Aracı (İYA) sistemi geliştirilmiş ve bu sistem Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile entegre edilerek verilerin mekânsal analizi gerçekleştirilmiştir. Hem donanım hem de yazılım yönüyle özgün olarak kurgulanan bu sistemin geliştirilme maliyeti ve süreci, uzun ve yoğun bir çaba gerektirmiştir. Bu süreçte yalnızca teknik bilgiler değil, sabır, disiplin, sorgulayıcı düşünme ve çözüm odaklı yaklaşım gibi pek çok beceri kazanılmıştır.

Çalışmam boyunca beni teşvik eden, bilgi ve deneyimiyle yol gösteren, eleştirel bakış açısıyla katkı sunan ve her aşamada destekleyen değerli danışmanım Prof. Dr. Namık Kemal Sönmez'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Akademik hayatım boyunca bana rehberlik eden başta Doç. Dr. Fırat YÜCEL olmak üzere tüm hocalarıma ve saha süreçlerinde desteğini esirgemeyen arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

Ayrıca, bu süreçte yanımda olan, moral ve motivasyon kaynağım olan aileme, özellikle de her koşulda destek veren sevgili eşim Burcu ve çocuklarım Ali ve Ata'ya şükranlarımı sunuyorum. Onların sabrı ve anlayışı olmadan bu çalışmayı tamamlamak mümkün olmazdı.

Bu tez çalışmasının, su kalitesi izleme sistemleri, otonom çevre teknolojileri ve coğrafi bilgi sistemleri alanlarına katkı sağlayacağına; akademik ve uygulamalı çalışmalara ilham vereceğine inanıyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vi
AKADEMİK BEYAN	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK TARAMASI	4
2.1 İnsansız Yüzey Araçları	5
2.1.1 Sensör modülü.....	5
2.1.2 Bellek modülü	7
2.1.3 Konumlandırma modülü	9
2.1.4 Hareket ve yönlendirme modülü.....	9
2.1.5 Enerji modülü.....	11
2.1.6 Mikrodenetleyici / Mikrobilgisayar modülü	11
2.1.7 İletişim modülü	12
2.1.8 Kontrol istasyonu	14
2.1.9 İYA gövde tasarımı	15
2.2 Otonom Hareket ve Engel Algılama Sistemleri.....	16
2.3 CBS ile Su Parametrelerinin Değerlendirilmesi	17
2.3.1 Ters mesafe ağırlıklandırması (IDW)	18
2.3.2 Kriging	18
2.3.3 Spline	19
2.3.4 Doğal komşu	19
3. MATERYAL VE METOT	20
3.1 Su Parametreleri Ölçüm Sistemi Donanımı	20
3.1.1 Sensörler.....	20
3.1.2 Mikrodenetleyici	22
3.1.3 Pompa.....	24
3.1.4 Enerji modülü.....	25

3.1.5	Haberleşme modülü	25
3.1.6	Su parametrelerini ölçüm sistemi devre kartı.....	26
3.2	Su Parametreleri Ölçüm Sistemi Tasarımı	29
3.3	Su Parametreleri Ölçüm Sistemi Yazılımı	31
3.4	İnsansız Yüzey Aracı Donanım	34
3.4.1	Hareket sistemi.....	34
3.4.2	Konumlandırma sistemi	35
3.4.3	Haberleşme sistemi	37
3.4.4	İYA kontrol ünitesi	38
3.5	Uzaktan Kumanda.....	39
3.6	İYA Tasarımı	40
3.7	İYA Yazılımı.....	42
3.8	Kontrol Paneli	50
4.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	58
4.1	İYA Donanım ve Yazılımı	58
4.2	Kumanda Kontrollü Çalışmalar	60
4.3	Otonom Modda Çalışmalar	64
4.4	Su Parametresi Verileri ve CBS Kullanılarak Değerlendirilmesi	75
4.5	Sistem Performansı	81
5.	SONUÇ	85
6.	KAYNAKLAR	90
ÖZGEÇMİŞ		

AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “SU PARAMETRELERİNİN ÇEVİRİMİÇİ İZLEMESİ VE CBS KULLANILARAK DEĞERLENDİRİLMESİ AMACI İLE OTONOM İNSANSIZ YÜZEY ARACI GELİŞTİRİLMESİ” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

26/06/2025

Hüseyin DURAN



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

°	: Derece
%	: Yüzde
<	: Küçüktür
>	: Büyüktür
≤	: Küçük Eşittir
≥	: Büyük Eşittir
°C	: Derece Celsius
A	: Amper
Ah	: Amper-saat
cm	: Santimetre
dBm	: Desibel-miliwatt
g	: Gram
GHz	: Gigahertz
GB	: Gigabyte
ha	: Hektar
Hz	: Hertz
kB	: Kilobyte
kg	: Kilogram
km	: Kilometre
kW	: Kilowatt
l	: Litre
m	: Metre
mA	: Miliamper
mAh	: Miliamper Saat

Mbps : Megabits per second

mg : Miligram

MHz : Megahertz

ml : Mililitre

mm : Milimetre

ms : Milisaniye

mV :Milivolt

mW :Miliwatt

pH : Hidrojen İyonu

ppm : Part Per Million

sn : Saniye

V : Volt

W : Watt

Wp : Maksimum Watt gücü

μ S : Mikrosiemens

μ A : Mikroamper

“20.25” Ondalık Ayırıcı

Kısaltmalar

4G : 4. Nesil Kablosuz Mobil İletişim Sistemi

ADC : Analog-Dijital Dönüştürücü

API : Uygulama Programlama Arayüzü

ARM : Gelişmiş RISC Mimarisi

AS : Atlas Scientific

ASP : Etkin Sunucu Sayfaları

AT : Modül iletişim komutları

BDS	: BeiDou Uydu Konumlama Sistemi
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemleri
CNN	: Evrişimli Sinir Ağı
COLREG	: Uluslararası Denizde Çatışmayı Önleme Kuralları
CPU	: Merkezi İşlem Birimi
CSS	: Cascading Style Sheets
CSV	: Virgülle Ayrılmış Değerler
DC	: Doğru Akım
DO	: Çözünmüş Oksijen
EC	: Elektriksel İletkenlik
EDGE	: GSM Gelişimi için Artırılmış Veri Hızları
EEPROM	: Elektrikle Silinebilen Programlanabilir Salt Okunur Bellek
FPGA	: Alanda Programlanabilir Kapı Dizisi
GIS	: Geographic Information System
GLONASS	: Küresel Konumlama Uydu Sistemi
GNC	: Kılavuzluk Seyrüsefer ve Kontrol
GPIO	: Genel Amaçlı Giriş/Çıkış
GPRS	: Genel Paket Radyo Servisi
GPS	: Küresel Konumlandırma Sistemi
GPU	: Grafik İşlem Birimi
GSM	: Küresel Mobil İletişim Sistemi
HDPE	: Yüksek Yoğunluklu Polietilen
HSPA	: Yüksek Hızlı Paket Erişimi
HTML	: HyperText Markup Language
HTTP	: HyperText Transfer Protocol
I/O	: Giriş/Çıkış

I2C	: Inter-Integrated Circuit
ID	: Tanımlayıcı
IDW	: Ters Mesafe Ağırlıklı Yöntem
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMO	: Uluslararası Denizcilik Örgütü
IMU	: Inertial Measurement Unit
İYA	: İnsansız Yüzey Aracı
JSON	: JavaScript Nesne Gösterimi
LiDAR	: Light Detection and Ranging
LPDDR	: Low Power Double Data Rate
LSB	: En Az Önemli Bit / Bayt
LTE	: Long Term Evolution
MSB	: En Çok Önemli Bit / Bayt
MUX	: Çoklayıcı
MVC	: Model-Görünüm-Denetleyici
ORP	: Oksidasyon İndirgenme Potansiyeli
PID	: Oransal-Türevsel-Bütünleşik Denetim
PPP	: Noktadan Noktaya Protokol
PVC	: Polivinil Klorür
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
QZSS	: Yarı-Zenit Uydu Sistemi
RAM	: Rastgele Erişimli Bellek
RESTful API	: Representational State Transfer Application Programming Interface
RPM	: Revolutions Per Minute
SD	: Secure Digital
SIM	: Subscriber Identity Module

SPI	: Seri Çevre Birimi Arayüzü
SRAM	: Statik Rastgele Erişimli Bellek
TTL	: Transistor-Transistor Logic
UART	: Evrensel Asenkron Alıcı-Verici
UMTS	: Universal Mobile Telecommunications System
USART	: Evrensel Senkron/Asenkron Alıcı-Verici
USB	: Evrensel Seri Veri Yolu
USV	: Unmanned Surface Vehicle
UTC	: Eşgüdümlü Evrensel Zaman

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Tipik bir İYA konfigürasyonu.....	5
Şekil 2.2. İYA kabuk tasarımları a) Düz tabanlı; b) V-tabanlı; c) Yuvarlak tabanlı; d) Katamaran.....	15
Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan sensörler a) EC sensörü; b) pH sensörü; c) ORP sensörü; d) DO sensörü; e) Sıcaklık sensörü	21
Şekil 3.2. Atmega 324 mikrodenetleyici pin konfigürasyonu (Atmel 2016).....	23
Şekil 3.3. Peristaltik pompalar	24
Şekil 3.4. Hidrofor su pompası	25
Şekil 3.5. XBee Pro S2C modeli (Digi, 2025).....	26
Şekil 3.6. Su parametresi ölçüm sistemi devre kartı.....	27
Şekil 3.7. Su parametre ölçüm sistemi devre kartı bağlantı şeması.....	28
Şekil 3.8. Su parametreleri sistemi hortum başlığı	29
Şekil 3.9. Su parametre ölçüm ve numune alımı boru hattı bağlantı şeması	30
Şekil 3.10. Ana hat borusu pompa bağlantısı ve tahliye sistemi.....	30
Şekil 3.11. Su parametreleri ölçüm ve numune alım sistemi.....	31
Şekil 3.12. Kalibrasyon işlemleri a) EC sensörü kalibrasyonu; b) pH sensörü kalibrasyonu; c) OPR sensörü kalibrasyonu; d) DO sensörü kalibrasyonu; e) Sıcaklık sensörü kalibrasyonu; f) Sensör temizleme	32
Şekil 3.13. Su parametre ölçüm sistemi yazılım algoritması.....	34
Şekil 3.14. a) Fırçalı motor; b) 30 cm'lik şaft; c) Güç pervanesi; d) Motor Sürücüsü ..	35
Şekil 3.15. NEO-M8 GPS Modülü (Ublox 2025)	36
Şekil 3.16. Dijital Pusula (Honeywell 2025)	36
Şekil 3.17. LiDAR (LDRobot 2025)	37
Şekil 3.18. SIM7600G-H Modülü (SIMCom 2025).....	38
Şekil 3.19. Raspberry Pi 4 mini bilgisayar (Raspberry Pi 2025).....	39
Şekil 3.20. İYA kontrolü için geliştirilen uzaktan kumanda	40
Şekil 3.21. İYA haberleşme ve konumlandırma platformu a) Önden görünüşü; b) Soldan görünüşü	41
Şekil 3.22. İYA dış tasarımı	41
Şekil 3.23. İYA iç tasarımı a) Sol kabuk; b) Sağ kabuk	42
Şekil 3.24. LiDAR veri paketi formatı	43
Şekil 3.25. LiDAR verileri bölümlendirme ve filtreleme	44
Şekil 3.26. Örnek görev listesi.....	47
Şekil 3.27. İYA otonom çalışma algoritması	48
Şekil 3.28. Otonom görev tanımı a) Alan seçimi; b) 10 görev noktalı; c) 40 görev noktalı.....	51
Şekil 3.29. Manuel görev rotası a) Görev noktası seçimi; b) Görev noktası bilgisi.....	51
Şekil 3.30. İYA gerçek zamanlı izleme ve görev talimatı iletme sayfası.....	52
Şekil 3.31. İYA uzaktan kontrol bölümü.....	53
Şekil 3.32. Su parametreleri listeleme ve indirme sayfası	53
Şekil 3.33. Alansal dağılım haritaları renk skalası	56
Şekil 3.34. İYA çalışma alanı sınırları belirleme sayfası	57
Şekil 3.35. Gerçek zamanlı toplanan İYA verileri	57

Şekil 4.1. Havuzda yapılan kumanda kontrollü deney	60
Şekil 4.2. Otonom deney çalışmaları	64
Şekil 4.3. Manuel plan a) Plan 1 rotası; b) Plan 2 rotası	66
Şekil 4.4. Numune kabı ve toplanan su	67
Şekil 4.5. Manuel koordinat seçimine göre yapılan denemelerde kuş uçuşu yol (mavi) ve İYA hareket yolu (kırmızı) a) Plan1 rotası; b) Plan2 rotası.....	68
Şekil 4.6. Alansal seçim ile görev noktası belirleme; a) 5 noktalı görev; b) 15 noktalı görev; c) 14 noktalı görev.....	69
Şekil 4.7. Görev planı rotaları a) Plan 3 rotası; b) Plan 4 rotası.....	70
Şekil 4.8. Grid yöntemi koordinat seçimine göre yapılan denemelerde kuş uçuşu yol (mavi) ve İYA hareket yolu (kırmızı) a) Plan 3 rota; b) Plan 4 rota.....	71
Şekil 4.9. Plan 1-4 için Kuş uçuşu mesafe ve İYA rotası	72
Şekil 4.10. 4 farklı planda hedef koordinata (noktalara) erişim mesafeleri grafiği	73



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Literatürde yaygın olarak kullanılan su parametresi sensörleri	6
Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan sensörlere ait özellikler	22
Çizelge 3.2. Güneş paneli ve regülatör özellikleri	25
Çizelge 3.3. Veri paketleri formatı	33
Çizelge 3.4. Örnek veri paketi	49
Çizelge 4.1. Motor dönüş kalibrasyon işlemi öncesi ve sonrası elde edilen değerler	61
Çizelge 4.2. Harita üzerinden görev tanımlamaları	65
Çizelge 4.3. Manuel koordinat seçimine göre yapılan denemelerde elde edilen su parametre verileri	67
Çizelge 4.4. Plan 3 ve Plan 4 görev noktalarına göre okunan su parametre verileri	71
Çizelge 4.5. Plan 1'in EC, Sıcaklık, pH, DO ve ORP değerlerinin farklı enterpolasyon yöntemlerine göre oluşan alansal dağılım haritaları ve Google Haritalar tabanlı ısı haritası	76
Çizelge 4.6. Plan 2'in EC, Sıcaklık, pH, DO ve ORP değerlerinin farklı enterpolasyon yöntemlerine göre oluşan alansal dağılım haritaları ve Google Haritalar tabanlı ısı haritası	77
Çizelge 4.7. Plan 3'in EC, Sıcaklık, pH, DO ve ORP değerlerinin farklı enterpolasyon yöntemlerine göre oluşan alansal dağılım haritaları ve Google Haritalar tabanlı ısı haritası	78
Çizelge 4.8. Plan 4'in EC, Sıcaklık, pH, DO ve ORP değerlerinin farklı enterpolasyon yöntemlerine göre oluşan alansal dağılım haritaları ve Google Haritalar tabanlı ısı haritası	79

1. GİRİŞ

Su, yalnızca canlı yaşamı için temel bir gereksinim olmakla kalmayıp; aynı zamanda tarım, sanayi, enerji üretimi gibi pek çok alanda hayati bir kaynak olarak kabul edilmekte ayrıca sucul yaşamın sürdürülebilirliği ve içme suyu temini için vazgeçilmezdir. Peeters vd. (2020), dünya üzerindeki su miktarının 14 milyar km³ hacmi ve bunun sadece %2.5'lik bölümünün tatlı su ile sınırlı olduğunu belirtmektedir. Söz konusu kaynakların çeşitli nedenlerle kirlenmeye açık hale gelmesi, suyun korunmasını ve sürdürülebilir şekilde izlenmesini bir zorunluluk haline getirmiştir. Küresel ölçekte yaşanan hızlı nüfus artışı, endüstriyel faaliyetlerin yaygınlaşması, kontrolsüz tarımsal uygulamalar ve iklim değişikliğinin etkileri su kaynakları üzerinde ciddi baskılar oluşturmaktadır; bu baskılar da su kalitesinin sürekli ve doğru biçimde izlenmesini gerekli kılmaktadır. Özellikle göl, nehir, akarsu ve kıyı suları gibi iç su kaynaklarının kirlenmesi yalnızca doğal ekosistemlerin dengesini tehdit etmekle kalmamakta, aynı zamanda insan sağlığını da doğrudan riske atmaktadır (Chen vd. 2025).

Dünya yüzeyinin büyük bir bölümü su ile kaplı olmasına rağmen, bu su varlıklarının yalnızca çok küçük bir kısmı tatlı su kaynaklarından oluşmaktadır. Ancak bu tatlı su miktarının da yaklaşık %69'u, kutuplarda ve yüksek dağlık bölgelerdeki buzullar içerisinde donmuş halde bulunmaktadır ve insanlar ile diğer canlılar için doğrudan erişilebilir değildir. Tatlı suyun yaklaşık %30'u ise yer altı suyu şeklinde (toprak nemi, bataklık suyu, akifer yatakları vb.) yer almaktadır. Geriye kalan yalnızca %1'lik kısım, atmosferde, toprakta, bitkilerde ve yüzey sularında bulunan ve ekosistemler ile insanlar için doğrudan erişilebilir olan tatlı su miktarını temsil etmektedir (Water Science School 2018).

Mevcut su kaynaklarının kullanım şekline bakıldığında, 2020 yılı itibariyle kullanılan toplam tatlı suyun yaklaşık %69'u tarımda (sulama, hayvancılık, balıkçılık vb.), %19'u sanayi sektöründe ve sadece %12'si içme ve diğer kullanma amaçlı tüketilmektedir. Bununla birlikte, küresel su talebinin her yıl yaklaşık %1 oranında artmaya devam ettiği gözlemlenmektedir. Bu artış trendinin sürmesi durumunda, 2050 yılına kadar toplam su kullanımında %20 ila %30 arasında bir artış yaşanması beklenmektedir (TEMA 2025).

Bu nedenle su kalitesinin izlenmesine yönelik yürütülen çalışmalar, günümüzde ilgili bilim alanlarında önemli bir yer tutmaktadır. Geleneksel izleme yöntemleri genellikle sahada belirli noktalardan manuel olarak örnek alınması ve bu örneklerin laboratuvar ortamında analiz edilmesi sürecini kapsamaktadır. Ancak bu yöntemler, geniş alanlarda etkin izleme yapılmasına imkân tanımamakta, sınırlı sayıda örnek ile temsil edilen veriler, çoğu zaman su kalitesindeki ani değişimleri tespit etmekte yetersiz kalmaktadır. Bununla birlikte, yüksek maliyet, zaman kaybı ve yoğun iş gücü gerektirmesi gibi dezavantajlar da bu yöntemlerin pratik uygulanabilirliğini azaltmaktadır (Chen vd. 2020). İşte bu noktada, teknolojik gelişmelerin sunduğu olanaklarla birlikte çevresel izleme süreçlerinin daha verimli, düşük maliyetli ve gerçek zamanlı yapılmasına olanak sağlayan yeni nesil sistemler geliştirilmiştir.

Bu sistemlerin başında insansız hareketli su araçları gelmektedir (Georgios vd. 2024). Özellikle İnsansız Yüzey Araçları (İYA), su yüzeyinde herhangi bir insan müdahalesine gerek kalmadan hareket edebilme kabiliyetleri sayesinde çevresel izleme

uygulamalarında giderek daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu araçlar, taşıdıkları sensörler sayesinde fiziksel ve kimyasal su parametrelerini gerçek zamanlı olarak ölçebilmekte, erişilmesi zor veya tehlikeli bölgelerde dahi güvenli biçimde görev yapabilmektedir. Özellikle fiziksel ve kimyasal parametrelerin sürekli izlenmesi için bu tür sistemler büyük kolaylık sunmaktadır. Ayrıca, bu araçların üzerinde yer alan konumlandırma sistemleri, iletişim modülleri ve kontrol üniteleri, sadece veri toplamakla kalmayıp, bu verileri eş zamanlı olarak bir merkeze iletmekte, analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Böylelikle klasik yöntemlerin ötesinde; daha dinamik, yaygın ve sürekli bir izleme altyapısı kurulabilmektedir (Katsouras vd. 2024).

Otonom sistemler, bu noktada çevresel izleme çalışmalarına çok daha ileri bir boyut kazandırmaktadır. Bu sistemler, herhangi bir operatöre ihtiyaç duymadan çevresini algılayabilmekte, önceden belirlenen görevleri yerine getirebilmekte ve çevresel değişikliklere göre karar alabilmektedir. Özellikle su kaynaklarında kullanılacak bir otonom İYA'nın kendi başına rota belirlemesi, engellerden kaçınması ve belirli görev noktalarına ulaşarak ölçüm yapması mümkündür. Bu kabiliyet, sistemin hem güvenilirliğini hem de kullanılabilirliğini büyük ölçüde artırmaktadır. Ayrıca sistemin Işık Tespiti ve Menzil Belirleme (Light Detection and Ranging-LiDAR) gibi çevresel sensörlerle desteklenmesi sayesinde, çevredeki engeller hassas biçimde tespit edilmekte ve güvenli navigasyon sağlanabilmektedir. Bu sayede hem su kaynaklarının korunması hem de izleme faaliyetlerinin sürekliliği garanti altına alınabilmektedir.

Toplanan verilerin işlenmesi ve analizinde ise Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) son derece önemli bir rol oynamaktadır. CBS, mekânsal verilerin toplanması, depolanması, analiz edilmesi ve görselleştirilmesini mümkün kılan sistemlerdir. Su kalitesi izleme çalışmalarında CBS'nin kullanımı, özellikle izlenen alanlarda parametre değişimlerinin haritalanması, kritik bölgelerin belirlenmesi ve uzun vadeli eğilimlerin analiz edilmesi açısından büyük katkı sağlamaktadır. Bu bağlamda, su yüzeyinden toplanan sıcaklık, pH, iletkenlik gibi parametrelerin CBS ortamında enterpolasyon yöntemleriyle işlenmesi, bilinmeyen bölgelerdeki olası değerlerin tahmin edilmesini ve mekânsal modellerin oluşturulmasını sağlamaktadır. Enterpolasyon yöntemleri, temel olarak iki gruba ayrılmaktadır: deterministik yöntemler, yalnızca bilinen noktalar arasındaki mesafe ilişkilerine dayanarak tahmin yaparken; stokastik yöntemler, mekânsal otokorelasyonu da dikkate alarak hem tahmin hem de tahmine ilişkin hata (belirsizlik) değerlerini hesaplamaktadır. Deterministik yöntemler arasında Ters Mesafe Ağırlıklandırması (Inverse Distance Weighting-IDW), Spline, Doğal Komşu, Trend Yüzeyi Analizi ve Radyal Tabanlı Fonksiyonlar gibi yöntemler yer almaktadır. Stokastik yöntemler içerisinde ise en yaygın kullanılanı Kriging olup, bu yöntem kendi içinde Ordinary Kriging, Universal Kriging ve Co-Kriging gibi alt türlere ayrılmaktadır (Burroughs vd. 2015). Bu yöntemler veri setinin özelliklerine ve uygulamanın amacına göre değişken başarı oranları göstermektedir. Özellikle Kriging, sadece mesafeyi değil, aynı zamanda veri setinin istatistiksel özelliklerini de dikkate aldığı için öne çıkmaktadır.

Bu tez çalışması, yukarıda açıklanan tüm bu teknolojik ve bilimsel gelişmeleri bütüncül bir sistem içinde bir araya getirmeyi amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında, üzerinde çoklu sensörler bulunan, uzaktan ve otonom olarak çalışabilen, verilerini eş zamanlı olarak bir kontrol paneline ileten, engellerden kaçınabilen, batarya durumunu izleyebilen ve CBS tabanlı analizlere veri sağlayabilen bir İYA sistemi geliştirilmiştir. Sistem hem donanım hem de yazılım yönüyle özgün olarak tasarlanmış; farklı test

senaryolarında hem manuel hem de otonom modlarda başarıyla çalıştırılmıştır. Yazılım tarafında, Raspberry Pi mini bilgisayar üzerinde çalışan Python temelli bir yapı kurulmuş, bu yapı sayesinde gelen verilerin işlenmesi, motorların kontrolü ve veri iletimi kesintisiz şekilde sağlanmıştır. Ayrıca sistemde yer alan kontrol paneli aracılığıyla kullanıcılar harita üzerinden görev noktalarını seçebilmekte, bu noktalara ait görevleri tanımlayabilmekte, İYA'yı uzaktan yönlendirebilmekte ve anlık verileri takip edebilmektedir.

Bu sistemin en önemli özelliklerinden biri de geliştirilen yazılım altyapısının gerçek zamanlı iletişimi mümkün kılmasıdır. Sistemde istemci ile sunucu arasında çift yönlü ve sürekli açık bir iletişim kanalı SignalR ile sağlanmıştır. Bu sayede anlık olarak İYA'dan gelen veriler kontrol merkezine iletilmekte, kullanıcı ekranında herhangi bir sayfa yenilemeye gerek kalmadan tüm bilgiler güncellenmektedir. Bununla birlikte Temsili Durum Transferi Uygulama Programlama Arayüzü (Representational State Transfer Application Programming Interface-RESTful API) altyapısıyla veri tabanı işlemleri gerçekleştirilmekte, böylece sistem hem kullanıcı dostu hem de teknik olarak güçlü bir yapıya kavuşmaktadır. Toplanan su parametre verileri, anlık olarak sistemde kayıt altına alınmakta ve analiz edilebilmekte ayrıca veriler yerel bilgisayara indirilerek farklı sistemlerde analiz edilebilir yapıya dönüştürülmektedir. Ayrıca laboratuvar ortamında analizler yapılabilmesi için su parametreleri ölçüm sistemi içerisine numune toplama bölümü de eklenmiş ve istenilen yerden numune toplanabilmesi sağlanmıştır.

Sonuç olarak bu çalışma, klasik çevresel izleme sistemlerinin sınırlarını aşarak, gerçek zamanlı, otonom, coğrafi bilgi sistemleriyle bütünleşmiş bir yapı geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem, özellikle iç su kaynaklarında su kalitesinin izlenmesi, erken uyarı sistemlerinin kurulması, kirlenme risklerinin tespiti ve ekosistem sağlığının korunması gibi amaçlarla kullanılabilecek kapsamlı bir platform sunmaktadır. Sistemin esnek, modüler ve genişletilebilir yapısı, ilerleyen süreçte farklı sensörlerin entegre edilmesine, yeni yazılım modüllerinin eklenmesine ve farklı coğrafi bölgelerde uygulanmasına olanak tanımaktadır.

2. KAYNAK TARAMASI

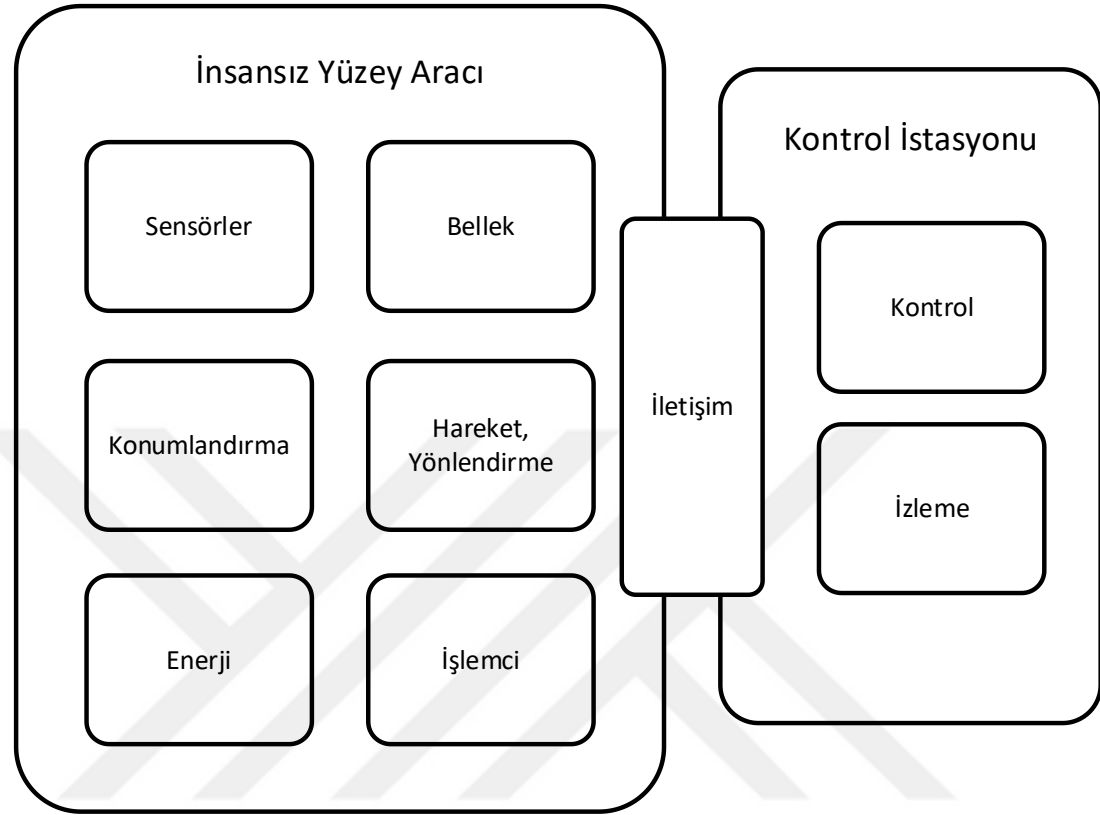
Su, yalnızca insan yaşamı için değil, tüm ekosistemler ve canlı türleri için vazgeçilmez bir doğal kaynaktır. Dünya yüzeyinin yaklaşık %71'i sularla kaplı olmasına rağmen, bunun yalnızca %2.5'i tatlı sudur ve bu tatlı su kaynaklarının da sadece yaklaşık %0.3'ü göller, akarsular ve atmosferde bulunmakta, yani doğrudan erişilebilir durumdadır (Yiheng & Dawei, 2018). Bu durum, özellikle nüfus artışı, iklim değişikliği ve sanayileşmenin etkisiyle birlikte değerlendirildiğinde, temiz suya erişimin gelecekte daha ciddi bir çevresel ve toplumsal sorun haline geleceğini göstermektedir. Bu nedenle, su kaynaklarının korunması, sürdürülebilirliği ve etkin yönetimi için su kalitesinin sürekli ve güvenilir biçimde izlenmesi büyük önem taşımaktadır. Geleneksel izleme yöntemleri, sınırlı ölçüm noktaları ve zaman aralıklarıyla gerçekleştirildiğinden, ani değişimlerin ya da geniş alanlardaki kirlilik dağılımının tespitinde yetersiz kalabilmektedir. Bu eksiklikleri gidermek amacıyla geliştirilen modern izleme teknolojileri; uzaktan algılama, kablosuz sensör ağları ve insansız su üstü/sualtı araçları gibi sistemlerle desteklenmektedir. Uzaktan algılama yöntemlerinde, su kalitesini değerlendirmek için sensörlerden gelen multispektral ve hiperspektral uzaktan algılama verileri kullanılmaktadır (Bangira vd. 2024). Kablosuz sensör ağ sistemlerinde ise sensörler doğrudan suya yerleştirilerek sıcaklık, pH, çözünmüş oksijen, iletkenlik gibi parametrelerin anlık olarak toplanması sağlanmaktadır. Ayrıca bu sistemler tek düğümlü (Mukta vd. 2019) veya çok düğümlü (Duran ve Yücel 2021) olabilmektedir. Bunun yanı sıra, yüzeyde (Jo vd. 2019) veya su kolonunun farklı derinliklerinde (de Lima vd. 2021) hareket edebilen insansız araçlar da çevresel izleme süreçlerinde etkin rol oynamaktadır. Bu araçlar, uzaktan kontrollü (Jo vd. 2019) veya otonom (Bayusari vd. 2021) olarak seyir sürebilmektedir. Mobil özellikleri sayesinde erişilmesi güç bölgelerde yüksek çözünürlüklü ve sürekli veri elde edilmesine olanak sunmaktadır. Bütün bu sistemler farklı su kütlelerinde, su kalitesinin mekânsal ve zamansal olarak daha etkin şekilde izlenmesini mümkün kılmakta ve su yönetimine büyük katkı sağlamaktadır.

Otonom sistemler, insan müdahalesi olmadan çevresini algılayarak karar alabilen ve belirlenen görevleri yerine getirebilen sistemlerdir. Otonom sistemlerin kesintisiz çalışma, hızlı ve doğru kararlar verme ve tehlikeli ortamlarda kullanmak gibi avantajları bulunmaktadır. Günümüzde kullanımı giderek yaygınlaşan otonom sistemleri savunma sanayi (Reis vd. 2021), sağlık (Gopalakrishnan vd. 2024), tarım (Roshanianfard vd. 2020), havacılık (Bijjahalli vd. 2020), denizcilik (Wright 2020) gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Otonom sistemleri göl, akarsu, deniz gibi su alanlarında su canlılarının izlenmesi, su taşımacılığı, içme suyu kaynaklarının korunması, su ekosistem takibi, su kalitesi izleme gibi alanlarda da kullanılır.

Su parametrelerinin izlenmesinde kullanılan İYA herhangi bir operatör olmadan çalışacak şekilde kurulmuş gemi olarak adlandırılmaktadır (Stateczny ve Burdziakowski, 2019). İYA'lar uzaktan kontrol edilebilir veya otonom olarak hareket edebilir. Su parametrelerinin İYA kullanılarak izlenmesi geniş alanlarda, erişilmesi güç noktalarda, zaman ve maliyet tasarrufu avantajları ile su kalitesi, sudaki kirleticileri ve kirleticilerin yayılımı tespitinde, uzmanların karar verme süreçlerine destek sağlayan etkili bir sistemdir.

İYA kullanılarak yapılan su parametre değerlerini izleme çalışmaları günümüzde giderek yaygınlaşmaktadır. Bu konuda yapılan çalışmalar incelendiğinde sistemin

insansız yüzey aracı ve kontrol istasyonu olarak iki temel yapıdan oluştuğu görülmektedir. Su parametrelerini İYA ile izlemek için geliştiren tipik bir sistem Şekil 2.1’de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Tipik bir İYA konfigürasyonu

2.1 İnsansız Yüzey Araçları

İnsansız yüzey araçları gemide herhangi bir insan operatör olmadan çalışacak şekilde ayarlanmış bir gemidir. Bu sistemler gerek su kalitesi gerekse de su üzerindeki seyrisferi için farklı donanımların bir araya getirilmesi ile geliştirilmiştir. Su parametrelerini izlemek için tasarlanan İYA’larda sensörler, bellek, iletişim, konumlandırma, hareket ve yönlendirme modülleri ile bunlara enerji sağlayan bir enerji kaynağı ve tüm sistemin çalışmasını kontrol eden bir işlemci bulunmaktadır (Liu vd. 2016).

2.1.1 Sensör modülü

Sensörler çevrelerindeki fiziksel ve kimyasal değişiklikleri algılamak ve bu değişiklikleri elektriksel veya dijital sinyallere dönüştürmek için kullanılır (Algamili vd. 2021). İYA’da yer alan bu modül ile su ve/veya havadaki farklı tipte parametreleri algılanabilmektedir. Algılanan parametre değerlerinde yaşanan belirgin farklılıklar su kalitesinde bir değişim olduğunun göstergesidir. Yaşanan bu değişimler takip edilerek suda oluşan olası kirliliğin tespit edilmesi mümkün olabilmektedir. İYA kullanılarak su parametrelerinin izlenmesi ile ilgili yapılan çalışmalarda yaygın olarak sıcaklık, pH, bulanıklık, Oksidasyon İndirgeme Potansiyeli (Oxidation-Reduction Potential-ORP),

Elektriksel İletkenlik (Electrical Conductivity-EC), Çözünmüş Oksijen (Dissolved Oxygen-DO) sensörleri kullanılmaktadır. (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1. Literatürde yaygın olarak kullanılan su parametresi sensörleri

Kaynaklar	pH	Sıcaklık	Bulanıklık	ORP	EC	DO
(Melo vd. 2019)	X	X		X		X
(Kaizu vd. 2011)	X	X	X		X	X
(Arko vd. 2020)	X	X	X			
(Ansarı vd. 2022)	X	X	X			
(Shuo vd. 2017)	X	X		X	X	X
(Balbuena vd. 2017)	X	X	X		X	X
(Chang vd. 2021)	X					
(Madeo vd. 2020)	X	X		X		X
(Cao vd. 2018)	X					
(Dsouza vd. 2021)	X	X			X	
(Xing vd. 2020)	X	X	X			
(Setiawan vd. 2022)		X				

pH sensörü bir çözeltinin asitlik veya alkalilik seviyesini ölçmek için kullanılır. Sensörün skalası 0 ile 14 arasında değişir. 7 nötr pH değerini temsil ederken sıfıra yaklaşan değerler daha asidik çözeltileri, 14'e yaklaşan değerler ise daha alkaline çözeltileri temsil eder. pH sensörler tarım, su arıtma, kimya endüstrisi, yüzme havuzları, gıda endüstrisi gibi birçok alanda kullanılmaktadır. İçme suyu pH değeri genellikle 6.5 ile 8.5 arasında olmalıdır. Bu aralıktaki değerler suyun insan sağlığı açısından uygun olduğunu gösterir. Yüzme havuz sularında pH değeri 7.2 ile 7.8 arasında tutulması ten ve göz sağlığı açısından uygundur. Tarımsal sulamada ise değer 6 ila 7 arasında olmalıdır. Deniz suyunun pH değeri 7.5 ile 8.5 arasında değişir (Singh vd. 2021).

Suyun yüksek veya düşük pH değeri suda yaşayan canlılar için zararlıdır. Bu durum ekosistemin dengesini bozabilir. Asidik atıklar suya salındığında suyun pH değerini düşürebilir ve aşırı asidik koşullarda kurşun, cıva gibi bazı metaller fazla çözülüp suda yaşayan canlılar için toksik oluşturabilir. Asit yağmurları su kaynaklarının asidik hale gelmesini ve bitki hayvan türlerinin ölümüne ekosistemin çöküşüne neden olabilir (Muhib ve Kabir, 2021).

Sıcaklık sensörleri bulunduğu ortamdaki sıcaklık değerini ölçmeye yarayan, izoleli ve bulunduğu ısı ortamına göre direnç değeri değişen sensörlerdir. Deniz, akarsu ve göllerde ortalama sıcaklık miktarı coğrafi konum, derinlik ve diğer faktörlerden dolayı değişiklik göstermektedir. Suda yaşayan canlılar bulundukları bölgedeki su sıcaklığına uyum sağlamaktadır. Ancak su sıcaklığının anlık olarak değişmesi suya etki eden farklı bir madde olduğunun ve olası kirliliğin bir göstergesidir. Buna ek olarak farklı yıllarda aynı dönemlerde belirgin derecede oluşacak sıcaklık farkları balık ve diğer deniz canlıları üzerinden olumsuz etki yaratacaktır (Bukhair vd. 2023).

Deniz suyu sıcaklığı denizde yaşayan mercan, balık gibi canlıların yaşam alanlarını oluşturan en önemli faktörlerden birisidir. Deniz suyunda yaşanabilecek bir

derecelik artış ya da azalma deniz canlıları için hayati tehlike oluşturabilmektedir. Akdeniz; Cebelitarık Boğazı ile Atlantik Okyanusu'na bağlı ve Atlantik Okyanusundaki ekolojik – oşinografi değişimler Akdeniz'i direk etkilemektedir. Diğer yandan, Akdeniz; Kızıldeniz ve Hint Okyanusu'ndaki değişimlere de açıktır. Çünkü 163 km uzunluk, 15 m derinlik ve 365 m genişlikteki Süveyş Kanalı yoluyla birçok tür Akdeniz'e girmiştir ve hala girmektedir. Bu durum denizlerde yaşayan balık türlerinin göçüne neden olmaktadır. Örneğin ülkemiz deniz sularında Hint Okyanusu kökenli otuzun üzerinde tür bulunmaktadır. Bu durumun temel sebeplerinden bir tanesi Akdeniz'deki su sıcaklığının artışıdır (TUDAV 2025).

ORP sensörleri çözelti de oksidasyon veya indirgenme potansiyelini ölçmek için kullanılır. Bir çözeltideki elektron kazanın veya elektron kaybı reaksiyonlarının potansiyelini ölçer. Ölçüm çözeltideki serbest elektron miktarına bağlı olarak belirlenir. Çözeltideki ORP seviyesi çözeltinin kimyasal reaksiyonlarını karşı direncini gösterir. Bu ölçüm, özellikle su kalitesi ve dezenfeksiyon için kullanılır. Yüksek ORP değeri (örneğin 650 mV ve üzeri) suyun güçlü bir oksitleyici olduğunu, mikropları öldürme kapasitesi yüksek olduğunu, düşük ORP değeri (örneğin 200 mV ve altı) sudaki bakteriyel aktivitenin yüksekliğini gösterir. Dünya sağlık örgütü, içme suyu için dezenfeksiyonun etkili kabul edilmesi için en az 650 mV ORP değerini önermektedir (Vasudevan ve Kumar, 2015).

Oksijen canlı organizmalar için hayati önem taşır. Sudaki oksijen seviyesi çözünmüş oksijen sensörleri ile belirlenir. Yeterli oksijen çoğu balık ve diğer su canlıları yaşamı için önemlidir. Sudaki çözünmüş oksijen seviyesi azaldığında su canlılarının sağlığı riske girebilir veya ölümle sonuçlanabilecek daha ciddi sorunlar ortaya çıkabilir. Ayrıca oksijen miktarındaki değişiklikler kimyasal dengeyi ve mikrobiyal aktiviteleri etkiler. Organik atıkların yoğun olarak etkilediği sularda oksijen miktarı azalabilir ve bu da kirliliğin habercisi olabilir. Çözünmüş oksijen miktarı lokasyona göre değişmekle birlikte denizde litre başına 5-9 mg, havuzlarda 4-8 mg, akarsularda 6-8 mg ve göllerde 5-9 mg arasında olması beklenir (Miura vd. 2023).

İletkenlik sensörleri bir sıvının elektriksel iletkenliğini ölçmek için kullanılır. Su içindeki iyonların miktarı ve hareketliliği sıvının iletkenliğini belirler. Sensör içerisinde bulunan elektrot çifti arasında ölçülen elektrik akımında yaşanan değişim sıvıya ait iletkenlik bilgisini verir. İletkenlik sensörü su kalitesi izleme, endüstriyel işlem kontrolü, yüzme havuzları, toprak izleme, endüstriyel sıvılar gibi çeşitli alanlarda deneylerde veya laboratuvar ortamında kullanılır (Thirstrup ve Deleebeeck, 2021).

Çözünmüş tuzlar ve klorürler, sülfatlar ve bikarbonat iyonları suyun elektriksel iletkenliğini doğrudan etkiler. Sudaki yüksek iletkenlik, genellikle yüksek seviyede çözünmüş tuzları gösterir ve bu da su kalitesi için önemli bir gösterge olup ciddi etkilere sahiptir. Özellikle kirliliğin ve kentsel akışın su ortamları üzerindeki etkisini değerlendirme bağlamında, iletkenliği önemli bir su kalitesi parametresi olarak belirtilmektedir (Dhal vd. 2024).

2.1.2 Bellek modülü

Bellek modülü, İYA'nın bilgi işleme kapasitesini oluşturan donanımdır. Bu modül hem geçici hem de kalıcı veri depolama olarak, aracın görev sırasında karşılaştığı tüm

bilgi akışını kontrol eder. İYA'lar, üzerinde bulunan ve çevresel parametreleri izleyen sensörlerle donatılmıştır. Bu sensörlerden elde edilen veriler, analiz, raporlama veya anlık karar verme süreçlerinde kullanılmak üzere belleğe kaydedilir. Bu veriler gerçek zamanlı olarak işlenebileceği gibi, internet bağlantısının olmadığı durumlarda geçici olarak bellekte tutulup, daha sonra toplu biçimde kontrol istasyonuna aktarılabilir (Ha vd. 2012)

Kaizu vd. (2011) yaptıkları çalışmada bot üzerindeki dizüstü bilgisayarda LabVIEW 2009 yazılımı ile botun navigasyonunu kontrol ederken aynı zamanda GPS konumu, yön, hız ve fan dönüş hızları gibi navigasyon verilerini, ayrıca pH, çözünmüş oksijen, iletkenlik, sıcaklık, bulanıklık, klorofil-a ve nitrat iyonları gibi su kalitesi sensörlerinden gelen verileri belleğe kaydetmiştir. Sistemde kullanılan bilgisayar ve yazılımlar, bellek modülü işlevi görerek hem verilerin saklanması hem de sonradan analiz edilmesini sağlamıştır.

İYA'nın GPS modülünden aldığı koordinat bilgileri, aracın hareket geçmişinin kaydedilmesi, rotasının izlenmesi ve analiz edilmesi için belleğe yazılır. Bu bilgiler, İYA'nın belirli bir görevi yerine getirip getirmediğini denetlemek, geçmiş hareketleri değerlendirmek, geçmiş hareketlerden olası durum hareketlerini tahmin etmek açısından önemlidir.

Bautista vd. (2022) tarafından geliştirilen otonom su izleme teknesinde, teknenin konumunu belirlemek için kullanılan GPS modülünden elde edilen koordinatları ve pusula yön verileri, Arduino tabanlı kontrol sistemine entegre edilmiş bir Güvenli Dijital (Secure Digital-SD) karta kalıcı olarak kaydedilmiştir. Sistem, bu verileri her 500 ms aralıklarla düzenli olarak belleğe yazarak teknenin izlediği rotanın eksiksiz bir şekilde kaydı sağlanmıştır. Böylece görev boyunca izlenen rota daha sonra analiz edilmek üzere hafızada tutulmakta, bu durum hem hata tespiti hem de tekrarlanabilir görev planlaması açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Bellek modülünün bu şekilde kullanımı, sistemin çevrimdışı veri kaydı yeteneğini güçlendirerek gerçek zamanlı bağlantının kesilmesi durumunda dahi konum verilerinin korunmasını mümkün kılmaktadır.

İYA'nın önceden belirlenmiş rotalarda ilerlemesi ya da belirli noktalarda görev yapabilmesi için hedef koordinatların bellekte saklanması gerekir. Bu koordinatlar, araç çalıştırıldığında ya da görev sırasında belleğe yüklenebilir. Araç, bu kayıtlı koordinatları okuyarak yönünü tayin eder ve motor, dümen ya da diğer kontrol bileşenlerini buna göre yapılandırır. Bu durum, özellikle otonom görevlerde insan müdahalesine gerek kalmadan çalışmayı mümkün kılar.

Geliştirilen otonom yüzey aracı, görev sırasında hedef koordinatlara yönelik hareketini gerçekleştirmekle kalmayıp, aynı zamanda başlangıç konumunu hafızasında tutarak görev tamamlandığında bu konuma otomatik olarak geri dönmektedir. Sistem, görev süresince elde edilen konum ve su kalitesi verilerini öncelikle yerel bellekte saklamakta, daha sonra internet bağlantısı sağlandığında bu veriler bulut sunucuya gecikmeli olarak yüklenmektedir. Bu yapı sayesinde, internet erişiminin kısıtlı olduğu ortamlarda bile görev verileri güvenli şekilde kaydedilmekte ve daha sonra analiz için kullanılabilir. Bu yaklaşım hem görev bütünlüğünün korunmasını hem de veri kaybının önlenmesini sağlayarak, sistemin güvenilirliğini ve sahada kullanım verimliliğini artırmaktadır (Arko vd. 2020).

2.1.3 Konumlandırma modülü

İYA görevlerin başarıyla yerine getirilebilmesi için dünya üzerindeki konumunu doğru ve sürekli bir şekilde bilmesi gerekmektedir. Gerek yönlendirme ve navigasyon açısından gerekse de toplanan verilerin coğrafi bilgi sistemlerine entegre edilmesi açısından konumlandırma modülleri, İYA sistemlerinin en kritik bileşenlerinden biridir.

Geliştirilen bir gemide Ublox NEO-6M GPS modülü kullanmışlardır. Modül, saniyede bir veri üretme kapasitesine sahip olup düşük maliyetli İYA sistemlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Aynı çalışmada ayrıca GY-271 pusula modülü kullanılarak yön doğruluğu artırılmıştır; bu modül, manyetik kuzeye göre yön tayini sağlayarak özellikle dönüş manevralarında yönsel sapmaları azaltmaktadır (Arko vd. 2020).

Chang vd. (2021) yaptıkları çalışmada yine benzer olarak NEO-6M çipli GY-GPS6MV2 modeli tercih edilmiştir. Düşük güç tüketimiyle birlikte yeterli hassasiyet sunan modül, GPS verileri ile örnekleme noktalarını eşleştirerek temizlik ve izleme görevlerinin konumsal olarak belgelenmesini sağlamaktadır (Chang vd. 2021).

Daha hassas konumlandırma gereksinimi olan uygulamalarda daha hassas ölçüm yapabilen GPS modüllere geçildiği ve çalışmada Garmin 18x HVS GPS modülü kullanıldığı belirtilmektedir. Bu modül 10 Hz güncelleme hızıyla çalışmakta ve RS232 çıkışı üzerinden yüksek frekansta veri sağlayabilmektedir. Ancak Arduino tabanlı kontrolcülerin Transistör-Transistör Mantığı (Transistor-Transistor Logic -TTL) arayüzüyle uyumsuz olduğundan, burada RS232-TTL dönüştürücü kullanılmış ve sisteme entegre edilmiştir (Cao vd. 2018).

Madeo vd. (2020) ise geliştirdikleri sistemde iki farklı GPS modülü kullanılarak hem navigasyon hem de sensör verilerinin eşzamanlı olarak konumlandırılması sağlanmıştır. Bu çift modül yaklaşımı, konumsal veri ile ölçüm verisinin daha yüksek eşleşme doğruluğu ile kaydedilmesini mümkün kılmaktadır (Madeo vd. 2020).

Bunun yanı sıra konumlandırmanın yalnızca GPS modülü ile değil, tamamlayıcı sensörlerle desteklendiği çalışmalar da mevcuttur. 9 eksenli yön sensörü ile GPS verileri birleştirilmiş ve otomatik rota düzeltme algoritmaları geliştirilmiştir. Bu, İYA'nın sadece bir konuma ulaşmasını değil, hedefe doğru açıda ve kontrollü şekilde yönelmesini mümkün kılarak sistemin kararlılığını artırmıştır (Cao vd. 2018).

2.1.4 Hareket ve yönlendirme modülü

Hareket ve yönlendirme modülü İYA'nın su yüzeyinde gideceği koordinata gerek otonom gerekse de manuel olarak gidebilmesi için gereken donanımları içermektedir.

Melo vd. (2019) tarafından geliştirilen hava botu ile iki farklı gölette ve bir rezervuarda su parametreleri izlenmiştir. Özellikle sığ göller ve bitki örtüsünün yoğun olduğu yüzeyler için tasarlanan itki sistemi, geleneksel su altı pervanelerinin yerine hava pervaneleriyle çalışan bir airboat mekanizmasıdır. Bu sistemde, suyun yerine havanın itilmesiyle hareket sağlanmakta ve böylece dip yapısı çamurlu, karmaşık veya sazlık gibi yoğun bitki örtüsüne sahip bölgelerde pervanelerin takılması riski ortadan kaldırılmaktadır.

Başka bir çalışmada geliştirilen insansız otonom gemi, su kalitesi izleme ve örnekleme görevlerini yerine getirebilecek şekilde tasarlanmıştır. Aracın hareket sistemi, geleneksel denizcilik yapısını temel alarak su itkili pervanelerle çalışmaktadır. İtki sistemi, yaklaşık 1700 W gücünde yüksek kapasiteli bir elektrik motoruna bağlı 50 mm çapında su pervanelerinden oluşmaktadır. Bu güçlü motor, araca hem yeterli hız hem de çeviklik kazandırmakta, uzun menzilli ve farklı su koşullarındaki görevleri sorunsuz yerine getirebilmektedir (Setiawan vd. 2022).

Balbuena vd. (2017) geliştirdiği insansız yüzey aracı, yelkenli tipi bir yapıdadır ve temel itki kaynağı rüzgâr enerjisidir. Bu durum, enerji verimliliği ve çevre dostu tasarım açısından oldukça önemlidir. Sistem, özellikle elektrikli motorlara ihtiyaç duymadan uzun süreli görevleri gerçekleştirebilmek amacıyla tasarlanmıştır ve düşük maliyetli, sürdürülebilir bir su üstü gözlem aracı örneği sunmaktadır. Yelkenli yapı, hava akımından doğrudan itki üretimini sağlar. Araçta yer alan ana yelken ve gerekirse ön yelken gibi rüzgârla çalışan donanımlar, rüzgârın yönüne göre ayarlanarak botun ileri doğru hareket etmesini sağlar. Bu ayarlamalar, genellikle servo motorlar aracılığıyla yapılır.

İki adet 9V yüksek hızlı Doğru Akım (Direct Current-DC) motor itkili sistemde her motor, bir pervaneyi döndürerek teknenin ileri hareketini sağlar. Motorların hız ve yön kontrolü, Arduino kontrol kartı üzerinden analog PWM sinyalleri kullanılarak gerçekleştirilir. Bu sayede teknenin hem hareketi hem de yönü kontrol edilebilmektedir. Bu yapı, basitliği ve düşük maliyetiyle dikkat çekerken, aynı zamanda yüzeydeki atık toplama görevini gerçekleştirmek için yeterli gücü sağlamaktadır. Sistem, daha çok gölet ve küçük su kütlelerinde görev yapmak üzere geliştirilmiştir (Xing vd. 2020).

Diğer bir çalışmada hareket sistemi, oldukça sade ve düşük maliyetli, biri sağda biri solda olmak üzere iki adet 12V 100 rpm DC dişli motor kullanılmıştır. Her bir motor kendi tarafındaki pervaneyi döndürerek teknenin hareketini sağlar. Yönlendirme, iki motor arasındaki hız farkı ile sağlanan diferansiyel sürüş mantığına dayanır. Bu yapı, basit elektronik kontrol devreleriyle kolayca uygulanabilir olması sayesinde küçük ölçekli ya da eğitim amaçlı projeler için uygundur. İtki tamamen su altı pervaneleriyle sağlanmakta ve dış ortam koşullarına karşı dayanıklı bir çözüm sunmaktadır (Dsouza vd. 2021).

İYA, yalnızca hareket etmekle kalmayıp aynı zamanda belirli bir rotayı takip edebilmek, hedef noktalara ulaşabilmek ve çevre koşullarına uygun manevralar yapabilmek için etkili yönlendirme sistemlerine ihtiyaç duyar. Yönlendirme; aracın yönünü belirleyen donanım ve bu donanıma komut gönderen yapılardan oluşur. İYA’larda kullanılan yönlendirme sistemleri, taşıtın yapısına, görevine, çalışma ortamına ve enerji kaynağına göre mekanik dümen sistemleri, diferansiyel hız kontrolü, yelken açılarının ayarlanması, hava yönlendirici gibi çeşitlilik gösterebilir.

İncelenen çalışmalarda yönlendirme için farklı yaklaşımlar uygulanmıştır. Klasik dümen sistemleri, özellikle gemi tipi yapılarda tercih edilmiştir (Shuo vd. 2017). Alternatif bir yöntem olarak, diferansiyel hız kontrolü, yani sağ ve sol motorlar arasındaki hız farkı ile yön tayini yapılmıştır (Balbuena vd. 2017; Madeo vd. 2020; Dsouza vd. 2021). Bu yöntem, özellikle düşük maliyetli ya da basit yapıları teknelerde sıkça tercih edilmektedir. Ayrıca, hava pervaneli sistemlerde yönlendirme, fan motorlarının hız farkı ile sağlanmaktadır (Kaizu vd. 2011).

Tüm bu örnekler, İYA'larda yönlendirme sistemlerinin tek bir standart yapıdan ziyade, ihtiyaca göre şekillenen modüler çözümler olduğunu göstermektedir. Her sistem, görev gereksinimleri ve fiziksel tasarım koşullarına göre farklı yönlendirme stratejileriyle donatılmıştır.

2.1.5 Enerji modülü

İYA, uzun süreli çevresel gözlem, su kalitesi izleme ve haritalama gibi görevleri yerine getirirken güvenilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç duyar. Bu sistemlerin enerji gereksinimleri; itki motorları, yönlendirme sistemleri, sensörler, haberleşme modülleri ve veri işlem birimleri gibi pek çok bileşeni kapsar. Bu nedenle enerji kaynağı seçimi, İYA'nın görev süresi, hareket kabiliyeti, çevresel koşullar ve bakım kolaylığı gibi performans kriterlerini doğrudan etkiler (Liang vd. 2022).

Geliştirilen hava botunda, hareket için benzinli motor kullanmakta olup, sistemin sensör ve elektronik bileşenleri batarya üzerinden beslenmektedir. Araçta kullanılan benzinli motor yaklaşık 1.2 kW güç kapasitesine sahip olup, büyük fanları döndürerek hava pervaneleriyle itki sağlamaktadır. Benzinli motor kullanımının, sığ ve yosunlu göllerde klasik pervanelere göre daha az tıkanma ve daha uzun menzil sunduğunu vurgulamaktadır (Melo vd. 2019).

Geliştirilen yelkenli insansız yüzey aracı, rüzgârı ana itki kaynağı olarak kullanmakta ve yalnızca elektronik bileşenleri için güneş enerjisiyle şarj edilen batarya sistemi kullanmaktadır. Güneş panelleri hem kontrol ünitesini hem de kablosuz veri iletişim sistemini beslemektedir. Bu sayede sistem, teorik olarak süresiz görev yapma kapasitesine sahiptir. Bu yapının özellikle çevre dostu ve düşük bakım maliyetli olması, yelkenli yapının uzun süreli izleme görevlerinde ideal olduğunu ifade etmektedirler (Setiawan vd. 2022).

Bir başka çalışmada, güç kaynağı olarak 12V batarya kullanılmaktadır. Sensörler ve kontrol sistemi yine aynı batarya sisteminden beslenmektedir. Enerji sistemi "düşük maliyetli ve taşınabilir" olarak tanımlamakla birlikte, uzun süreli operasyonlar için batarya kapasitesinin sınırlı kaldığı belirtilmektedir. Bu nedenle sistemin kısa menzilli görevler için uygun olduğu belirtilmiştir (Balbuena vd. 2017).

2.1.6 Mikrodenetleyici / Mikrobilgisayar modülü

Mikrodenetleyiciler, sensörlerden gelen verileri işleyebilen, çıkışlara komut verebilen ve gömülü sistemler içerisinde bağımsız çalışabilen küçük ölçekli işlemcilerdir. İçlerinde Merkezi İşlem Birimi (Central Processing Unit-CPU), hafıza birimleri (Rastgele Erişimli Bellek (Random Access Memory-RAM), Flash bellek) ve giriş-çıkış (Input/Output-I/O) pinleri gibi bileşenler barındırır. Bu yapıyla mikrodenetleyiciler, birçok algılama, veri toplama, kontrol ve karar verme işlemini tek başına yürütebilecek bir yapı sunar. Özellikle taşınabilir ve düşük güç tüketimi gerektiren uygulamalarda, mikrodenetleyiciler yüksek verimlilik ve düşük maliyet avantajlarıyla öne çıkar.

Günümüzde İYA projelerinde en yaygın kullanılan mikrodenetleyiciler arasında Arduino, STM32, Raspberry Pi, ESP32, Atmega serisi ve myRIO gibi platformlar yer alır. Her biri farklı işlem gücü, giriş/çıkış sayısı, haberleşme kabiliyeti ve enerji tüketimi

özelliklerine sahiptir. Mikrodenetleyici seçimi; sistemin karmaşıklığı, veri işleme ihtiyacı, enerji kaynağı ve gerçek zamanlılık gibi faktörlere bağlı olarak yapılır.

Geliştirilen otonom geminin tüm sistem kontrolü, myRIO adlı güçlü ve gelişmiş bir gömülü sistem kontrol kartı ile sağlanmaktadır. myRIO, National Instruments tarafından geliştirilen bir platform olup Sahada Programlanabilir Kapı Dizisi (Field-Programmable Gate Array-FPGA) tabanlı gerçek zamanlı veri işleme, yüksek hızlı analog/dijital giriş-çıkış ve LabVIEW yazılım desteği gibi özellikleriyle öne çıkmaktadır. Gemideki motor kontrolü, yönlendirme sistemi, sensör verilerinin toplanması ve örnekleme mekanizmalarının tamamı bu kontrol kartı üzerinden yönetilmektedir. myRIO'nun yüksek işlem gücü ve gerçek zamanlı kontrol kabiliyeti sayesinde sistemin hem kararlı hem de güvenilir çalıştığı belirtilmektedir (Shuo vd. 2017).

Bir başka çalışmada hareket ve yönlendirme kontrolü, Arduino Nano mikrodnetleyici ile sağlanırken; su kalitesi sensörleri, ESP8266 modülü ile birlikte çalışarak hem veri toplama hem de kablosuz haberleşme işlevini üstlenmektedir. Arduino Nano, DC motorları ve servo yön kontrol sistemini yönetmekte, aynı zamanda yerel olarak GPS ve pusula verilerini okuyarak aracın yönünü belirlemektedir. ESP8266 ise Wi-Fi bağlantısı aracılığıyla ölçüm verilerini uzaktaki sunucuya iletmektedir. Bu ikili kontrol mimarisinin hem esnek hem de düşük maliyetli olduğunu, özellikle sınırlı kaynaklarla çalışan projeler için ideal bir çözüm sunduğunu belirtilmektedir (Chang vd. 2021).

Geliştirilen sistemin tüm kontrolü Arduino Uno mikrodnetleyicisi tarafından yürütülmektedir. Hareket sistemi, iki adet 12V DC motorun hız farkına dayalı olarak aracı yönlendirilmekte ve Arduino ile motorların kontrolünü doğrudan sağlamaktadır. Bluetooth bağlantısı ile kullanıcıdan alınan komutlar Arduino'ya iletilmekte ve Arduino bu komutlara göre motorları sürmektedir. Ayrıca su parametresi sensörlerinden gelen veriler de yine Arduino üzerinden toplanmakta ve gerektiğinde mobil cihaza aktarılmaktadır. Arduino'nun sade yapısı ve kolay programlanması sayesinde sistemin kısa sürede geliştirildiğini ve düşük maliyetle uygulanabilir hale geldiğini vurgulamaktadır (Dsouza vd. 2021).

Pixhawk kullanılarak geliştirilen çalışmada, yön ve hareket kontrolü Pixhawk üzerinden yürütülmektedir. Pixhawk, yaygın olarak insansız hava araçlarında kullanılan bir kontrol kartı olup, ArduRover firmware'i ile otonom su üstü aracına entegre edilmiştir. Sistem, GPS, pusula ve Ataletsel Ölçüm Birimi (Inertial Measurement Unit-IMU) sensörlerinden veri alarak, rotayı gerçek zamanlı takip için servo motorlar aracılığıyla dümeni kontrol etmektedir. Pixhawk'un sunduğu yüksek hassasiyet, güvenilirlik ve açık kaynaklı yazılım altyapısının, sistemin otonom görev başarısında büyük rol oynadığını vurgulamaktadırlar (Idris vd. 2016).

2.1.7 İletişim modülü

İYA, toplanan verilerin dışa aktarılması, uzaktan komut ve veri alımı gibi işlemler iletişim modülleri üzerinden gerçekleştirilir. Bu modüller, araç ile kontrol istasyonu arasında çift yönlü haberleşmeyi sağlar. İletişim yöntemleri, sistemin kapsama alanı, veri hızı, enerji tüketimi ve çevresel koşullar gibi faktörlere bağlı olarak belirlenmelidir. Bu

nedenle İYA’larda tek bir standart çözüm yerine, farklı avantajlara sahip çeşitli kablosuz haberleşme teknolojileri tercih edilmektedir.

Haberleşme yöntemlerinde yaygın olarak Wi-Fi (802.11x), Bluetooth, ZigBee (IEEE 802.15.4), LoRa, ve GSM/4G/LTE gibi yöntemler kullanılmaktadır (Etezadi ve Eshkabilov 2024). Wi-Fi, yüksek veri iletim hızlarına ve 100-300 m menzile sahiptir. Yerel ağlarda kısa mesafeli, yüksek bant genişlikli veri aktarımı için uygundur. Dezavantajı sınırlı menzil ve dış ortam parazitlerine karşı hassasiyettir. Bluetooth, genellikle 10–50 m arası kısa menzilli iletişim için kullanılır. Düşük güç tüketimi ve kolay eşleşme avantajı sağlar, ancak düşük veri hızları nedeniyle büyük veri transferi için uygun değildir. Düşük enerji tüketimi ve uzun süreli görevler için ideal olan ZigBee protokolü, 3000m menzile kadar açık alanda çalışabilmektedir. Sensör ağları ve çoklu cihaz haberleşmesi için uygundur; ancak veri hızı düşüktür. GSM/4G/LTE, kilometrelerce geniş alanlarda kapsama sağlayan hücresel iletişim teknolojileridir. Uzaktan veri izleme ve gerçek zamanlı kontrol için idealdir. Ancak SIM kart, operatör gereksinimi açısından maliyetli ve enerji tüketimi daha yüksektir. LoRa, düşük bant genişliği ile 30 km lik mesafelere veri iletimi sağlar. Özellikle kırsal alanlarda konum takibi ve sensör verisi göndermek için avantajlıdır.

Yön ve hız kontrolünün uzaktan kumanda ile gerçekleştirildiği bir sistemde Radyo Kontrol (Radio Control-RC) sistemi, kullanıcıya gerçek zamanlı yön ve hız müdahalesi imkânı sunarken sistemin menzilin, yaklaşık 1 km olarak sınırlandırmaktadır. Çalışmada bu sistemin manuel kullanım kolaylığı ve yüksek tepki hızı sayesinde özellikle saha testlerinde pratiklik sağladığı belirtilmektedir. Ancak RC kontrol sisteminin veri aktarımı yapmadığı, yalnızca hareket komutu ilettiği, dolayısıyla ölçüm verilerinin anlık olarak alınamadığı vurgulanmıştır. Veriler daha sonra manuel olarak cihaza bağlı sistemden okunmaktadır (Kaizu vd. 2011).

Bir başka çalışmada iletişim yöntemi Wi-Fi ile veri aktarımı sağlanmaktadır. Hem sensör verileri hem de konum bilgisi, Wi-Fi modülü yardımıyla sistemin kontrol merkezine gönderilmektedir. Ancak sistemin menzilin yaklaşık 100 m ile sınırlı olduğu belirtilmiş ve bu nedenle verilerin gerçek zamanlı olarak iletilmesi için teknenin kara istasyonuna yakın seyretmesi gerektiği ifade edilmiştir. Yazarlar bu yapı sayesinde kısa mesafede yüksek veri hızına sahip olunduğunu, ancak geniş alan taramalarında veri kaydının dahili hafızaya yapıldığını ve görev sonu indirildiğini ifade etmişlerdir. Yani sistem hibrit bir veri toplama stratejisi benimsemiştir (Madeo vd. 2020).

Haberleşmenin GSM modül ile sağlandığı başka bir sistemde hem uzun menzilli haberleşme sağlamakta hem de sistemin çalışmasını desteklemek için uzaktan komut alımına ve veri aktarımına olanak tanımaktadır. Yazarlar, hücresel haberleşmenin, özellikle gölet ve nehir gibi alanlarda sabit ağ altyapısının bulunmadığı koşullarda büyük avantaj sağladığını ifade etmektedir. SIM800 modülü aracılığıyla sistem, gerçek zamanlı GPS verilerini ve su derinliği ölçümlerini kullanıcıya ulaştırabilmektedir. Ancak hücresel iletişimin enerji tüketimi açısından yönetiminin daha dikkatli olması gerektiği ve veri paketleme stratejilerinin bu doğrultuda optimize edilmesi gerektiği belirtilmektedir (İdris vd. 2016).

2.1.8 Kontrol istasyonu

Kontrol istasyonu, İYA'da sistemin uzaktan izlenmesi, yönlendirilmesi, veri alınması ve bazı durumlarda görevlerin planlanması için kullanılan yazılım ve donanım bütünüdür. Bu yapı, sahada ya da uzaktan çalışan kullanıcıların araç ile etkileşime geçmesini sağlayarak İYA'nın otonom ya da yarı otonom görevlerini destekler. Kontrol paneli basit bir mobil uygulama arayüzü ile Bluetooth bağlantı şeklinde olabileceği gibi, daha gelişmiş sistemlerde kablosuz ağ bağlantısı üzerinden gerçek zamanlı veri görselleştirme, komut gönderimi, harita üzerinde rota takibi ve bulut veri entegrasyonu gibi işlevleri barındıran web tabanlı ya da bilgisayar destekli yazılımlar olabilmektedir.

Kontrol istasyonu bazı sistemlerde yalnızca yönlendirme aracı olarak işlev görürken, bazı sistemlerde ise araçtan alınan su kalitesi, konum ve görev verilerinin canlı izlenmesini ve hatta görev geçmişinin analiz edilmesini sağlar. Bu nedenle kontrol panelinin yapısı, İYA'nın görev türüne, haberleşme altyapısına ve enerji kaynaklarına bağlı olarak şekillenir. Modern yaklaşımlarda kontrol paneli sadece sahada değil, bulut tabanlı servisler üzerinden uzaktan erişim ve izleme olanaklarıyla daha esnek ve sürdürülebilir sistemler olabilmektedir.

Geliştirilen otonom yüzey aracının kontrolü, görev süresince doğrudan bir arayüzü ile yapılamamakla birlikte verilerin aktarımı ve görev takibi için bir bilgisayar tabanlı kontrol istasyonu kullanılmıştır. Sistemde kontrol istasyonunun ağırlıklı olarak veri izleme ve değerlendirme amacıyla kullanıldığını belirtilmektedir. Sistem çevrimdışı çalışabilirlik özelliğine sahiptir; görev tamamlandıktan sonra toplanan veriler kablosuz bağlantı sağlandığında bilgisayara aktarılmakta, bu da veri kaybını önleyen etkili bir kontrol yapısı sunmaktadır (Arko vd. 2020).

Kontrol istasyonu olarak bir mobil cihaz ve dizüstü bilgisayar üzerinden ESP modülüne bağlanılarak sistemin takibi yapılmaktadır. Web tabanlı arayüz üzerinden su kalitesi verileri canlı olarak izlenebilirken, yönlendirme ve diğer görevler önceden tanımlanmış davranışlarla yürütülmektedir. Kurulan bu düşük maliyetli kablosuz sistemin hem izleme hem de kontrol açısından pratik bir çözüm sunduğunu, kullanıcı müdahalesi gerektirmeden çevresel verilerin etkili şekilde toplanabildiğini vurgulamaktadır (Chang vd. 2021).

Kontrol istasyonu olarak Bluetooth destekli mobil cihaz kullanılan sistem geliştirilmiştir. Sistem, mobil uygulama üzerinden gelen komutlarla yönlendirilmekte ve veri toplama işlemleri tetiklenmektedir. Kontrol istasyonu hem teknenin hareketini kontrol etmek hem de su kalitesi ölçüm sürecini başlatmak için kullanılmaktadır. Bluetooth üzerinden haberleşmenin basit yapısı ve düşük enerji tüketimi ile mobil cihazlarla hızlı entegrasyon sunulduğu, ancak menzil kısıtlaması nedeniyle sistemin küçük alanlarda çalışmaya uygun olduğu belirtilmektedir. Kullanılan arayüz, sade bir mobil uygulama olarak tasarlanmıştır (Dsouza vd. 2021).

Bir başka çalışmada sistemin kontrol ve izleme süreçleri, OneNET bulut platformu üzerinden gerçekleştirilmektedir. Wi-Fi aracılığıyla tekne ile bulut platformu arasında bağlantı kurulur ve ölçüm verileri anlık olarak OneNET kontrol panelinde görselleştirilir. Kontrol istasyonu olarak internet bağlantılı bir bilgisayar ya da mobil cihaz kullanılabilir. Kullanıcılar platform üzerinden verileri izleyebilir, geçmiş ölçümleri

inceleyebilir ve sistemin durumunu takip edebilir. OneNET'in sunduğu görsel paneller ile uzaktan izleme ve veri yönetimi sürecinin oldukça etkili hale geldiği, sistemin ölçeklenebilirliğini ve sürdürülebilirliğini artırdığını ifade edilmektedir (Xing vd. 2020).

2.1.9 İYA gövde tasarımı

İYA, su ortamlarında uzun süreli görevler üstlenen sistemler oldukları için, taşıyıcı gövdelerinin (kabuk yapılarının) hem mekanik dayanıklılık hem de su yüzeyindeki yüksekliği açısından özenle tasarlanması gerekir. Kabuk tasarımı; aracın suyla temas eden yüzey alanını, sürtünme katsayısını, yön kararlılığını ve stabilitesini doğrudan etkiler. Bu nedenle hidrodinamik verimliliği yüksek, zemin veya çevresel etkilere dirençli, devrilmelere karşı dayanıklı formlar tercih edilmelidir (Rashid vd. 2022).

İYA'ların kabuk tasarımlarında da farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıklar su ortamında İYA içerisinde bulunan donanımların muhafazası, İYA'nın hareket ve yönlendirmesi, hızı, taşınabilirliği yapılarından kaynaklı oluşmaktadır. İYA'lar, su üzerinde belirli bir kısmı suda ama tamamen batmayacak şekilde olmalıdır. Bu amaçla düz tabanlı tekne (Şekil 2a), v tabanlı tekne (Şekil 2b), yuvarlak tabanlı tekne (Şekil 2c) ve katamaranlar (Şekil 2d) gibi tasarımlar bulunmaktadır (Boatsmart 2025).



Şekil 2.2. İYA kabuk tasarımları a) Düz tabanlı; b) V-tabanlı; c) Yuvarlak tabanlı; d) Katamaran

Bu tasarımların dışında kullanım amacına yönelik özel tasarımlar da uygulanabilmektedir. Katamaran formları, stabilite, suya tutunma, daha az batma ve geniş alan gibi avantajlarının yanı sıra hız açısından da yüksek hızlara ulaşamamaktadır. Tek tabanlı formlarda v taban yüksek hız ve manevra kabiliyeti avantajına, düz taban ise sığ sularda hareket edebilme avantajına, yuvarlak taban ise dalgadan az etkilenme avantajına sahiptir.

Dsouza vd. (2021) su parametrelerini izleme amacıyla düz taban bir tekne tasarlamıştır. Kare ve düz bir tabana sahip olması, teknenin su yüzeyinde daha stabil kalmasını sağladığı belirtilmektedir. Kare formu Poli Vinil Klorür (Polyvinyl Chloride-PVC) malzeme ile oluşturulmuştur (Dsouza vd. 2021).

Siyan ve ark. tarafından yapılan çalışmada İYA katamaran formunda hazırlanmıştır. Katamaran formu için fiberglas malzemeden yapılmış iki adet v tabanlı tekne kullanılmaktadır. Bu iki tekne birbirine paralel olarak bağlanmıştır. Elektronik ekipmanları yerleştirmek ve güvenliği için birbirine bağlı iki teknenin orta bölümüne su geçirmez bir kutu yerleştirilmiştir. Bu tasarım ile oluşturulan İYA'nın ağırlık merkezi orta nokta olarak belirlenmiştir. Bu tasarımın stabilite gibi avantajları olsa da her iki kabukta

konumlandırılan motor, pervane ve şaftın suyla temas açısı hassas bir biçimde ayarlanmalıdır (Siyang ve Kerdcharoen 2016).

Malzeme seçimi, kabuk yapısının performansını ve uzun ömürlülüğünü etkileyen kritik bir unsurdur. Hafiflik, dayanıklılık, su geçirmezlik, ultraviyole ışınlarına karşı direnç ve üretim maliyeti gibi faktörler göz önünde bulundurularak uygun malzeme seçilmelidir. İYA sistemlerinde yaygın olarak kullanılan kabuk malzemeleri arasında fiberglas (Setiawan vd. 2022), karbon fiber, Yüksek Yoğunluklu Polietilen (High-Density Polyethylene HDPE) (Arko vd. 2020), PVC levhalar (Dsouza vd. 2021), alüminyum alaşımlar ve plastikler (Cao vd. 2018) yer alır. Hafif ve suya dayanıklı plastik türevleri özellikle düşük maliyetli sistemlerde kullanılırken; karbon fiber gibi ileri mühendislik malzemeleri, daha yüksek bütçeli ve profesyonel uygulamalarda tercih edilmektedir.

2.2 Otonom Hareket ve Engel Algılama Sistemleri

İYA, deniz, göl ve nehir gibi su yüzeylerinde otonom hareketlerini insan müdahalesi olmadan gerçekleştirirler. Bu araçların otonom olarak görevlerini sürdürebilmeleri, çevresel izlem, karar verme ve hareket planlama gibi yeteneklerle donatılmalarını gerektirir. Bu bağlamda otonom hareketin nasıl sağlandığı ve engel algılamanın hangi yöntemlerle gerçekleştirildiği, literatürde yapılan birçok akademik çalışma ile açıklanmaktadır (Faisal vd. 2019).

İYA'ların otonom hareket kabiliyeti genel olarak üç ana bileşenden oluşur: algılama, planlama ve kontrol. Algılama bileşeni, aracın çevresini anlayabilmesi için gerekli olan sensör verilerinin toplanması ve işlenmesini kapsar. Bunlar arasında LiDAR, kamera, radar, GPS, IMU, pusula ve ultrasonik sistemler yer alır. Jetyak platformunda kullanılan sistemlerde LiDAR, GPS ve stereo kameralar aracılığıyla çevresel veriler yüksek çözünürlükle toplanmakta ve işlenmektedir. Bu sayede İYA, çevresindeki su üstü ve su altı engellerini algılayabilir, kıyıya olan mesafeyi ölçebilir ve diğer hareketli nesneleri takip edebilmektedir (Moulton vd. 2018).

Planlama aşaması, algılama sistemlerinden elde edilen veriler doğrultusunda aracın izlemesi gereken yolun belirlenmesini sağlar. İYA'ların hareket ve yönlendirme donanımlarının verimli bir şekilde kullanılabilmesi için farklı tipte algoritma ve hesaplama tekniği kullanılmaktadır. LiDAR kullanarak hazırlanan sistemlerde GNC (Villa vd. 2020), ATESOA (Guardeño vd. 2020) algoritmaları, navigasyon radarı kullanılarak hazırlanan sistemlerde IACO (Wang vd. 2019) algoritması, kamera kullanılarak hazırlanan sistemlerde Skip-ENet (Kim vd. 2019), U-net CNN (Steccanella vd. 2020), YOLOv3 (Kong vd. 2020) gibi algoritmalar kullanılmaktadır. Bu algoritmalar, aracın hedef konuma en güvenli ve en verimli şekilde ulaşmasını, hareket ve yönlendirme donanımlarının etkili kullanımını sağlar.

Kontrol bileşeni, planlama modülünden gelen rota ve hız bilgilerinin fiziksel harekete dönüştürülmesini sağlar. Bu noktada sıklıkla Oransal – İntegral – Türevsel (Proportional – Integral – Derivative-PID) kontrol, adaptif kontrol gibi yöntemler kullanılmaktadır. Ancak su ortamının dinamik ve zorlu yapısı, daha esnek ve öğrenilebilir sistemlerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle çift katmanlı kontrol yapıları, fiziksel olarak hedef pozisyon ve hız belirlenirken, yazılımsal olarak bu hedeflerin gerçekleştirilmesi için gerekli kuvvet ve tork değerleri hesaplanmaktadır. Sami Souissi ve

arkadaşları tarafından geliştirilen sistemde, çevresel etkiler ve sistem parametrelerindeki belirsizlikler adaptif kontrol yapısıyla giderilmektedir (Souissi vd. 2020).

İYA'ların karşılaştığı en kritik problemlerden biri de engellerle çarpışmayı önleyebilmektir. Ayrıca, Uluslararası Denizcilik Örgütü (International Maritime Organization-IMO) tanımladığı Denizde Çatışmayı Önleme Uluslararası Kuralları (International Regulations for Preventing Collisions at Sea-COLREG) çerçevesinde, deniz taşıtlarının karşılaşması durumunda nasıl hareket etmeleri gerektiğini tanımlanmaktadır. Engel algılama sistemleri bu anlamda hayati bir rol üstlenir. Bu sistemler genellikle birden fazla sensör verisinin birleşimiyle çalışır. LiDAR sensörleri ile oluşturulan 3 boyutlu nokta bulutu verileri, aracın çevresindeki statik ve dinamik engelleri yüksek doğrulukla tespit etmeye olanak tanır. Radar sistemleri ise özellikle uzun mesafeli tespitlerde ve gece koşullarında üstün performans sergiler. Kamera sistemleri de maliyet verimliliği sayesinde özellikle küçük alanlarda tercih edilir. Algılama sistemleri yalnızca engelleri tespit etmekle kalmaz, aynı zamanda bu engellerin yönünü ve hızını tahmin ederek çarpışma ihtimallerini analiz eder. Böylece önceden belirlenmiş güvenlik bölgeleri içinde alınacak manevra kararları oluşturulur (Kufuor vd. 2020; Martinez-Diaz ve Soriguera 2018).

2.3 CBS ile Su Parametrelerinin Değerlendirilmesi

Bilgisayar destekli veri analizi ve görselleştirme araçları, su alanlarının izlenmesi ve yönetimi çalışmalarında önemli rol oynamaktadır. Özellikle CBS bu amaçla dünya çapında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Deniz, akarsu ve göl gibi su alanlarının zenginliği açısından büyük bir jeopolitik konumda bulunan ülkemizde bu tür çalışmalarda CBS kullanımı giderek önem kazanmakta ve yaygınlaşmaktadır. Su parametrelerinin toplanıp ölçülmesinde geleneksel yöntemler kullanılarak yapılan çalışmalarda (DeepChand vd. 2022; Hussein vd. 2020; Venkataraman ve Manikumari 2019; Özşahin 2013) elde edilen verilerin analizi yapılmış ve tematik haritalar oluşturulmuştur. Tematik haritalar, su parametrelerinde ölçülen değerlere göre ve/veya verilerin analizi sonucu elde edilen yeni indeksleme sonucu elde edilen değerlere göre oluşturulabilmektedir.

Mekânsal veri analizinde sıklıkla başvuru alan enterpolasyon, belirli noktalarda ölçülmüş olan değerlerden yola çıkarak, ölçüm yapılmamış konumlardaki olası değerlerin tahmin edilmesi sürecidir. Günümüzde bu yöntem; yer altı su kalitelerinde ara değerlerin ve değişimlerin belirlenmesinde (Kurunc vd. 2016), yağış miktarları verilerinin takip edilmesinde (Yang vd. 2015; Khorrami ve Gündüz, 2019), akarsu (Khouini vd. 2021), göl (Murphy vd. 2010) veya deniz sularının (Tanjung vd. 2020) su kalite değerlerinin değişimlerinin izlenmesinde kullanılmaktadır. Enterpolasyonun temel amacı, sınırlı sayıda mekânsal veriden sürekli bir yüzey üretmektir. Bu sayede, çalışma alanından elde edilen noktasal örnekler kullanılarak geniş alanlara ilişkin kestirimlerde bulunmak mümkün hale gelir. Ancak enterpolasyonun başarısı; verilerin mekânsal dağılımına, yoğunluğuna, doğasına ve seçilen yöntemin uygunluğuna bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik gösterebilir (Li ve Heap, 2008).

Enterpolasyon yöntemleri, genel olarak iki temel gruba ayrılmaktadır: deterministik ve stokastik (istatistiksel) yöntemler. Deterministik yöntemler, tahminleri yalnızca bilinen verilerle bu verilerin konumları arasındaki geometrik ilişkileri dikkate alarak yapar; bu nedenle aynı giriş verileriyle her zaman aynı sonuçları üretir. IDW,

Spline, Doğal Komşu, Trend Yüzeyi Analizi ve Radyal Tabanlı Fonksiyonlar bu gruba örnek olarak verilebilir (Childs 2004). Buna karşın stokastik yöntemler, mekânsal otokorelasyonu dikkate alarak, sadece tahmini değil, aynı zamanda bu tahmine ilişkin belirsizliği de hesaplar. Stokastik yöntemlerin en bilinen örneği Kriging olup, bu yöntem varyogram analizine dayanır ve Ordinary Kriging, Universal Kriging, Co-Kriging, Indicator Kriging gibi alt türleri bulunmaktadır (Burrough vd. 2015).

2.3.1 Ters mesafe ağırlıklandırması (IDW)

IDW, en basit ve en yaygın enterpolasyon yöntemlerinden bir tanesidir. Bu yöntemde, bilinmeyen bir noktanın değeri, çevresindeki bilinen noktalardan olan uzaklığına ters orantılı ağırlıklar verilerek hesaplanır. Yani yakın komşular daha büyük etki ederken, uzak noktalar daha az etki eder. IDW'nin en temel avantajı uygulama kolaylığı ve hesaplama hızıdır. Ama bu yöntem, veriler az olduğunda ve konumlar arasındaki ilişki göz önüne alınmadığında daha çok hata yapabilir (Singh ve Verma, 2019).

Ferchichi vd. (2021) ile yaptıkları çalışmada okyanus ısının artışından kaynaklı yaşanabilecek bir deniz bakterisi olan *Vibrio* canlısının büyüme riski göstergelerini belirlemek için numune alınan noktalar dışında kalan ara değerlerin tespiti için IDW enterpolasyon yöntemini kullanmışlardır (Ferchichi vd. 2021).

Cezayir körfezinde yapılan çalışmada Benzouai ve arkadaşları, kıyı suyu kalitesi fiziksel parametreleri toplanıp değerlendirilmiştir. Kıyı suyunun çevresel durumlarının izlenmesi ve eğilimlerinin hesaplanması amaçlanmış, mekânsal ve zamansal bir değerlendirme yapılmıştır. 1989–2009 yılları arasında farklı nokta ve zamanlara da alınan fiziksel parametre değerleri IDW enterpolasyon yöntemini kullanarak analiz edilmiştir (Benzouai vd. 2015).

Sahil şeridinde, kıyından 200 m, 500 m ve 1 km açıktan su numuneleri aylık olarak toplanarak, sıcaklık ve klorofil-A değerleri IDW enterpolasyon yöntemi ile analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonucunda, sıcaklık değeri ile klorofil-a konsantrasyonu arasındaki ilişki ve sistemin sahil şeridinde güvenli kullanım alanlarının tespitinde yararlı olduğu belirtilmiştir (Muthulakshmi vd. 2015). Fakat bazı araştırmalarda IDW'nin aykırı değerlerden etkilenmeye açık olduğu ve düşük örneklem yoğunluğunda yetersiz performans gösterdiği ifade edilmiştir (Maliqi ve Penev 2019).

2.3.2 Kriging

Kriging, uzamsal istatistik temelli bir enterpolasyon yöntemidir ve yalnızca nokta değerleriyle değil, bu değerlerin mekânsal dağılımındaki ilişkiyi de dikkate alır. En yaygın türlerinden biri olan ordinary kriging, örnek noktaların arasındaki varyansı temsil eden semivariogram modelleri aracılığıyla tahmin yapar. Bu modelleme sayesinde tahmin edilen her nokta için bir hata tahmini de sağlanır (Singh ve Verma 2019).

Beris Barajı çalışmasında Kriging, IDW'ye kıyasla daha hassas sonuçlar üretmiştir. Çalışmada Malezya Çevre Bakanlığı su kalitesi indeksine göre olağan kriging standart sapması sıfır olarak belirtilmiş ve bu değer tahminlerin yüksek doğrulukta olduğunu göstermektedir (Isa vd. 2024).

Shatt Al-Arab Nehri'nin su kalitesini mekânsal ve zamansal açıdan değerlendirmek amacıyla yapılan çalışmada kriging enterpolasyon yöntemi kullanılarak mekânsal dağılım haritaları oluşturulmuştur. Kriging yöntemini su kalitesinin mekânsal analizinde uygun ve güvenilir bir teknik olarak değerlendirmiş, bu yöntemin su kaynaklarının izlenmesi ve yönetimi açısından etkili bir araç olduğunu vurgulamıştır (Lateef vd. 2020).

2.3.3 Spline

Spline enterpolasyonu, belirli bir yüzey eğriliğini minimize ederek giriş verileri arasında yumuşak geçişli bir yüzey oluşturmayı amaçlar. Bu yöntem, özellikle verilerin düzgün dağıldığı alanlarda oldukça başarılıdır ve genellikle “pürüzsüz” yüzeyler üretir. Ancak, veri noktalarının az olduğu ya da yüksek varyansa sahip olduğu durumlarda gerçek dışı tahminler yapılabilir. Spline germe etkisi, veri setinde kaydedilen en düşük ve en yüksek değerlerin altında ve üstündeki değerleri tahmin etmeye yardımcı olur. Sonuç olarak, Spline enterpolasyon yaklaşımı, örnek verilerde yer almayan yüksek ve düşük değerleri tahmin etmek için idealdir (İsa vd. 2024).

Tweed Nehri havzasında yıllar boyunca toplanan nitrat konsantrasyonu verileri kullanılarak, spline yöntemiyle hem mekânsal hem de zamansal eğilimler modellenmiştir. Çalışmada, akış yönü, akım miktarı ve birleşim noktaları gibi nehir ağlarına özgü özellikler dikkate alınmış ve bu yapılar spline tabanlı modellere başarıyla entegre edilmiştir. Spline yaklaşımı ile seyrek veri noktalarında istikrar sağladığını, akışa bağlı lokal değişimleri yansıttığını, ayrıca zaman ve mevsimsel etkileri de modele dahil etmede avantaj sağladığını vurgulamaktadır. Bu nedenle spline yöntemi hem esneklik hem de hesaplama açısından nehir ağlarında çevresel değişkenlerin modellenmesi için güçlü bir araç olarak önerilmektedir (O'Donnell vd. 2014).

2.3.4 Doğal komşu

Doğal Komşu enterpolasyonu, bir noktaya en yakın komşu noktaların ağırlıklı ortalamasını alarak hesaplama yapan deterministik bir yöntemdir. Bu yöntem Voronoi diyagramlarına dayanır ve tahmin edilen noktanın etki alanına giren örnek noktalar üzerinden enterpolasyon yapılır. En önemli avantajı, giriş verilerinin dışında değer üretmemesidir.

Yapılan bir çalışmada elde edilen bulgular, doğal komşu enterpolasyon yönteminin, akarsu habitat verilerinin tahmininde diğer yöntemlere kıyasla daha yüksek doğruluk sağladığını ortaya koymuştur. Substrat tahmininde doğal komşu yöntemi, %5'lik örneklem oranı ile %61 noktasal eşleşme ve %79 yüzey alanı uyumu sağlayarak en başarılı sonuçları üretmiştir. Aynı şekilde, su derinliği tahmininde de doğal komşu yöntemi ile yapılan enterpolasyonların %95'i, gerçek değerlerin ± 12 cm'lik hata payı içinde kalmıştır. Bu yüksek doğruluk oranları, doğal komşu yönteminin mekânsal olarak otokorelasyon gösteren habitat verileriyle çalışmaya son derece uygun olduğunu ve sınırlı sayıda örnekleme noktasından yola çıkarak güvenilir tahmin haritaları üretilebileceğini göstermektedir (Sheehan ve Welsh, 2009).

3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, sistemin geliştirilmesi sürecinde kullanılan donanımlar, tasarımlar ve yazılımlar ayrıntılı olarak ele alınmaktadır. Sistem, su parametrelerini ölçüm, İYA ve kontrol paneli olmak üzere üç temel bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenlerin her biri, yazılım, donanım ve tasarım başlıkları altında incelenerek sistemin yapısı ve işleyişi hakkında kapsamlı bir değerlendirme yapılmaktadır.

3.1 Su Parametreleri Ölçüm Sistemi Donanımı

Su parametre ölçüm sistemi, bulunduğu ortamın su kalitesini belirleyen fiziksel ve kimyasal parametreleri sensörler aracılığıyla ölçen, aynı zamanda su numuneleri toplayarak laboratuvar analizine olanak tanıyan bütünleşmiş bir sistemdir. Bu sistem, ölçüm ve numune toplama işlevlerini eş zamanlı ve senkronize bir şekilde gerçekleştirebilmek için özel olarak tasarlanmış bir elektronik kontrol devresi tarafından yönetilmektedir. Sistemde kullanılan donanımlar; sensörler, mikrodenetleyici, pompalar, numune alım sistemi, kablosuz iletişim modülü ve devre kartı bu bölümde alt başlıklar halinde anlatılmaktadır.

3.1.1 Sensörler

Su parametreleri ölçüm sisteminde elektriksel iletkenlik (EC), pH, sıcaklık, oksidasyon indirgenme potansiyeli (ORP) ve çözünmüş oksijen (DO) olmak üzere 5 farklı sensör kullanılmaktadır. Bu sensörler literatürde yaygın olarak ve yerüstü su kalitesi yönetmeliğinde su kalitesini belirlemek için yapılan ölçümler dikkate alınarak belirlenmiştir.

EC; su kalitesi analizinde temel parametrelerden biri olup, özellikle doğal su kaynaklarında kirlilik takibi ve iyonik içerik değerlendirmesi açısından önem taşımaktadır. Bu tez çalışmasında, suyun elektriksel iletkenliğini ölçmek ve çözünmüş iyon konsantrasyonunu belirlemek amacıyla Atlas Scientific (AS) tarafından geliştirilen bir sensörü kullanılmıştır (Şekil 3.1a). Sensörün yüksek doğruluk oranına sahip olması, geniş ölçüm aralığı sunması, kompakt yapıda tasarlanmış olması ve dijital veri çıkışı sağlayabilmesi, tercih edilmesinde belirleyici faktörler arasında yer almıştır (Çizelge 3.1).

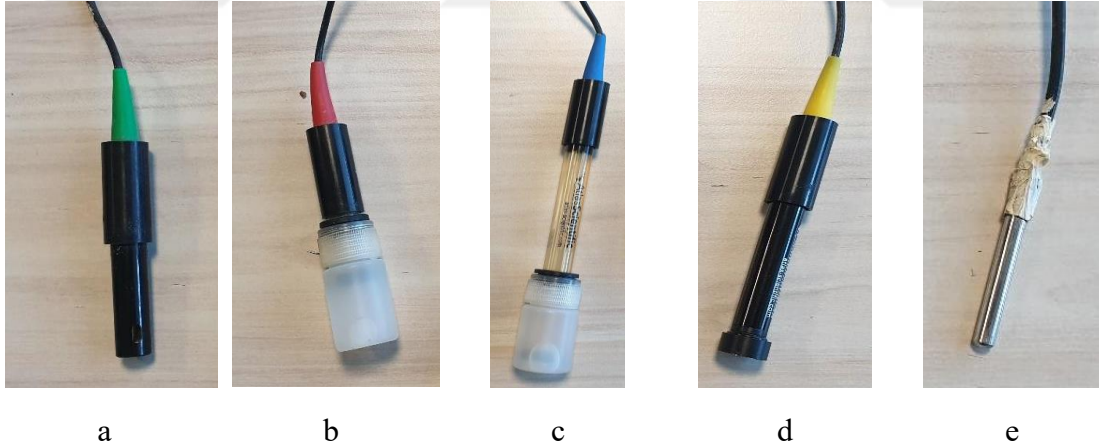
pH; su kalitesinin temel göstergelerinden biri olup; çevresel izleme, su arıtma sistemleri, tarım uygulamaları ve laboratuvar testleri gibi pek çok alanda kritik bir parametredir. Bu tez çalışmasında, sıvıların asidik ya da bazik karakterini belirlemek amacıyla AS tarafından geliştirilen sensör kullanılmıştır (Şekil 3.1b). pH sensörü, yüksek ölçüm hassasiyeti ve uzun süreli stabilitesi sayesinde güvenilir sonuçlar vermektedir. Sensör hem manuel hem de otomatik sistemlerde kolayca kullanılabilir şekilde tasarlanmış olup, gömülü sistemlere doğrudan entegre edilebilme avantajına sahiptir. Yüksek hassasiyet, kararlı çıkış sinyali, kalibrasyon ve dijital veri aktarımı gibi özellikleri ile sisteme entegre edilmiştir.

ORP; bir sıvının elektron alma veya verme eğilimini göstermektedir. Özellikle su kalitesinin değerlendirilmesi, dezenfeksiyon etkinliği ve kimyasal reaksiyonların izlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında, suyun ORP parametresini ölçmek amacıyla AS tarafından geliştirilen sensör kullanılmıştır (Şekil

3.1c). Yüksek hassasiyetli ölçüm kabiliyeti, hızlı tepki süresi ve uzun ömürlü elektrot yapısı ile hem sabit sistemlerde hem de taşınabilir uygulamalarda kullanılabilecek şekilde tasarlanmış, dijital veri çıkışıyla gömülü sistemlere entegrasyonu kolaylaştırmaktadır. Geniş ölçüm aralığı, kararlı sinyal çıkışı, modüler yapısı ve kalibrasyon desteği gibi teknik avantajları öne çıkmaktadır (Çizelge 3.1).

DO; su kalitesinin kritik göstergelerinden bir tanesi olup özellikle sucul canlıların yaşamı, biyolojik süreçlerin takibi ve çevresel izleme açısından büyük önem taşımaktadır. Bu tez çalışmasında, su ortamındaki DO seviyesini ölçmek amacıyla AS tarafından geliştirilen çözünmüş oksijen sensörü kullanılmıştır (Şekil 3.1d). Sensör; akarsular, göller, deniz suyu, atık su ve laboratuvar örnekleri gibi çok çeşitli su kaynaklarında kullanılmak üzere tasarlanmış olup, dijital veri aktarımı ve düşük enerji tüketimi sayesinde gömülü sistemlerle entegrasyonda kolaylık sağlamaktadır (Çizelge 3.1).

Sıcaklık parametresi, sadece canlı yaşamını üzerinde doğrudan etkileriyle değil aynı zamanda aynı zamanda çözünmüş oksijen, iletkenlik ve pH gibi parametrelerin yorumlanmasında kritik rol oynamaktadır. Bu tez çalışmasında, sıvı sıcaklığının hassas bir şekilde ölçülmesi amacıyla DS18B20 dijital sıcaklık sensörü kullanılmıştır (Şekil 3.1d). DS18B20, dijital çıkışlı bir sensör olup, gömülü sistemlere kolay entegrasyon sağlamaktadır. Ayrıca tek kablo haberleşme protokolü sayesinde, birden fazla sensör aynı veri hattı üzerinden bağlanabilmekte ve bu da sistem tasarımında büyük esneklik sunmaktadır. Kompakt yapısı, düşük enerji tüketimi ve güvenilir ölçüm gibi özellikleri öne çıkmaktadır (Çizelge 3.1).



Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan sensörler **a)** EC sensörü; **b)** pH sensörü; **c)** ORP sensörü; **d)** DO sensörü; **e)** Sıcaklık sensörü

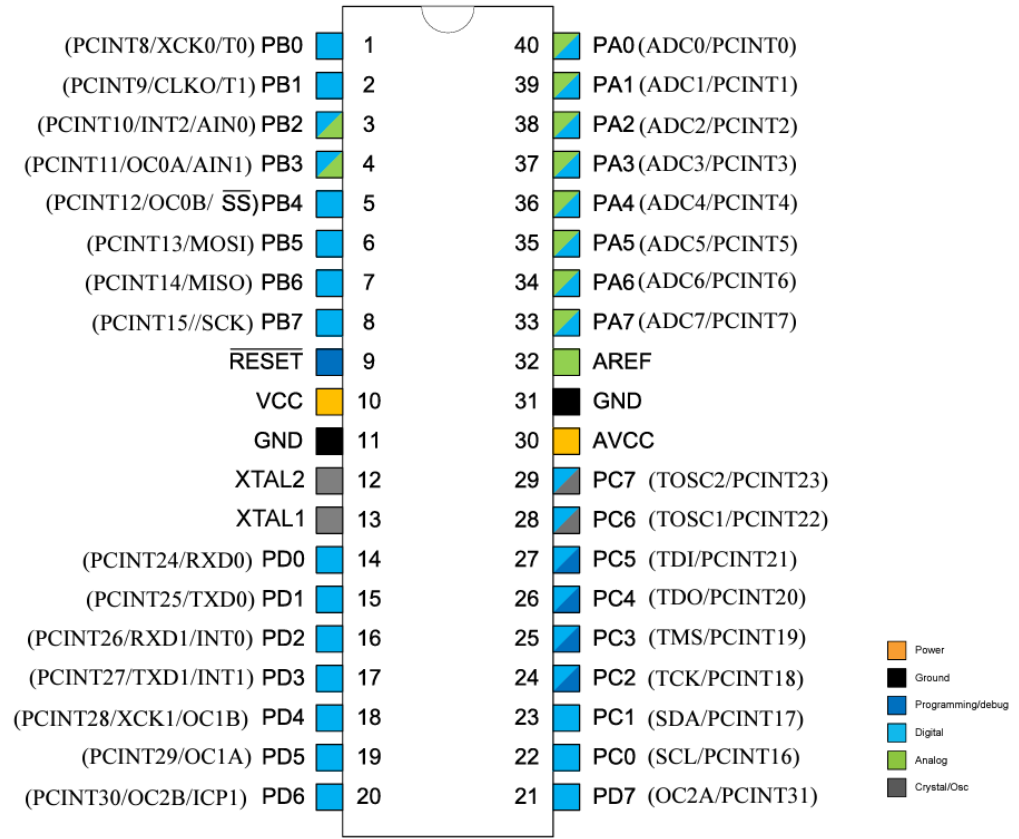
Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan sensörlere ait özellikler

Tür	Model	Çalışma Voltajı	Değer Aralığı	Çözünürlük	Hata Payı	Çıkış Sinyali
Sıcaklık	DS18B20 (Semiconductor 2025)	3.3 V- 5 V	-55 – 125°C	0.1°C	± 0.5°C	Analog
pH	pH (Atlas Scientific 2025)	3.0 V- 5 V	0–14 pH	0.001 pH	± 0.002 pH	Dijital
EC	İletkenlik (Atlas Scientific, 2025)		5 – 200000 µS/cm	<99 ⇒ 0.01 µS/cm <999 ⇒ 0.1 µS/cm <9999 ⇒ 1 µS/cm <99990 ⇒ 10 µS/cm <999900 ⇒ 100 µS/cm	± 2%	Dijital
DO	Çözünmüş Oksijen (Atlas Scientific, 2025)		0– 100 mg/L	-	± 0.05 mg/L	Dijital
ORP	ORP (Atlas Scientific, 2025)		-1019.9 mV – +1019.9 mV	-	± 0.1 mV	Dijital

3.1.2 Mikrodenetleyici

Mikrodenetleyiciler dışarıdan gelen verileri hafızasına alıp onları işleyen ve sonucunda çıktı elde edilen bilgisayarlardır. Mikrodenetleyicilerin aritmetik-mantık birimleri, yazmaçları, giriş/çıkış portları, analog sayısal dönüştürücüleri, zamanlayıcıları gibi çevre birimleri bulunmaktadır. Su parametreleri ölçüm sisteminde mikrodenetleyici sensörlerden gelen sinyalleri toplayıp işleme, pompa ve motor gibi diğer donanımların kontrolünü sağlama amacıyla kullanılmaktadır. Bu işlemler için mikrodenetleyicinin küçük boyutta olması, düşük güç tüketimine sahip olması, çevresel koşullara dayanıklı olması önemlidir.

Bu tez çalışmasının su parametrelerinin izlenmesi için geliştirilen bölümünde mikrodenetleyici olarak Atmel mikrodenetleyici ailesinden Atmega 324 modeli kullanılmaktadır (Atmel 2016). Şekil 3.2.'de mikrodenetleyiciye ait pin konfigürasyonları gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Atmega 324 mikrodenetleyici pin konfigürasyonu (Atmel 2016)

Mikrodenetleyici üzerinde 8 adet 10 bitlik Analog-Dijital Dönüştürücü (ADC) modülü, 2 adet Evrensel Senkron Asenkron Alıcı/Verici (USART) modülü 32 adet programlanabilir giriş/çıkış pini, 2 adet 8 bitlik zamanlayıcı, bir adet 16 bitlik zamanlayıcı modülü bulunmaktadır. Bunlara ek olarak diğer özellikler şunlardır (Atmel 2016);

- 2 KB SRAM barındırır.
- Program belleği olarak 32 KB flash bellek barındırır.
- 1 KB EEPROM barındırır.
- Bir 16 bitlik genel amaçlı zamanlayıcı ve iki 8 bitlik genel amaçlı zamanlayıcı barındırır.
- Port A, Port B, Port C ve Port D olmak üzere dört giriş ve çıkış portu vardır. Bu portlar GPIO görevini görür. Aynı zamanda bu portları belirttiği bazı bacaklar ADC, PWM, UART, SPI görevlerini de görür.
- Altı PWM kanalı barındırır. Bu PWM kanalları genel amaçlı zamanlayıcılarıyla ayarlanır.
- İki SPI kanalı barındırır. Bir bağımlı SPI kanalı vardır.

- İki UART kanalı barındırır. Bu UART kanalını USART ya da SPI olarak kullanılma olanağı vardır.
- Watchdog zamanlayıcısı barındırır.
- Mikrodenetleyici üzerinde hata ayıklama olanağı vardır.
- 1.8V-5.5V gerilim aralığında çalışabilir.
- Etkin çalışmada 0.4 mA akım çeker. Güç azaltma kipinde 0.1µA akım çeker.
- Enerji tasarrufu modunda 0.6 µA akım çeker.
- -40°C'den 105°C'ye kadar sıcaklık aralığında çalışabilir.

3.1.3 Pompa

Sistemde su, boru hattı üzerinden ilerlemektedir. Suyun boru hattına taşınması hidrofor ile yapılırken, numune kaplarına suyun taşınması peristaltik sıvı pompaları aracılığıyla gerçekleştirilmektedir.

Peristaltik pompa esnek bir tüp veya hortum ile bir sıvıyı bir yerden başka bir yere aktarmak için kullanılmaktadır. Pompa hortumun dışından tüp boyunca sıvıyı ilerletmek için kasanın içerisindeki bir dizi rulo tarafından basınç oluşturur. Bu silindirik rulolar boruyu sıkarak ve gevşeterek içindeki sıvının boru boyunca ilerlemesini sağlar. Peristaltik sıvı pompalarında sıvı sadece borunun iç tarafı boyunca ilerlediği için sıvının kirlenme veya sıvıda parametre değişikliği riski en aza indirilmiştir. Pompalama işlemi sırasında su pompa ekipmanlarına temas etmediğinden sıvının kirlilik değerlerinde bir değişim olması önlenmiş olur. Buna ek olarak numune alımı işlemi için uygun miktarın belirlenmesini sağlar. Bu nedenle bu çalışmada numune alımı için 12V ile çalışabilen, silikon hortumlu, ileri geri hareket edebilen ve üç rotorlu Şekil 3.3'de gösterilen 4 adet peristaltik sıvı pompası kullanılmaktadır.



Şekil 3.3. Peristaltik pompalar

Hidrofor, suyu hortumun su içindeki ucundan, tahliye ucuna taşımak için kullanılır. Tez çalışmasında suyun sensörlere kadar taşınması için güçlü bir pompa gerekmektedir. Bu ihtiyacı karşılamak için Şekil 3.4'te gösterilen 12 V enerji ile çalışabilen, 2.4 bar basınca kadar çekim sağlayabilen, deniz, akarsu, göl gibi farklı sularda çalışabilecek ve aynı zamanda güç tüketimi düşük bir pompa kullanılmaktadır. Kullanılan su pompası bağlantısı sistemin en sonuna yapılmıştır. Bu sayede pompadan kaynaklı sıvının kirlenme veya sıvıda parametre değişikliği riski ortadan kaldırılmıştır.



Şekil 3.4. Hidrofor su pompası

3.1.4 Enerji modülü

Su parametresi ölçüm sistemi enerji modülü batarya, güneş paneli ve regülatörlerden oluşmaktadır. Sistemin enerjisi 12V 7Ah'lık batarya ile sağlanmaktadır. Sistemin çalışması için gerekli olan 5V'luk enerji bataryadan alınan 12V'luk enerjinin doğru akım (DC) voltaj regülatörü ile elde edilmektedir. Buna ek olarak güneş panelinden elde edilen enerji bataryaya uyumlu olması için yine regülatör kullanılmıştır. Bu sayede su parametre ölçüm sisteminde enerji sürekliliği sağlanmaktadır. Güneş paneli ve regülatöre ait bilgiler Çizelge 3.2'de gösterilmektedir.

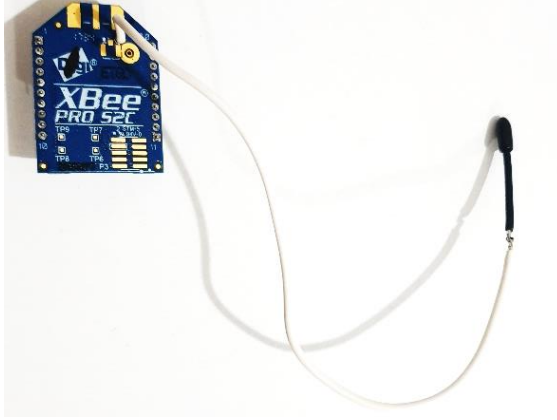
Çizelge 3.2. Güneş paneli ve regülatör özellikleri

	Güneş Paneli	Regülatör
Maksimum Güç	25Wp	240W
Maksimum Voltaj	20.84V	24V
Maksimum Akım	1.23A	10A
Boyut	355*420*20 mm	10*85*40mm
Ağırlık	1.86 kg	0.5 kg

3.1.5 Haberleşme modülü

Su parametreleri ölçüm sistemi İYA ile sürekli haberleşmektedir. İYA ile iletişim fiziksel bağlantı olmadan kablosuz şekilde gerçekleşmektedir. Haberleşme modülü olarak XBee Pro S2C (Şekil 3.5) modeli kullanılmıştır. XBee Pro S2C, Zigbee (IEEE 802.15.4) protokolünü ile çalışan güçlü bir kablosuz haberleşme modülüdür. 900 MHz veya 2.4 GHz bantlarında çalışabilir. 17 dBm (50 mW) çıkış gücü sayesinde açık alanda 3 km'ye kadar menzili bulunmaktadır. USART, SPI ve I2C gibi arayüzleri desteklemektedir.

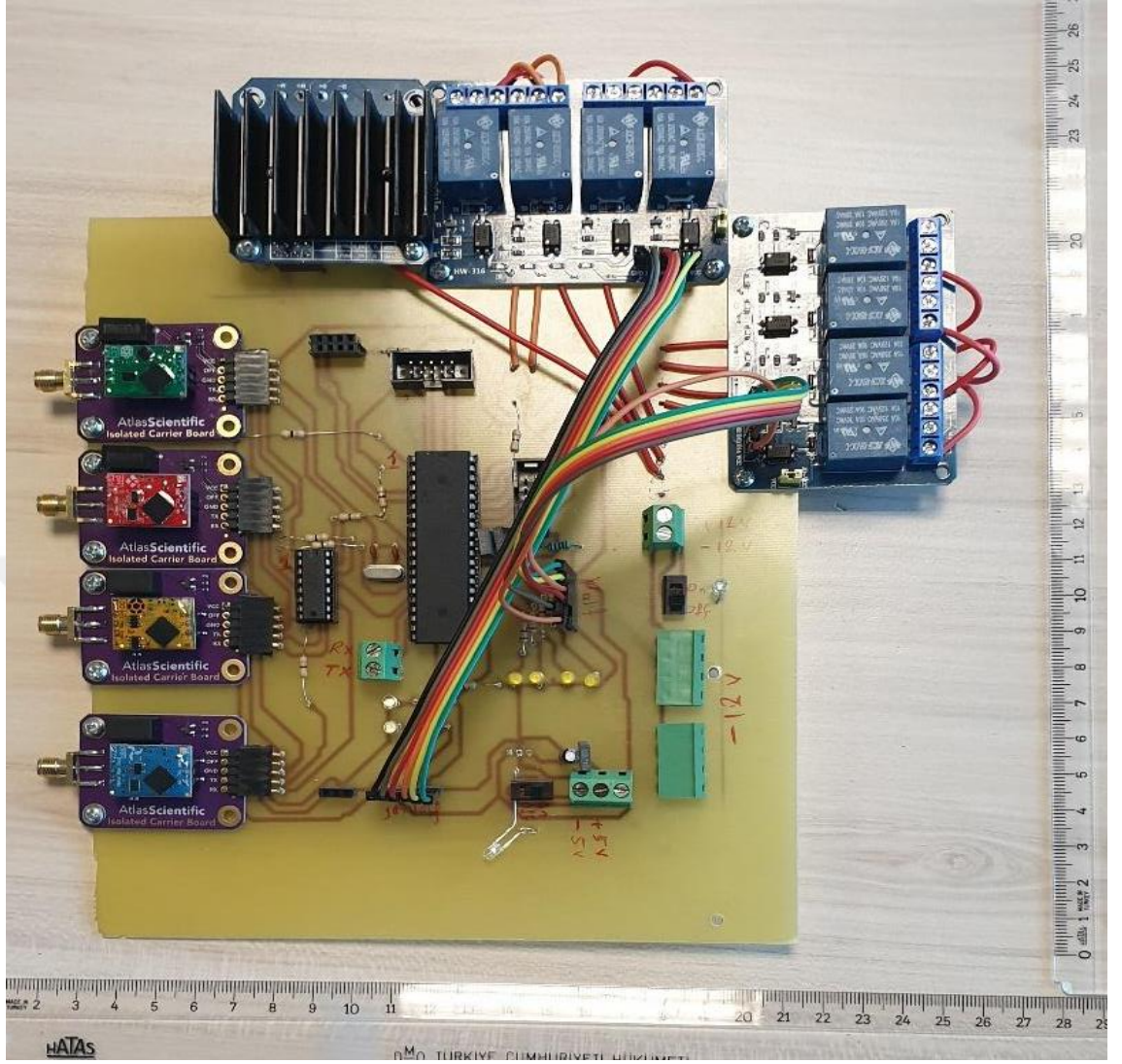
Çalışmada USART arayüzü kullanılmıştır. Düşük güç modu, uyku modu gibi özellikleri sayesinde sistemde enerji sürekliliğine katkı sağlamaktadır (Digi 2025).



Şekil 3.5. XBee Pro S2C modeli (Digi, 2025)

3.1.6 Su parametrelerini ölçüm sistemi devre kartı

Devre kartı, ölçüm sisteminde kullanılacak donanımların belirlenmesinden sonra tek taraflı bakır levha üzerine çizilmiş ve hazırlanmıştır. Devre kartında 8 adet röle, bir adet motor sürücü, mikrodenetleyici, sensör bağlantıları için 8 kanallı çoklayıcı ve diğer devre elemanları bulunmaktadır. Buna ek olarak devre kartında motor ve sensörlerin aktif ve pasifliğini gösteren yeşil, mavi ve beyaz ışıklar yerleştirilmiştir. Devre kartında 12V ve 5V birbirinden bağımsız enerji hattı oluşturulmuştur. 5V enerji mikrodenetleyici, sensör gibi donanımları, 12V enerji ise sistemde kullanılan motorlar için ayrılmıştır. Hazırlanan devre kartı Şekil 3.6’da, oluşturulan bağlantı şeması ise Şekil 3.7’de gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Su parametresi ölçüm sistemi devre kartı

Şekil 3.7. Su parametre ölçüm sistemi devre kartı bağlantı şeması

3.2 Su Parametreleri Ölçüm Sistemi Tasarımı

Su parametrelerini ölçüm sisteminde elektronik kart tasarlandıktan sonra gerekli donanımların elektronik karta montajı yapılmıştır. Sistem 3 bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm suyun çekildiği Şekil 3.8’de belirtilen hortum başlığı, ikinci bölüm su parametrelerinin ve numune alımının gerçekleştirildiği Şekil 3.9’da belirtilen su ana hattı, üçüncü bölüm ise suyun çekilmesi ve tahliyesi için kullanılan Şekil 3.10’da belirtilen pompa bölümüdür. Her üç bölümün kontrolü, denetimi ve gelen verilerin işlenmesi mikrodenetleyici ile yapılmaktadır. Sistemde tüm bağlantılar devre kartı üzerinden gerçekleştirilmektedir.

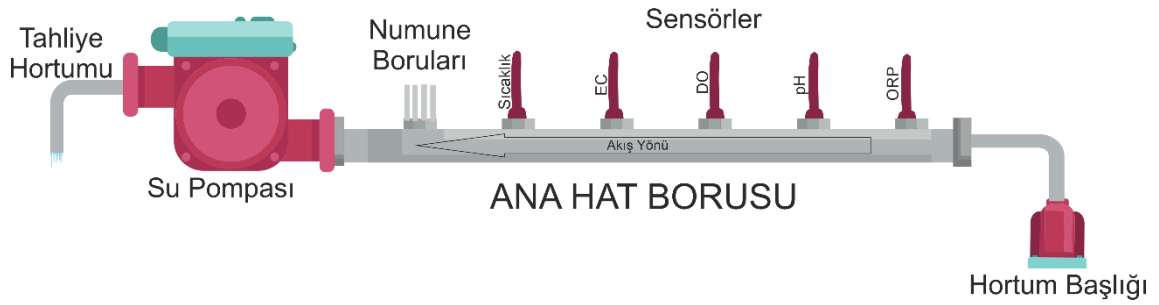
Birinci bölümde suyun ölçüm ve numune alım bölümüne aktarılabilmesi için 1 m uzunluğunda bir hortum kullanılmaktadır. Hortumun bir ucu ikinci bölüme bağlıyken diğer ucu sürekli su içerisinde bulunmaktadır. Hortum ucunun su içerisinde kalan bölümü için bir başlık tasarlanmıştır. Suyun ana hat borusuna aktarımı sırasında sensörler ve pompaya zarar vermemesi için suda bulunan katı ve büyük maddelerin geçişini önlemek için başlık içerisine süzgeç yerleştirilmiştir. Ayrıca hortum başlığının sürekli suyun içerisinde kalması için içerisine 100 g ağırlık eklenmiştir. Bu aşamada kullanılan hortum ve başlık polietilen malzemeden yapılmış olup çevreye herhangi bir zararı bulunmamaktadır. Benzer yapıdaki hortumlar akvaryumlarda da kullanılmaktadır.



Şekil 3.8. Su parametreleri sistemi hortum başlığı

İkinci bölümde sensörler ve numune alım sistemi yer almaktadır (Şekil 3.9). Birinci bölümden gelen hortum Polivinil Klorür (Polyvinyl Chloride-PVC) bir boruya bağlanmaktadır. PVC boruda sensörler için beş, numune alımı için bir adet yer hazırlanmıştır. Sensörler için ayrılan yere sırasıyla ORP, pH, DO, EC ve sıcaklık sensörleri yerleştirilmiştir. Son olarak numune alımı için oluşturulan boşluğa peristaltik pompalara bağlanmak üzere 4 adet küçük hortum takılarak ana hat tamamlanmıştır. Bu küçük hortumların her birinin bir ucu ana hattın içerisine, diğer ucu da peristaltik sıvı pompasına bağlanmıştır. Pompaların diğer ucu değiştirilebilir 200ml lik numune kaplarına yönlendirilmiştir. Bu bölüm ana hat borusundan geçen sudan numune alınmasını sağlamaktadır. 4 adet pompa ile 4 ayrı numune kabına su numunesi

doldurulabilmektedir. Su numune miktarı peristaltik pompanın çalışma süresi ile ayarlanabilmekte ve pompa saniyede 1-6 ml arasında su aktarabilmektedir.



Şekil 3.9. Su parametre ölçüm ve numune alımı boru hattı bağlantı şeması

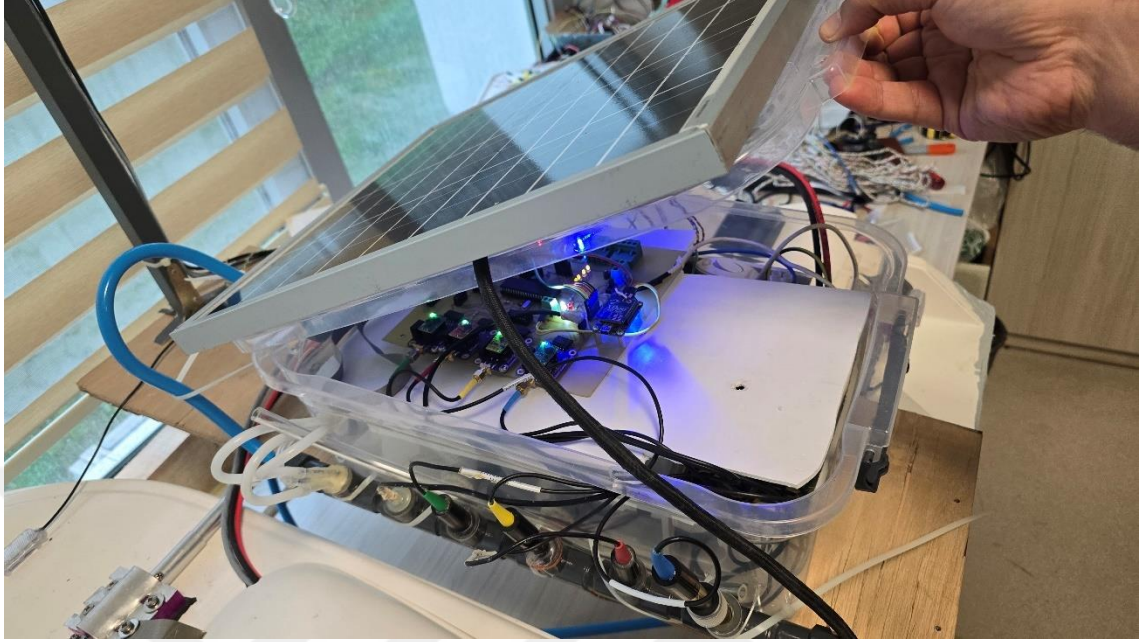
Üçüncü bölümü ise sistemin hidrofor pompası oluşturmaktadır. Ana hat çıkışından uzatılan boru hidrofora bağlanmıştır (Şekil 3.10). Pompanın çalışmaya başlamasından sonra suyun borunun ucundan tahliye noktasına aktarılması 15sn sürmektedir. Sistemde su pompası en sonda yer almaktadır. Bu sayede algılama ve numune alım işlemlerinde su parametreleri etkilenmeden çekilir. Bu durum suyun çekildiği derinlikteki su kalitesi ile algılandığı noktadaki su kalitesindeki değişimi en aza indirmektedir. Pompanın tahliye ucuna takılan başka bir hortumla da su ana hat borusundan tahliye edilmektedir.



Şekil 3.10. Ana hat borusu pompa bağlantısı ve tahliye sistemi

Su parametreleri ölçüm ve numune alım sistemi, İYA suda hareket ederken veya dururken bulunduğu noktadan suyu çeken, çektiği suyun sıcaklık, EC, DO, pH ve ORP değerini okuyabilen, gerektiğinde numune alabilen ve tahliye eden bir sistem olarak tasarlanmıştır. Sistem, kapalı bir kutu içine kurulmuş olup sensörler ve boru hattı kutunun dışına yerleştirilmiştir. Kutu içerisine üç katman oluşturulmuştur. En üst, üçüncü katmanda kutunun kapağı ve üzerine entegre edilen güneş paneli bulunmaktadır. İkinci katman devre kartının bulunduğu katmandır. Bu katmanda diğer donanımların bağlantı kabloları için katmanlar arası geçiş sağlanmış, özellikle kutu dışına çıkarılması gereken kabloların olduğu bölümde izolasyon sağlanmıştır. En alt, birinci katman kendi içerisinde numune alım sistemi ile motor, batarya ve regülatörün olduğu bölümler olarak ikiye ayrılmıştır. Numune alım sistemi için oluşturulan bölümde numune kapları bir olası su taşmalarından diğer donanımların etkilenmemesi için su geçirmez hazne içerisine yerleştirilmiş ve içerisine su seviye sensörü yerleştirilmiştir. Su numune sisteminde peristaltik pompalar ana hat su borusuna bağlantılıdır. Kutunun dış tarafına yerleştirilen boru hattı üzerine sensörler takılıp çıkarılabilecek şekilde lastik contalar ile

yerleştirilmiştir. Bu hem sensörlerin kullanım kolaylığını hem de elektronik devrelerden kaynaklı olası parametre değişikliklerinden etkilenmemesini sağlamaktadır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Su parametreleri ölçüm ve numune alım sistemi

3.3 Su Parametreleri Ölçüm Sistemi Yazılımı

Su parametreleri ölçüm sistemi Atmega 324 mikrodenetleyicisi ile kontrol edilmektedir. Atmel Studio geliştirme ortamında “C” yazılım dili kullanılarak yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılım ile sensör değerlerin okunması, pompa ve valflerin aktif veya pasif edilmesi gibi işlemler gönderilen komutlar doğrultusunda gerçekleştirilmektedir. Sistem manuel ve otonom olmak üzere iki farklı yapıda kurgulanmıştır. Manuel yapıda sistem üzerindeki donanımlar tek tek kontrol edilebilmekte, otonom yapıda ise sisteme iletilen görevlere göre donanımlar görev sırasına göre aktif/pasif edilmektedir. Geliştirilen yazılım, İYA’dan gönderilen komutları ZigBee üzerinden komutları alır ve işlem yapar. Komutlar seri haberleşme aracılığıyla mikrodenetleyiciye gönderilir ve mikrodenetleyici, gelen komutları analiz ederek ilgili sensör okuma, pompa kontrolü ve valflerin yönetimi işlemlerini gerçekleştirir. Mikrodenetleyici, ölçüm sonuçlarını da yine ZigBee üzerinden geri bildirir.

Sistemde su parametrelerini ölçmek için kullanılan sensörlerin arayüzleri farklıdır. Sıcaklık sensörlerden gelen veriler, mikrodenetleyici üzerindeki ADC kullanılarak işlenir. Diğer sensörlerden dijital olarak gelen veriler önce Çoklayıcı (Multiplexer-MUX), daha sonra da mikrodenetleyici seri portuna bağlanmıştır. MUX kullanımı ile gelen veriler seçimli olarak alınabilmektedir. Sensörlerden gelen veriler anlamı bir şekilde kendi birimlerine dönüştürülür. Bu aşamada sistemde okunan veri değerlerinde bazen farklılık, hata gözlemlenmiştir. Bunun için ölçümler aşamasında sadece anlamlı veriler değerlendirmeye alınmış bu veriler üzerinde de daha doğru sonuçlar elde etmek için ortalama algoritması kullanılmıştır.

Sensörlerden okunan değerler anlamlı hale getirildikten sonra değerler üzerinde üretici önerileri ve standart çözeltiler dikkate alınarak kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. pH sensörü, üç noktalı kalibrasyon yöntemiyle 4,00, 7,00 ve 10,00 pH tampon çözeltileri kullanılarak kalibre edilmiştir (Şekil 3.12a) (Gündüz Kimya 2025). İletkenlik sensörünün kalibrasyonu ise sırasıyla 12.880 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ve 80.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ değerlerine sahip standart çözeltilerle yapılmıştır (Şekil 3.12b) (Atlas Scientific 2025). DO sensörü, sıfır noktası kalibrasyonu için oksijensiz ortamda kalibre edilmiştir (Şekil 3.12c) (Atlas Scientific 2025). ORP sensörünün kalibrasyonu, 225 mV referans çözeltisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.12d) (Atlas Scientific 2025). Sıcaklık sensörü ise 22 °C’de dijital multimetre referansı ile karşılaştırmalı olarak test edilmiş ve kalibrasyonu doğrulanmıştır (Şekil 3.12e). Kalibrasyon işlemleri sırasında, sensörlerin sıfırlanması ve ölçüm doğruluğunun sağlanması amacıyla uygun temizlik ve sıfırlama solüsyonları kullanılmıştır (Şekil 3.12f). Tüm sensörlerin kalibrasyonları saha çalışmalarına başlamadan önce tamamlanmıştır.



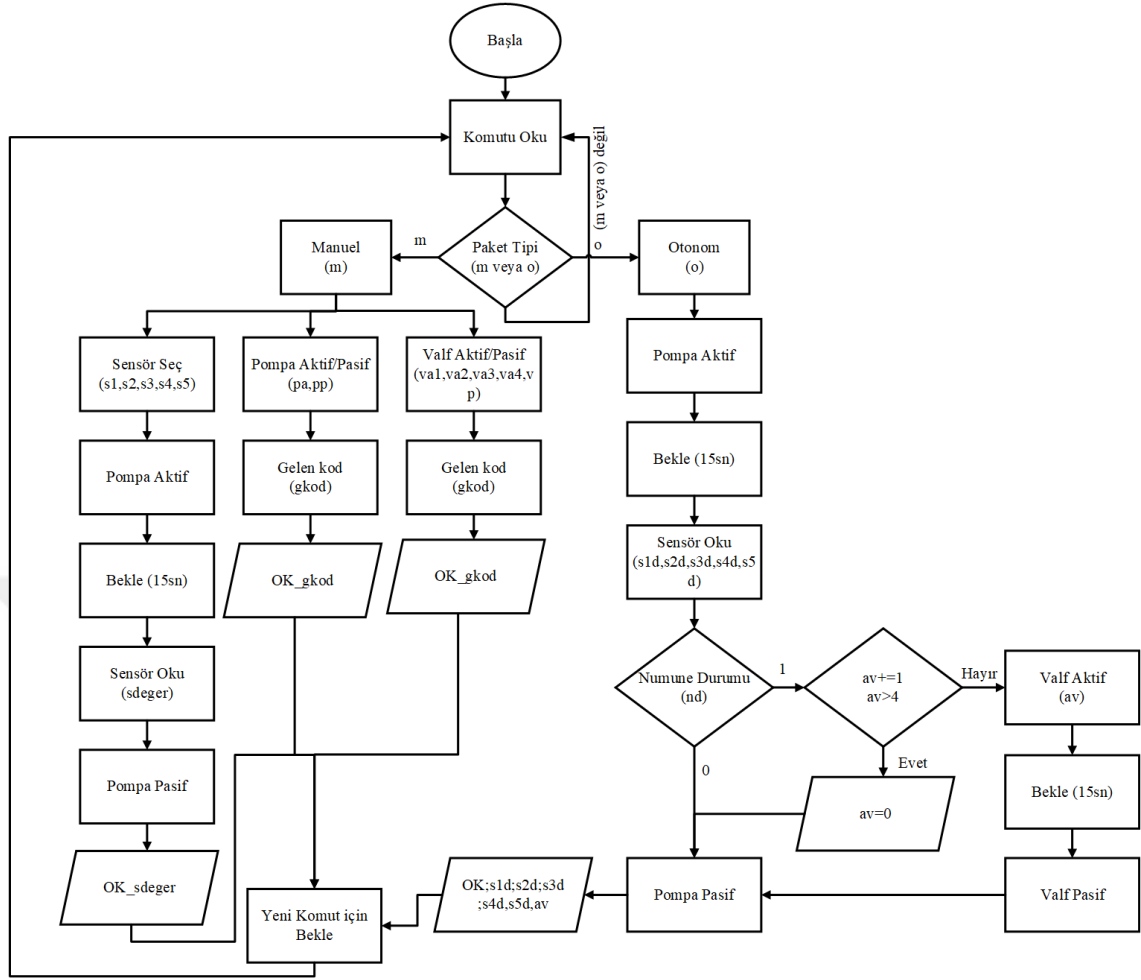
Şekil 3.12. Kalibrasyon işlemleri a) EC sensörü kalibrasyonu; b) pH sensörü kalibrasyonu; c) OPR sensörü kalibrasyonu; d) DO sensörü kalibrasyonu; e) Sıcaklık sensörü kalibrasyonu; f) Sensör temizleme

Yazılımda otonom ya da manuel çalışma şekli dışarıdan gönderilen parametreler ile değil İYA içerisinde geliştirilen yazılım çıktısı olarak gönderilen veri paketiyle belirlenmektedir. Bu aşamada manuel çalışma ve otonom çalışma şekli tamamen yazılım algoritması olarak çalışmaktadır. Manuel veri paketi ve otonom veri paketi gönderim ve alam aşamasında özel karakterlerle ayrıştırılmıştır (Çizelge 3.3).

Çizelge 3.3. Veri paketleri formatı

	Manuel Veri Paketi Formatı	Otonom Veri Paketi Formatı
Başlangıç	\$	\$
Komut Tipi	m	o
Ayırıcı	;	;
Komut	Kod	Numune (1 veya 0)

Manuel veri paketinde komut olarak adlandırılan alanda “Kod” sistemde işlenecek donanımların komutlarını ifade eder. Sensör verileri okunmak isteniyorsa DO için *s1*, pH için *s2*, EC için *s3*, ORP için *s4*, sıcaklık için ise *s5* komutu gönderilmelidir. Bunlara ek olarak pompayı aktif etmek için *pa*, pasif etmek için *pp*, her bir valfi aktif etmek için *va1*, *va2*, *va3*, *va4* pasif etmek için ise *vap* gönderilmelidir. Otonom veri paketinde numune alımı için 1, alınmama durumu için ise 0 belirlenmiştir. Sistemin çalışma şeklini belirten algoritma Şekil 3.13’te gösterilmektedir.



Şekil 3.13. Su parametre ölçüm sistemi yazılım algoritması

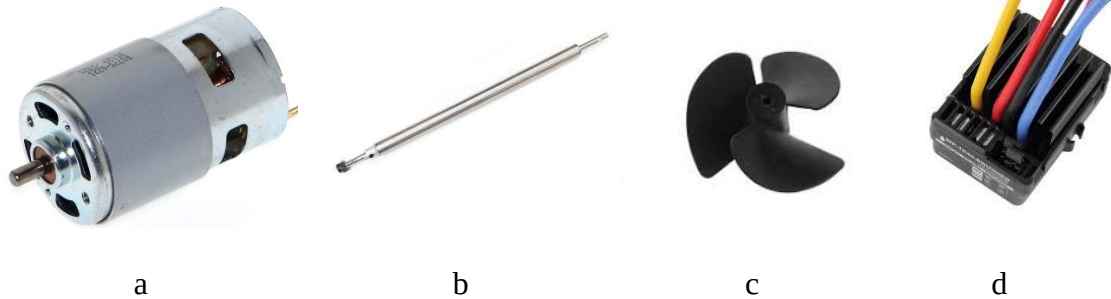
3.4 İnsansız Yüzey Aracı Donanım

İYA su parametre ölçüm sistemini bir koordinata uzaktan kumanda ile veya otonom olarak götürmek için geliştirilmiştir. Su parametre ölçüm sistemini taşıyabilmesi için katamaran formda tasarlanmıştır. Bu bölümde İYA’da kullanılan donanımlar hareket sistemi, konumlandırma sistemi, haberleşme sistemi ve kontrol ünitesi başlıkları altında detaylandırılmaktadır.

3.4.1 Hareket sistemi

Hareket sistemi İYA’yı su yüzeyinde bir noktadan başka bir noktaya götürmek için kullanılan donanımları içermektedir. Katamaran formda geliştirilen İYA iki ayrı kabuktan oluşmaktadır. Her bir kabuk için birer adet motor (Şekil 3.14a), şaft (Şekil 3.14b) ve pervane (Şekil 3.14c) kullanılmıştır. Kullanılan fırçalı motorlar İYA’nın hareketi için gerekli hızı ve gücü sağlayabilecek özellikte olup yüksek torklu, 15000 RPM dönüş hızlarına ulaşabilen yapıdadır. Fırçalı motorların her birinin kontrolü için ayrı ayrı su geçirmez sürücüler (Şekil 3.14d) kullanılmıştır. Sürücüler sayesinde fırçalı motorlar sağ ve sol dönüş yapabilmektedir. Motorların dönüş hareketleri şaft ile pervanelere aktarılmaktadır. Pervaneler 80 mm çapında 3 kanatlı tork pervanesi olarak belirlenmiştir.

İYA'nın her iki tarafında yer alan pervaneler sağ ve sol dönüş yönlü kullanılmıştır. İki motor aynı anda sağa döndüğünde İYA ileri, sola döndüğünde geri gidebilmektedir. Motorların dönüş hızları ve yönü aynı zamanda dümen vazifesi gördüğünden gidilecek yöne motor hızları değişimi ile yönlenebilmektedir.



Şekil 3.14. a) Fırçalı motor; b) 30 cm'lik şaft; c) Güç pervanesi; d) Motor Sürücüsü

Motorların enerjisi Lithium Ion bataryalar ile sağlanmaktadır. Bunun için iki adet için 11.1V 12A batarya kullanılmıştır. Ağırlık dengesi sağlanması için her kabuğa birer adet batarya yerleştirilmiştir. Motorların çalışma hız ve zamanları farklı olabileceğinden güç dengesi için de bu iki batarya arasında paralel bağlantı yapılmıştır. Bu sayede motorların enerji tüketimi farklılıklarından kaynaklı batarya kapasitelerinde oluşabilecek dengesizlik ortadan kaldırılmıştır. İYA hareketi esnasında batarya kapasitesinin izlenmesi büyük önem taşır. Bu amaçla bataryaların gerilim değerleri ADS1115 aracılığıyla ölçülmektedir. Bataryaların voltajı olan 11.1V, ADS1115'in maksimum giriş voltajı olan 5V'un çok üzerindedir. Bu nedenle batarya ile ADS1115 arasına bir gerilim bölücü devre eklenmiştir. Bu devre sayesinde yüksek voltaj, ölçülebilir bir seviyeye düşürülerek hem ADS1115 hem de Raspberry Pi'nin zarar görmesi engellenmiştir.

3.4.2 Konumlandırma sistemi

İYA'nın su yüzeyindeki konumunun, yöneliminin ve çevresel engellerin tespit edilmesi, güvenlik ve izleme açısından kritik öneme sahiptir. İYA'nın konumlandırma sisteminde üç temel bileşen dikkate alınmaktadır: Birinci bileşen aracın küresel konumlandırma sistemi, ikinci bileşen dijital pusula aracılığıyla hesaplanan yönelim bilgisi, üçüncü bileşen ise LiDAR ile tespit edilen çevresel engellerdir. Bu üç bileşen birlikte değerlendirildiğinde, İYA'nın çevresiyle etkileşimi daha güvenilir ve hassas bir şekilde yapılabilir.

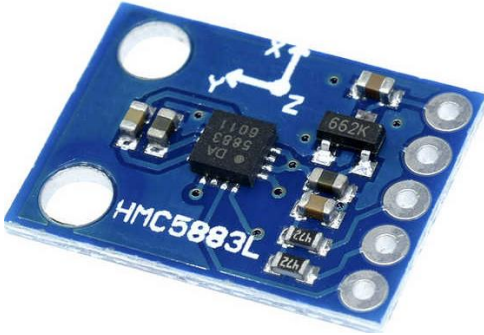
Konumlandırma amacıyla en yaygın kullanılan donanımlar GPS modülleridir. Bu modüller, en az dört farklı uydudan gelen sinyalleri işleyerek enlem, boylam ve yükseklik bilgilerini belirleyebilir. Ancak elde edilen konum verisinin doğruluğu, hem kullanılan GPS modülünün teknik özelliklerine (örneğin veri yenileme hızı, sinyal alım hassasiyeti) hem de modülün bulunduğu çevresel koşullara bağlıdır. İYA'nın dünya üzerindeki konumu NEO-M8 (Şekil 3.15) GPS modülü ile belirlenmektedir. NEO-M8 (Ublox 2025) modeli 3-5 V aralığında çalışabilmekte ve saniyede bir konum, saat, yükseklik, bağlı uydu sayısı gibi bilgileri gönderebilme özelliğine sahiptir. Bu model dünya üzerinde herhangi bir görüş aralığında 4 veya daha fazla uydu ile bağlantı kurarak yer ve zaman bilgisini

sağlamaktadır. Düşük maliyetteki bu modülün hava koşullarına göre değişmekle birlikte konum hassasiyeti bir metredir.



Şekil 3.15. NEO-M8 GPS Modülü (Ublox 2025)

İYA'nın açısal pozisyonu bir noktadan başka bir noktaya giderken belirleyici faktördür. İYA'nın yönelimini ölçmek için dijital pusula kullanılmaktadır. Çalışmada 3 eksenli pusula modülü HMC5883L (Şekil 3.16) modeli kullanılmıştır. Bu model İYA'nın 3 ekseninde hızlanma ve yön bilgisini ölçebilmektedir. 3-5 V aralığında çalışabilen bu modelden anlık olarak veri alınabilmektedir. Düşük maliyetli pusula, dijital bir arayüze sahiptir. HMC5883L, 1 ila 2 pusula yönü doğruluğu sağlayan 12 bitlik I2C seri veri yolu ile bağlantı sağlamaktadır.



Şekil 3.16. Dijital Pusula (Honeywell 2025)

İYA su üzerinde hareket halindeyken, çevresinde bulunan engellerin tespit edilmesi, olası çarpışmaları önlemek ve güvenliği sağlamak açısından kritik bir gerekliliktir. Bu çalışmada, engellerin algılanması amacıyla LiDAR teknolojisi kullanılmıştır. Kullanılan DTOF LD19 (Şekil 3.17) modeli LiDAR, 5-13 Hz tarama hızına sahip olup, maksimum 12 m mesafedeki nesneleri algılayabilmektedir. LiDAR, saniyede 8.000 örnekleme kapasitesine sahiptir ve 360 derece kapsama alanında 2 boyutlu çok yönlü lazer mesafe ölçümü gerçekleştirebilmektedir (LDRobot 2025). Bu özellikler sayesinde, İYA'nın hareket yönündeki engeller yüksek doğrulukla tespit edilerek güvenli navigasyon sağlanabilmektedir.



Şekil 3.17. LiDAR (LDRobot 2025)

3.4.3 Haberleşme sistemi

Haberleşme sistemleri için kullanılacak iletişim modülünün seçimi, İYA'nın görev sahası, enerji profili ve veri trafiği ihtiyacına göre optimize edilmelidir. Bazı sistemlerde birden fazla modül birlikte kullanılarak hem kısa mesafe kontrol hem de uzun mesafe veri iletimi sağlanabilir. Bu çoklu yapı sayesinde hem gerçek zamanlı kontrol hem de görev sonu veri senkronizasyonu mümkün olur. Bu aşamada mesafe, bant genişliği gibi birçok faktör kullanılacak olan iletişim yönteminin belirlenmesinde büyük önem taşımaktadır.

Geliştirilen sistemde İYA haberleşme sisteminin tam orta noktasında yer almaktadır. Bütün iletişim İYA üzerinden sağlanmaktadır. İYA, kontrol paneli, su parametreleri ölçüm sistemi ve uzaktan kumanda ile kablosuz olarak haberleşebilmektedir. Aynı zamanda kontrol paneli ile su parametre ölçüm sistemi arasındaki iletişim de İYA üzerinden gerçekleşmektedir. Bu nedenle haberleşme sisteminde iki farklı iletişim modülü kullanılmıştır. Uzaktan kumanda ve su parametre izleme sistemi ile haberleşme ZigBee protokolü ile sağlanmaktadır. Geliştirilen sistemde XBee PRO S2C (Şekil 3.5) kullanılmıştır. Bu modül 2.7-3.6 V aralığında çalışabilmekte, açık alanda 3 km uzaklıktan iletişim sağlayabilmektedir. Bu nedenle özellikle İYA'yı karaya yaklaştırma aşamasında veya karadan açığa gönderme aşamasında kumandadan gönderilen bilgileri alabilecek yeterli bir mesafe sunmaktadır. Burada hem kumanda hem de su parametresi ölçüm sistemi ile haberleşen modül için bağlantı topolojisi kurulmuştur. Farklı topolojilere destek sağlayan modülde star topoloji tercih edilmiştir. Kumandada ve su parametreleri izleme sisteminde bulunan modüller yönlendirici, İYA'da bulunan modül koordinatör olarak ayarlanmıştır. XBee donanımlarının programlanması XCTU programı üzerinden ayarlanmıştır. Kurulan protokol sayesinde veriler sadece koordinatör üzerinde toplanacağından veri çakışmasının da önüne geçilmiştir. Sonuç olarak İYA'da bulunan XBee hem kumanda hem de su parametresi ölçüm sistemi ile aynı anda haberleşebilmekte gelen ve gönderilen veriler birbirinden ayrıştırılabilmektedir.

İYA ile kontrol paneli arasındaki haberleşme daha uzak mesafelerde çalışabilmesi için GSM modülü ile sağlanmaktadır. GSM modülü olarak SIM7600G-H (Şekil 3.18) modeli kullanılmıştır. SIM7600G-H, 4G LTE CAT-4 standardını destekleyen güçlü bir haberleşme modülüdür. Modül, 150 Mbps'ye kadar indirme ve 50 Mbps'ye kadar yükleme hızlarına ulaşabilmekte, bu sayede yüksek bant genişliği gerektiren IoT, uzaktan izleme, canlı veri aktarımı gibi uygulamalarda kararlı ve hızlı bağlantı sağlamaktadır.

Geriye dönük uyumlulukla 3G (UMTS/HSPA+) ve 2G (GSM/GPRS/EDGE) ağlarını da desteklemektedir.

Modül üzerinde üç adet u.FL anten konnektörü yer almaktadır: iki tanesi 4G LTE iletişimi için, bir tanesi ise GNSS (GPS/GLONASS/BDS/Galileo/QZSS) sistemleri için kullanılmaktadır. Bu sayede hem mobil veri hem de konum bilgisi yüksek doğrulukla elde edilebilmektedir. Modül, ayrıca bir adet nano SIM kart yuvasına ve 4 adet USB 2.0 bağlantı noktasına sahiptir. USB bağlantısı üzerinden hem veri iletişimi sağlanmakta hem de modül yapılandırılabilir. 3.8V ile çalışan modül, -40°C ile +85°C arasında geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilmektedir. Enerji verimliliği açısından da düşük güç modları sayesinde uzun süreli kullanım imkânı tanımaktadır. Kullanılan Raspberry Pi mini bilgisayara kolay entegrasyonu sayesinde bağlantı sorunlarını ortadan kaldırmıştır. Ayrıca bu modül üzerinde entegre olarak bulunan GPS modülünden de veri alınmaktadır. Bu şekil de İYA'da konumlandırma için iki adet GPS verisi kullanılmıştır. Her iki GPS'den gelen konum verileri her defasında bir önceki gelen veri ile kontrol edilip sapma ve yanlış veriler hariç tutularak tek bir veri haline dönüştürülüp kullanılmaktadır.



Şekil 3.18. SIM7600G-H Modülü (SIMCom 2025)

3.4.4 İYA kontrol ünitesi

İYA kontrol ünitesi, hareket ve yön kontrolü, üzerinde bulunan GPS, pusula, LiDAR gibi konumlandırma sistemlerinden veri alma, su parametre ölçüm sistemi, kumanda ve kontrol ünitesi ile haberleşme gibi tüm sistemin işleyişinin sağlandığı bölümdür. Bütün bu işlemlerin yapılabilmesi ve sürekliliği için kontrol ünitesinde düşük maliyetli ve çok yönlü bir mini bilgisayar olan Raspberry Pi 4 (Şekil 3.19) kullanılmıştır. Kullanılan bilgisayara ait özellikler aşağıda listelenmektedir (Raspberry Pi 2025).

- Dört çekirdekli Cortex-A72 (ARM v8) işlemci, 64-bit, 1.5 GHz hızında
- 2 GB LPDDR4 RAM
- VideoCore VI GPU, 4K video oynatma desteği
- 2.4 GHz ve 5 GHz 802.11ac dual-band Wi-Fi, 5.0 Bluetooth, Gigabit Ethernet
- 2 adet USB 3.0 ve 2 adet USB 2.0 port
- Hafıza MicroSD kart yuvası (Genişletilebilir)

- 40-pin GPIO arayüzü, elektronik projeler ve eklentiler için kullanılır.
- Boyutları: 85.6 mm x 56.5 mm x 17 mm.

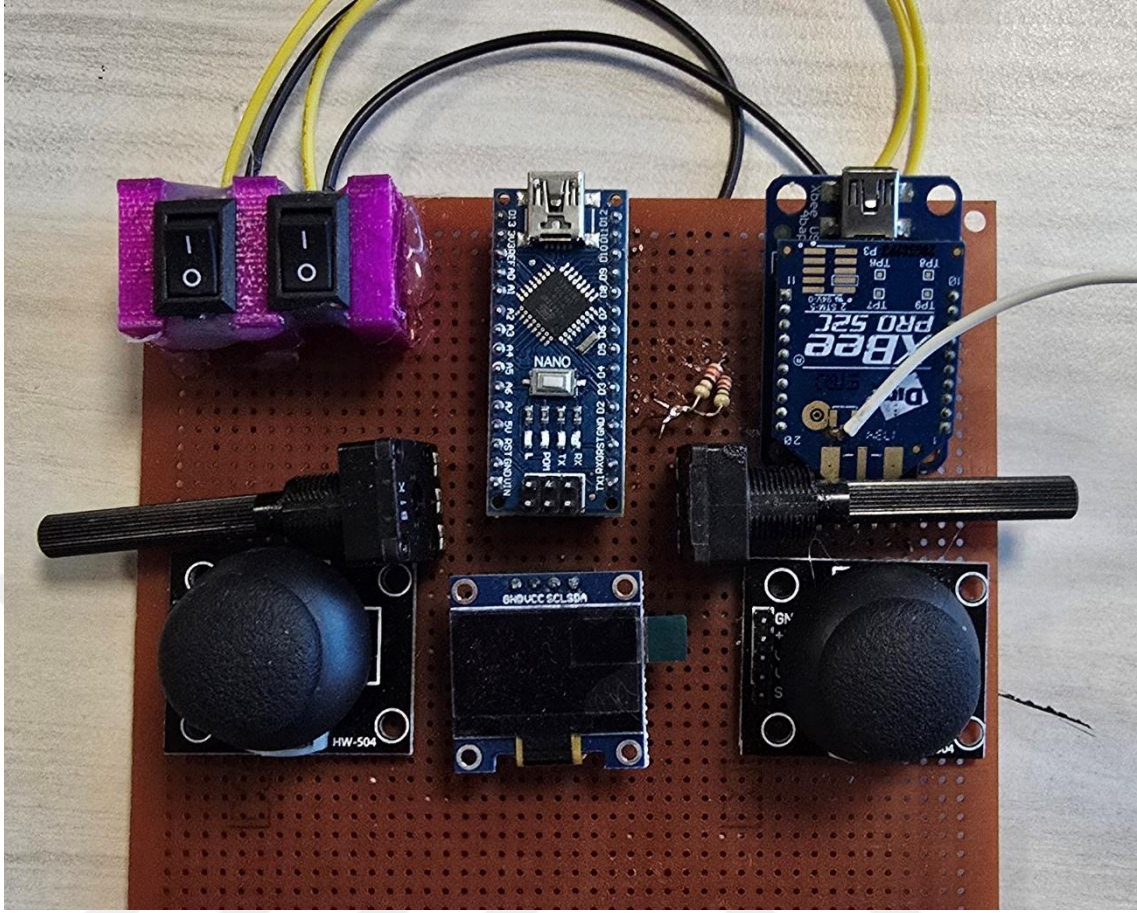


Şekil 3.19. Raspberry Pi 4 mini bilgisayar (Raspberry Pi 2025)

İYA kontrol ünitesi, su parametresi ölçme sistemi, uzaktan kumanda ve kontrol merkezi ile sürekli iletişim halindedir. Bunlarla birlikte hareket sistemi, konumlandırma sistemi, haberleşme sistemi ve ayrıca İYA kabuklarına yerleştirilen sensörler Raspberry Pi tarafından yönetilmekte ve izlenmektedir.

3.5 Uzaktan Kumanda

İYA'nın özellikle kıyıya yakın bölgelerde manuel olarak kontrol edilebilmesi amacıyla, uzaktan kumanda sistemi geliştirilmiştir. Söz konusu kumanda, yalnızca İYA'nın motorlarını kontrol etmekte olup; motorların dönüş yönü ve hızına bağlı olarak aracın ileri, geri, sağa ve sola hareket etmesi joystickler veya potansiyometreler aracılığıyla sağlanmaktadır. Daha hassas kontroller sağlanabilmesi için kumanda üzerine potansiyometre entegre edilmiş ve özellikle sabit hızlarda gidilmesi gereken işlemlerinde kullanılmıştır. Ayrıca, kumanda üzerinde yer alan bütünleşmiş ekran sayesinde batarya durumu, motor hızları gibi temel sistem bilgileri kullanıcıya anlık olarak sunulmaktadır. Kumanda sisteminin geliştirilmesinde mikrodenetleyici olarak Arduino Nano kullanılmıştır. İYA ile olan kablosuz haberleşme XBee modülleri aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Geliştirilen uzaktan kumandanın son hali Şekil 3.20'de yer almaktadır.

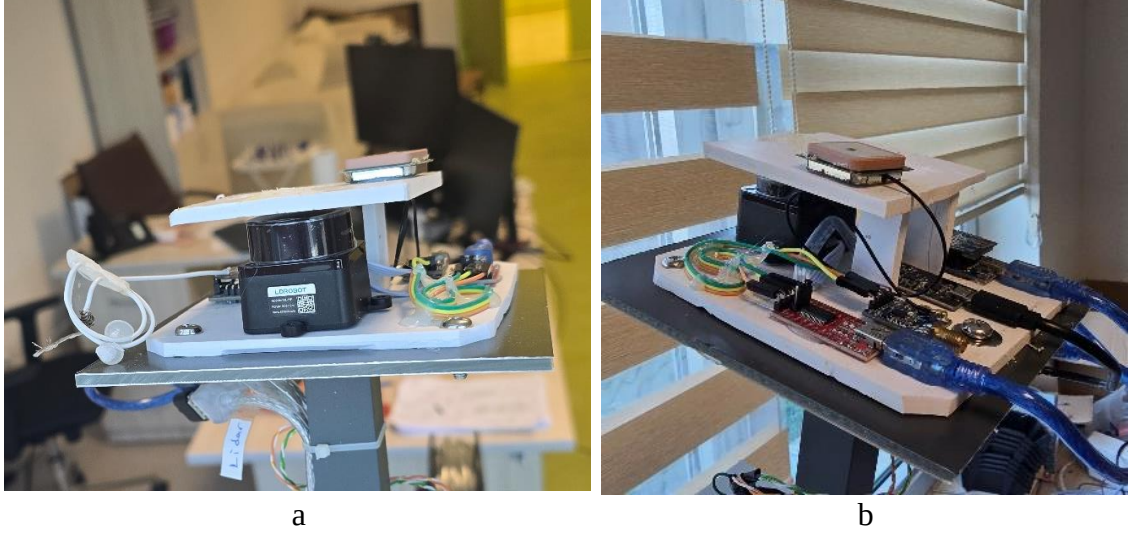


Şekil 3.20. İYA kontrolü için geliştirilen uzaktan kumanda

3.6 İYA Tasarımı

Su parametreleri izleme sistemleri için geliştirilen yüzey araçlarında farklı türlerde tasarımlar bulunsa da yaygın olarak katamaran formu tercih edilmektedir. İYA tasarımı, gövde yapısının belirlenmesi ve bileşenlerin optimal şekilde yerleştirilmesi ile şekillendirilmiştir. İYA'nın gövdesi, her biri 100 cm uzunluğunda ve 36 cm genişliğinde olan iki adet V-tabanlı cam elyaf takviyeli plastikten üretilmiş fiberglas kabuktan oluşmaktadır. Bu iki gövde, aralarında 50 cm mesafe bırakılarak bağlantı elemanları ile paralel şekilde konumlandırılmış, baş ve kış noktalarından alüminyum profiller aracılığıyla birbirine bağlanmıştır.

Alüminyum profiller üzerine, su parametrelerinin ölçülmesi için gerekli ekipmanı taşıyacak şekilde, 80 cm uzunluğunda ve 35 cm genişliğinde, suya dayanıklı ahşap malzemeden bir platform yerleştirilmiştir. Platformun ön kısmına, haberleşme ve konumlandırma sistemlerine ait antenlerin montajı için 80 cm yüksekliğinde bir alüminyum direk ve üzerine platform eklenmiştir (Şekil 3.21). Ayrıca, İYA'nın su üzerindeki görünürlüğünü artırmak, güvenliğini sağlamak ve yön tayini yapmak amacıyla kış tarafına kırmızı, baş tarafına ise mavi ışıklandırma entegre edilmiştir. İYA'nın dış tasarımı Şekil 3.22'te gösterilmektedir.

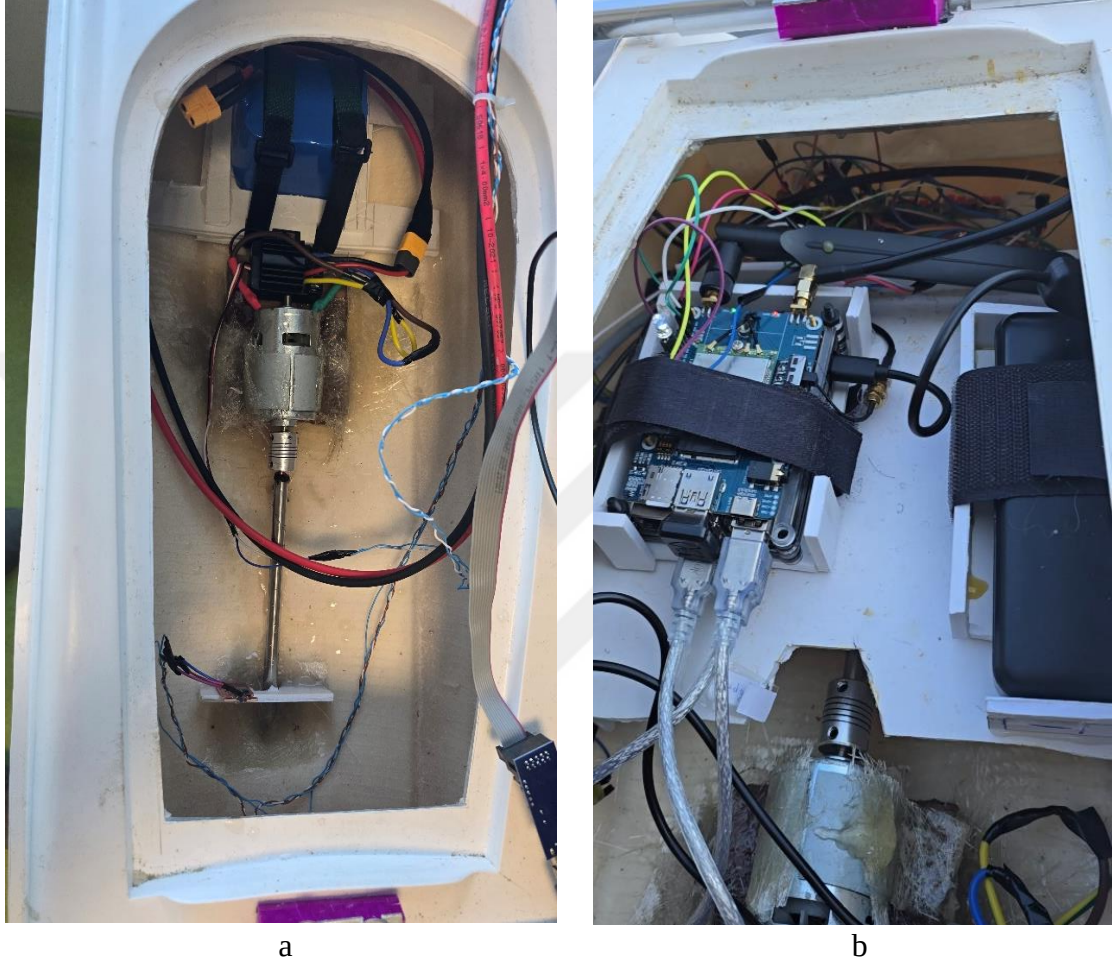


Şekil 3.21. İYA haberleşme ve konumlandırma platformu **a)** Önden görünüşü; **b)** Soldan görünüşü



Şekil 3.22. İYA dış tasarımı

Her bir kabukta yer alan batarya, sürücü, motor, şaft ve pervane bağlantıları yapılmış ve pervaneler suya eşit açı ve derinlikte temas edecek şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.23a). Sağ tarafta bulunan kabuk içerisine motor manyetik alanından korunması için bir katman eklenmiştir. Bu katman üzerinde İYA'nın kontrolünde görevli Raspberry Pi yerleştirilmiştir (Şekil 3.23b).



Şekil 3.23. İYA iç tasarımı **a)** Sol kabuk; **b)** Sağ kabuk

3.7 İYA Yazılımı

İnsansız yüzey aracının ve bağlı donanımların kontrolü ve yönetilmesi için Raspberry Pi mini bilgisayar kullanılmaktadır. Raspberry Pi bilgisayarında işletim sistemi olarak Linux işletim sistemi kurulmuştur. Linux, açık kaynak kodlu ve Unix benzeri bir işletim sistemidir. Günümüzde birçok farklı dağıtımı ile masaüstü, sunucu ve gömülü sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Modüler mimarisi ve güçlü komut satırı desteği sayesinde özelleştirilebilir ve performans açısından verimli bir sistem sunar. Ayrıca, Raspberry Pi gibi düşük donanımlı cihazlardan, süper bilgisayarlara kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Bu tez çalışmasında İYA üzerinde bulunan sensörlerden, uzaktan kumanda ve kontrol panelinden gelen verilerin toplanması ve işlenmesi, gerekli verilerin tekrar uygun yerlere gönderilmesi gibi işlemler Python yazılım dili ile geliştirilen program ile yapılmaktadır. Python, Linux üzerinde yaygın olarak kullanılan programlama dillerinden biridir ve Linux dağıtımında entegredir. Linux'un açık kaynak yapısı, Python ile özelleştirilmiş sistemler geliştirmeye ve farklı donanımlar üzerinde çalıştırmaya olanak tanır. Python'un geniş kütüphane desteği ve çok yönlü yapısıyla web geliştirme, veri analizi, yapay zekâ, otomasyon, gömülü sistemler ve bilimsel hesaplamalar gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Dinamik yapısı, nesne yönelimli programlama desteği ve platformdan bağımsız çalışabilmesi Python'u güçlü bir yazılım dili haline getirmektedir (Python 2025). Düşük donanım gereksinimleriyle çalışabilen Raspberry Pi gibi cihazlarda Python yaygın olarak kullanılmaktadır. Geniş kütüphane desteği sayesinde GPIO pinleri, kamera modülü, sensörler ve diğer donanımları kolayca kontrol etmeye olanak tanır (Dow 2024).

Raspberry Pi'de 4 adet USB portu bulunmaktadır. Portlara sırasıyla SIM7600, LiDAR, ZigBee ve GPS bağlanmıştır. USB portlarında olası karmaşıklığı önlemek için Linux işletim sistemi üzerinden udev kuralları tanımlanmıştır. Raspberry'nin her açılışında portlara bağlı olan donanımların adreslemesi yapılmış ve her port yazılım tarafında kolaylıkla erişilebilecek sabit adreslere atanmıştır.

USB portlara bağlı donanımlardan LiDAR'dan gelen veri paketi belirli bir formatta gelmektedir (Şekil 3.24). Gelen verilerden İYA'nın çalışması aşamasında kullanılacak gerekli olan veriler yazılımla ayrıştırılmakta ve anlamlı veriler haline getirilmektedir. Her ölçüm noktası mesafe ve yoğunluk bileşenlerinden oluşur. Mesafe, milimetre cinsinde yoğunluk ise ışığın yansıtma yoğunluğunu verir. Yüksek yoğunluk değeri, daha güçlü bir sinyal anlamına gelirken, düşük yoğunluk değeri, daha zayıf bir yansıtma gösterir.

Başlık	Veri Uzunluğu	Hız		Başlangıç Açısı		Veri	Bitiş Açısı		Zaman		Hata Kontrolü
54H	2CH	LSB	MSB	LSB	MSB	...	LSB	MSB	LSB	MSB	1 Bayt

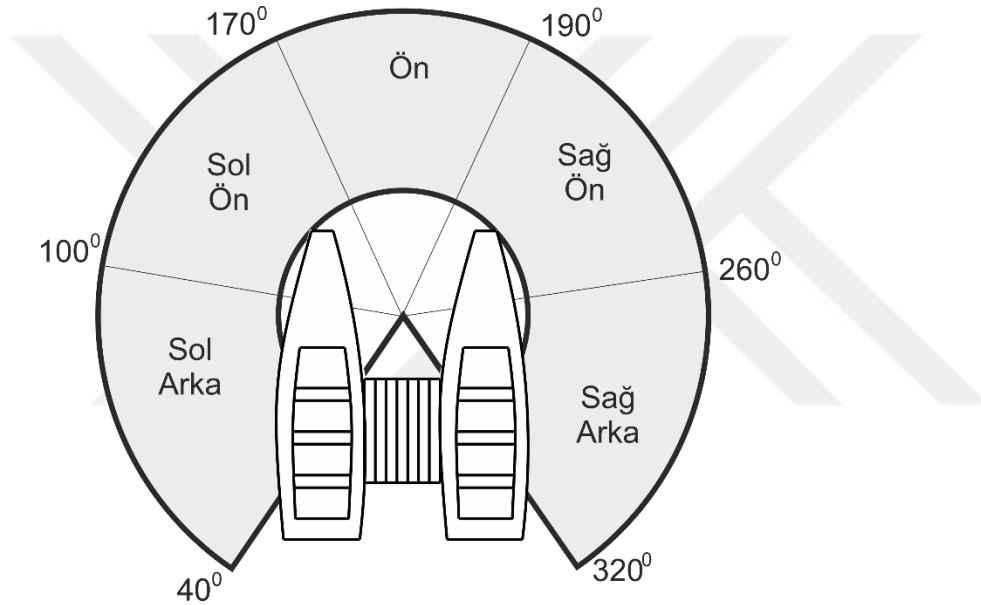


Ölçüm Noktası 1			Ölçüm Noktası 2			...	Ölçüm Noktası n		
Mesafe	Yoğunluk		Mesafe	Yoğunluk		...	Mesafe	Yoğunluk	
LSB	MSB	1 Bayt	LSB	MSB	1 Bayt	...	LSB	MSB	1 Bayt

Şekil 3.24. LiDAR veri paketi formatı

LiDAR veri paketi 54H ile başlamakta olup, LSB en düşük baytı, MSB en yüksek baytı ifade etmekte ve hız, açı, zaman ve mesafe değerleri iki bayt ile gösterilmektedir. Bayt olarak alınan veriler doğrudan dönüştürülürken, 2 baytlık veri paketlerinde bayt birleştirme, bit kaydırma ve dönüştürme gibi işlemler yapılmaktadır. Bu sayede gelen veriler İYA için anlamlı hale getirilmiştir. Her noktanın açısı, başlangıç açısı ile bitiş açısı arasında doğrusal enterpolasyon yöntemiyle hesaplanır. Bu, başlangıç ve bitiş açıları arasında ölçüm noktalarının düzgün şekilde dağıtılmasını sağlar. Bu sayede 360°'lik bir

bakışta hangi derecede ne kadar mesafede bir engel olup olmadığı tespit edilebilmektedir. Saniyede 10 tur dönüş ve her turda yaklaşık 450-600 arası veri noktası tespit edebilen LiDAR ile her bir saniye için ortalama 5000 veri alınabilmektedir. Gelen veriler içerisinde anlamlı olmayan veriler filtrelanmaktadır. Ayrıca LiDAR'dan elde edilen 300mm den küçük ve 5000mm den büyük değerler değerlendirme dışı bırakılmıştır. Bu işlemler sonrası açısal olarak 40°-320° açılar arasındaki veriler anlamlı olarak değerlendirilmiştir. Bunun sebebi de LiDAR'ın 180°'lik açısı İYA'nın ön tarafını göstermekte, 320°-360° ve 0°-40° arası bölüm ise İYA'nın arka tarafını göstermektedir. Açısal filtre, mesafe filtresi ve anlamsız veri filtresi sonucunda toplanan verilerden sistemin çalışması için gerekli ve yeterli veriler elde edilmiştir. LiDAR verileri değerlendirilmesi için 5 bölüme ayrılmıştır. Bu bölümler sol arka, sol ön, ön, sağ ön ve sağ arka olarak belirlenmiştir. Bu ayrımlar şekil 3.25'de gösterilen açısal değerlere göre yapılmış olup gri alan taranan ve değerlendirmeye alınan bölümü göstermektedir.



Şekil 3.25. LiDAR verileri bölümlendirme ve filtreleme

Bu kapsamda geliştirilen yazılım ile engel tespiti bölümlendirilen alanlardaki yoğunluğa göre belirlenmektedir. Yoğunluğu belirlemek için alanların önemine göre sırasıyla ön, sağ-sol ön ve sağ-sol arka en önemliden en az önemliye doğru bir yapı kullanılmıştır. Buna ek olarak engelin mesafesi ve yoğunluğu da ayrı bir hesaplama ile değerlendirmeye alınmıştır. Her iki yoğunluk hesabında da en yoğun alanlar 1 en az yoğun alanlar ise 0 ile ağırlıklandırılmıştır. Ara değerler de orta yoğunluktaki alanları ifade etmektedir. Bu işlemler sonucunda İYA'nın 5 farklı bölgesinin hangisinde engel yoğunluğu fazla hangisinde az olduğu belirlenmiştir. Engelin az olduğu tarafa doğru dönüş yapabilmesi için motorlara sinyal gönderilmektedir. LiDAR verilerini okuma ve analiz edip motorlara sinyal gönderme işlemi tek başına bir iş parçacığı olarak tanımlanmış ve otonom sürüş esnasında otomatik olarak devreye girecek şekilde ayarlanmıştır.

USB portuna bağılı diğeri bir donanım ise GPS'dir. GPS ile İYA'nın konum bilgisini ve aynı zamanda sistemin çalışma zamanı bilgisi alınmaktadır. GPS, 1Hz ile çalıştığı için veriler saniyede bir gelmektedir. GPS verilerinde de \$GPGGA ile başlayan veriler anlık olarak bulunulan enlem ve boylam bilgisini derece ve dakika cinsinden vermektedir. Hesaplamalarda kullanmak için öncelikler bu veri ondalıklı derece haline dönüştürülmektedir. Saat bilgisi ise düz metin ve Eşgüdümlü Evrensel Zaman (Coordinated Universal Time-UTC) şeklinde geldiği için gelen veri yazılımda saat tipine daha sonra da yerel saat dilimine çevrilmelidir. Bu aşamada SIM7600 donanımından da konum, saat gibi bilgiler benzer yöntemler ve işlemler ile alınmaktadır. Elde edilen her iki bilgi, aritmetik ortalama yöntemi tek bir veri haline getirilmektedir. Bu aşamada bir önceki veriden çok farklı veri gelmesi durumunda, ki bu değer >3m olarak belirlenmiştir, hesaplama dışı bırakılmıştır. Sonuç olarak iki ayrı donanımdan tek bir veri elde edilmiş ve olası veri eksikliği, hatalı veri gibi durumların önüne geçilmiştir. Elde edilen veriler yazılımda her bir enlem, boylam, saat verileri global tipe dönüştürülüp her dosyadan ulaşılması sağlanmış global hale getirilmiştir.

USB portuna bağılı diğeri donanım SIM7600 GSM modülüdür. Modül temelinde Raspberry Pi'nin internete otomatik olarak bağlantı sağlaması için kullanılmaktadır. GSM modülü AT komutları kullanılarak yönetilir. Servis sağlayıcıdan alınan parametreler kullanılarak GSM modülün internet bağlantısı AT komutları ile tanımlanmıştır. İnternet bağlantısını sağlamak için, Noktadan Noktaya Protokol (Point-to-Point Protocol-PPP) yöntemi kullanılmıştır. PPP yöntemi için ppp-peer dosyası oluşturulup script hazırlanmıştır. Bağlantı Raspberry Pi her açıldığında otomatik olarak başlaması için ayarlanmıştır. Sistem internete bağlanmadan diğeri özellikler aktif edilmemektedir.

USB portuna bağılı son donanım ise XBee modülüdür. XBee modülü kumanda ve su parametrelerini izleme sistemi ile haberleşme için kullanılmaktadır. Bu nedenle her üç bölümde kullanılan XBee modülleri yazılımsal olarak aynı ağda çalışması için ayarlanmıştır. Ağ içerisinde yıldız topoloji yapısı oluşturularak ağdaki cihazlar İYA'daki koordinatör etrafında düzenlenir. Diğeri cihazlar koordinatöre doğrudan bağılıdır ve birbirleriyle doğrudan iletişim kuramazlar. Haberleşme tamamen tasarlanan yazılım kurallarına göre gerçekleştirilmektedir. İYA'dan gönderilen komutlar ve komutlara göre su parametresinin çalışma şeması Şekil 3.14'te gösterilmektedir. Kumanda ile İYA arasındaki iletişim ise yine dizi halinde alınan verilerin işlenmesi ile gerçekleşmektedir. Kumandadan gönderilen veriler sadece motor kontrolü sağladığı için sadece motor hızlarını barındıran bir veri dizisidir ve veri burada sadece kumandadan İYA'ya gönderilmektedir.

İYA'nın su yüzeyinde açısı olarak yönünü belirlemek için HMC5883L manyetik pusula sensörü kullanılmıştır. Bu sensör, I2C haberleşme protokolü ile Raspberry Pi'ye bağlanarak üç ekseninde manyetik alan ölçümü yapar. Sensörden gelen ham veri, manyetik alanın x ve y bileşenleri olarak alınır ve atanmış bir ölçekleme faktörü ile yön açısına dönüştürülür. Sensörün ham verileri -32768 ile 32767 arasında değişen değerler olarak gelir ve bu değerler yazılım ile Gauss cinsine çevrildikten sonra 0° ile 360° arasında bir pusula açısına dönüştürülür. Ancak, çevresel manyetik etkilere bağılı olarak doğru sonuçlar almak için kalibrasyon işlemi yapılmalıdır. Kalibrasyon için İYA'da manyetik

alandan en az etkilenecek konuma yerleştirilmiş ve İYA'nın ilk hareketi dönme hareketi olarak belirlenmiş ve değerler stabilize edildikten sonra veriler değerlendirmeye alınmıştır. Buna ek olarak GPS den gelen konum verileri de değerlendirilerek belirli aralıklarla pusula verisinden gelen veriler kalibre edilmiş, sensör füzyon işlemi yapılmıştır. İşlenen pusula verileri, yazılımda global olarak tanımlanmış ve sınıf yapılarında erişimi sağlanmıştır.

Her bir kabuğa yerleştirilen su seviyesi ölçüm sensörleri kabuklardaki olası oluşabilecek su girişinde sistemi alarm durumuna geçirip uyarı oluşturmalarını sağlamaktadır. İYA motorlarının enerji kaynağı bataryaların doluluk seviyeleri anlık olarak okunabilmektedir. Su seviye ve batarya kapasite değerleri kullanılan donanımlar aracılığı ile analog sinyal olarak gelmektedir. Raspberry Pi da analog sinyali okuyabilecek bir yapı bulunmamaktadır. Sinyallerin okunabilmesi için dijital sinyale çevrilmesi amacıyla ADS1115 modülü kullanılmıştır. Modülde 4 kanal olarak bulunan giriş portlarının 3 tanesi kullanılmıştır. Her bir kanaldan gelen veriler, geliştirilen yazılım ile anlık olarak seçilerek okunmakta ve okunan değerler anlık olarak kontrol paneline bilgi göndermektedir.

İYA hem otonom hem de uzaktan kontrol edilebilecek şekilde tasarlanmıştır. Uzaktan kontrol işlemi, el kumandası ve yönetim paneli aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Kumanda ile verilen hareket komutları, aracın sağ ve sol tarafında konumlandırılmış motorlara bağımsız hız değerleri gönderilerek İYA'nın yönlendirilmesini sağlamaktadır. Bu süreç, kumanda tarafından oluşturulan özel veri paketlerinin Raspberry Pi'ye iletilmesiyle başlamaktadır. Raspberry Pi, kendisine ulaşan bu veri paketlerini açarak ilgili motor kontrol algoritmasını çalıştırmakta ve PWM sinyali üretmektedir. PWM sinyali, motor sürücü devresine iletilerek motor hızlarının dinamik olarak ayarlanmasını sağlamaktadır. Bu sayede, İYA'nın doğrusal hareketi, dönüş manevraları ve hız değişimleri hassas bir şekilde kontrol edilebilmektedir.

İYA'nın otonom hareketinde ilk aşamada, GPS alıcısı aracılığıyla enlem ve boylam verileri okunur; eş zamanlı olarak pusuladan başlık açısı elde edilir. Bu sayede aracın dünya koordinat sistemindeki pozisyonu ve yönü hakkında gerçek zamanlı bilgi edinilir. Araç ile hedef nokta arasındaki mesafe, Haversine formülü kullanılarak metre cinsinden hesaplanır. Haversine formülü, Dünya'nın küresel modelini kabul ederek iki coğrafi nokta arasındaki büyük çember mesafesini doğru bir şekilde belirler. Mevcut konumdan hedefe doğru ölçülen başlık açısı, coğrafi koordinat dönüşümlerine dayanarak elde edilir. Elde edilen açının 0° - 360° aralığında normalize edilmesi, yön sapmalarının doğru yorumlanması için kritik öneme sahiptir.

Geri beslemeli kontrol sistemleri, otonom araçlarda yön ve hız gibi dinamik değişkenlerin hassasiyetle yönetilmesini sağlar; bu sistemlerin en yaygın biçimi ise PID kontrolörüdür. PID kontrol, oransal (P), integral (I) ve türev (D) terimlerini birleştirerek güncel hata ve hata değişim hızını dikkate alır. İYA için kontrol, çevresel bozucu kuvvetler ve sistem ataletine karşı hassas bir denge gerektirir; bu nedenle PID geri beslemesi, salınımı sönümlü ve hızlı kararlılığa ulaşan bir yapı kullanılmıştır. PID kontrol sisteminin tasarımında amaç hem yön hem de hız hatalarını aynı anda ele alarak teknenin hedefe doğru dengeli ve kararlı bir şekilde ilerlemesini sağlamaktır. Bu yöntemde üç ayrı

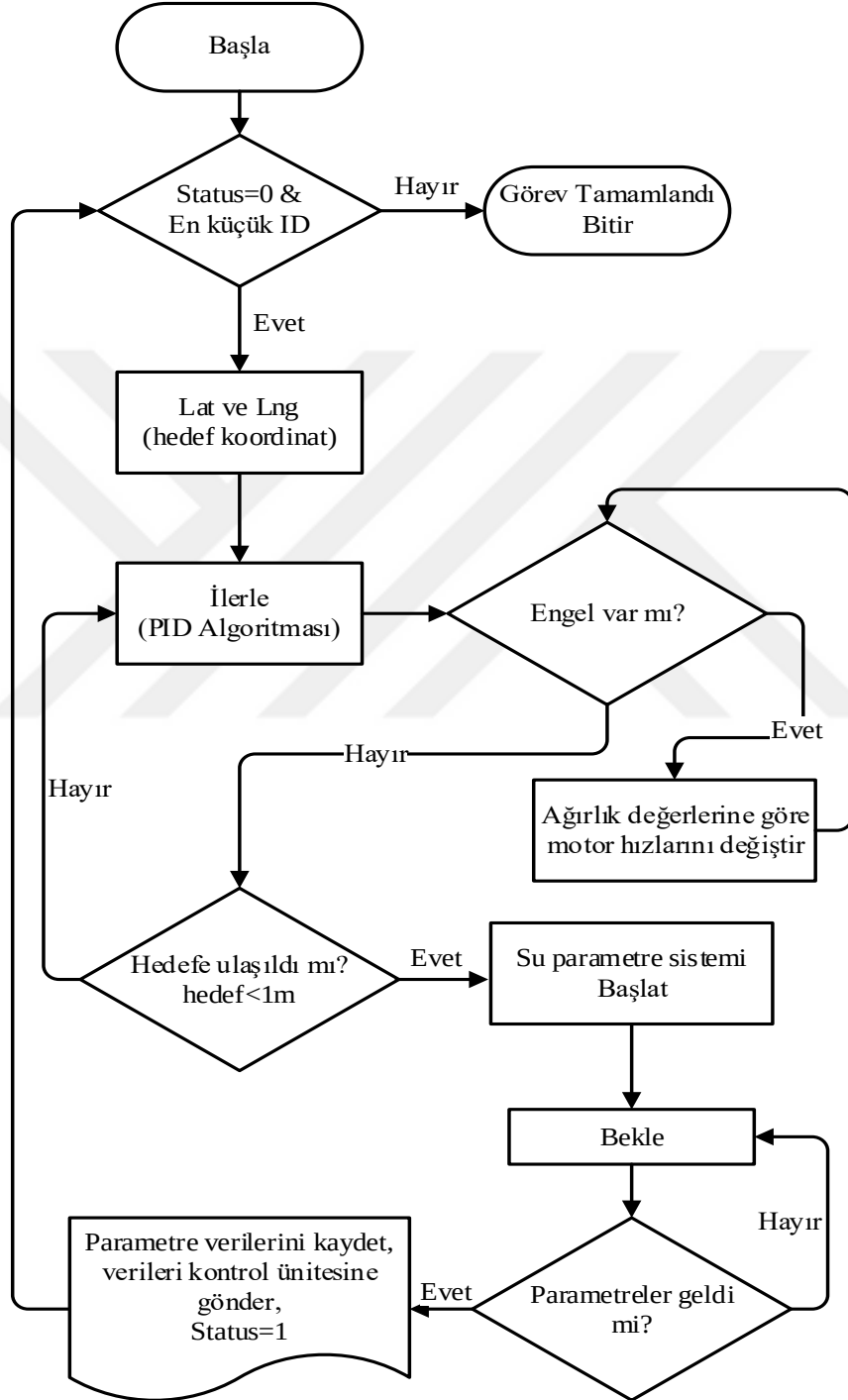
etki bir araya getirilir: oransal, integral ve türevsel bileşenler. Oransal bölüm, mevcut hata büyüklüğüne doğrudan tepki verir. Hedef yön veya mesafe ile gerçek değer arasındaki fark ne kadar büyükse, oransal da o kadar güçlü bir düzeltme yapar. Bu sayede tekne, hatayı hızla kapatmak için yeterli kuvvetle motor komutlarını ayarlar. İntegral bölüm ise geçmiş hataların birikimini göz önünde bulundurur. Zaman içinde küçük ama kalıcı hatalar toplandığında, integral bileşen devreye girerek bu sapmaları sıfıra indirir. Böylece araç, uzun süre boyunca hedeften hafifçe sapma eğilimi gösterdiğinde bile sonunda tam isabetli bir konuma ulaşır. Türevsel bölüm ise hatanın zamana göre değişim hızını izler. Hata hızla değişiyorsa, türevsel etki sayesinde düzeltme işlemi daha erken ve hafifletici bir şekilde başlar; bu da ani komut sıçramalarının ve sistem salınımlarının azalmasına yardımcı olur. Bu üç bileşenin dengeli bir şekilde birleştirilmesiyle, araç mevcut sapmalara karşı hızlı yanıt verdiği, geçmişteki kalıcı hataları giderdiği ve gelecekteki ani değişimlere karşı öngörülü bir sönümlleme sağlamaktadır. Böylece oransal düzeltmenin yol açabileceği titreşimler, integralin aşırı birikimi veya türevselin gürültüye aşırı tepki vermesi gibi sorunlar en aza indirilir. Bu yaklaşımla tasarlanan PID kontrol su ortamındaki bozucu etkilere rağmen aracın hedefe uygun bir şekilde ulaşmasında katkı sağlamaktadır (Setiawan vd. 2022).

Otonom süreci, kontrol paneli üzerinden gönderilen veri paketlerinin İYA belleğine Virgülle Ayrılmış Değerler (Comma-Separated Values-CSV) dosya formatında kaydedilmesi ile başlamaktadır. Bu dosya, görev listesi olarak adlandırılmakta olup, İYA'nın gerçekleştirmesi gereken görevlerle ilgili detaylı bilgileri içermektedir. Görev listesi tek bir görevi içerebileceği gibi birden fazla görevi de içerecek şekilde yapılandırılabilir. Bu liste belirlenen hedef noktalar, ilgili koordinatlar, görev parametreleri ve zaman verileri içerecek şekilde hazırlanmaktadır. Yapılan testlerde oluşturulan örnek bir görev listesi Şekil 3.26'te gösterildiği formatta düzenlenmekte ve sistem tarafından işlenmektedir. Bu yapı sayesinde İYA'nın görevleri önceden belirlenen bir sıra ile yerine getirmekte ve otonom hareket algoritmasına uygun şekilde ilerlemesi sağlanmaktadır.

	A	B	C
1	ID	1	2
2	Lat	36,85353	36,85472
3	Lng	30,62499	30,62353
4	Sample	False	True
5	DateTime	23.01.2025 18:24	23.01.2025 18:24
6	Name	Bogacayi_Rota	Bogacayi_Rota
7	StartDateTime		
8	ReachedDateTime		
9	EndDateTime		
10	Status	0	0
11	pH	0	0
12	Con	0	0
13	Orp	0	0
14	Temp	0	0
15	Do	0	0
16			

Şekil 3.26. Örnek görev listesi

Görev listesinde kontrol panelinde belirlenen işlemlere ek olarak oluşturulan dosyada göreve başlama, görev yerine ulaşma, görevin bitiş saati, görevin durumu ve parametre değerleri için alanlar tanımlanmaktadır. Bu bölümler görev ile ilgili her aşama tamamlandığında güncellenmekte, yeni veriler eklenmektedir. Görev dosyası ve görev ile ilgili işlemler için Şekil 3.27’de belirtilen algoritma kullanılmıştır.



Şekil 3.27. İYA otonom çalışma algoritması

İYA görev listesinin oluşturulmasında sonra status değeri 0 olan ve Tanımlayıcı (Identifier-ID) değeri en küçük olan görevin enlem ve boylam bilgisi alınır. Aynı zamanda o anki tarih ve saat bilgisi görev listesinde StartDateTime hücreğine eklenir ve İYA hareketine başlanır.

GPS sensörü aracılığıyla İYA'nın mevcut konumu sürekli olarak güncellenirken, pusula sensörü İYA'nın yönünü belirleyerek hareket doğrultusunun hedefle uyumlu olup olmadığını kontrol etmektedir. PID algoritması, mevcut yön ile hedef yön arasındaki açı farkını hesaplayarak, motorlara uygulanacak PWM sinyallerini ayarlar. Hata açısı büyüdükçe motor hızları arasındaki fark artarken, azaldıkça hızlar birbirine yaklaşmaktadır. Ayrıca 10-20 arasında belirlenen hız değerleri hedefe olan mesafeye göre artmakta veya azalmaktadır. Bu süreç hedefe olan mesafe 1m ve altı mesafeye gelinceye kadar sürekli olarak tekrarlanarak teknenin rotası düzeltilip ilerlemesi sağlanmaktadır. Hedef koordinat ile İYA mevcut koordinat arasındaki mesafe 1m altına düştüğünde hedefe ulaşılmış kabul edilir ve görev listesinde ReachedDateTime hücreğine anlık tarih saat bilgisi eklenir.

Hedefe ulaşıldığında su parametre izleme sistemine okuma talimatı gönderilir ve okunan parametre değerleri gelene kadar bekleme moduna geçilir. Su parametre değerleri ve diğer bilgiler bir veri paketi halinde gelmektedir. Örnek bir veri paketi OK;7,69;3726,2;6352,3;22,6;212,93;2 şeklinde gelmekte ve her bölüm birbirinden noktalı virgül (;) ile ayrılmaktadır (Çizelge 3.4).

Çizelge 3.4. Örnek veri paketi

Status	pH	EC	ORP	Temp	DO	Valf No
OK	7,69	3726,2	6352,3	22,6	212,93	2

Gelen veri paketi öncelikle görev listesinde karşılık gelen hücrelere eklenmektedir. Daha sonra veriler Raspberry Pi'dan API aracılığıyla kontrol ünitesine gönderilir. Veriler, JSON formatında düzenlenerek HTTP POST isteği ile iletilir. Bu süreçte, requests kütüphanesi kullanılarak oluşturulan API endpoint'ine veri gönderimi sağlanır. Son olarak görev listesinde Status değeri 1, EndDateTime değeri de o anki tarih ve saat olarak güncellenir. Bu işlemler tamamlandıktan sonra görev listesindeki görev tamamlanmış ve tekrar yeni görev için Status değeri 0 olan en küçük ID değere sahip görev seçilir ve tekrar aynı işlemler gerçekleştirilir. Eğer ki görev listesinde tüm görevler tamamlandı ise İYA başlangıç noktasını hedef koordinat olarak tanımlar ve başlangıç noktasına geri dönmek için harekete geçer. Başlangıç noktasına ulaştığında görev listesindeki tüm görevler tamamlanmıştır. Toplanan veriler hem İYA hem de kontrol ünitesi veri tabanında saklanmaktadır.

İYA aktif edildiğinde kontrol merkezine, gerçek zamanlı izleme ve durum takibi sağlamak amacıyla belirli sistem parametrelerini anlık olarak iletmektedir. Bu süreçte, batarya kapasitesi, kabuklardaki su seviyesi, konum bilgisi, pusula yönü ve motor hızları gibi kritik veriler, Python'un SignalR istemci kütüphanesi kullanılarak gönderilmekte ve kurulan bağlantı ile her veri paketinin başarılı bir şekilde iletilmesini sağlamak amacıyla hata kontrol mekanizmaları uygulanmaktadır. Elde edilen ham veriler, JSON formatında düzenlenerek SignalR istemcisi üzerinden belirlenen kanala gönderilmektedir. Bu

süreçte, asenkron veri iletimi sağlanarak sistemin kesintisiz çalışması ve anlık güncellemelerin gecikmesiz iletilmesi sağlanmıştır. Veri paketlerinin anlık gönderilmesi aracın hareket dinamikleri ve çevresel değişkenlere anlık tepki verebilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Böylece geliştirilen sistem kararlı ve sürekli bir veri aktarım mekanizması sağlayarak gerçek zamanlı izleme ve analiz yapılmasına olanak tanımaktadır.

3.8 Kontrol Paneli

Kontrol paneli İYA'yı uzaktan kontrol etmek ve izlemek amacıyla tasarlanmıştır. Kontrol paneli olarak bir internet sitesi geliştirilmiştir. İnternet sitesi modern web teknolojileri ve gerçek zamanlı veri iletişim yöntemleri kullanılarak geliştirilmiştir. Kontrol paneli kullanıcıların İYA'nın anlık konumunu takip edebilmesini, hareket komutlarını gönderebilmesini ve çeşitli sensörlerden gelen verileri görüntüleyebilmesini sağlamaktadır. Bu süreçte ASP.NET Core MVC, HTML, CSS, JavaScript, API, SignalR ve Google Maps API gibi çeşitli teknolojiler entegre edilerek modüler, ölçeklenebilir ve yüksek performanslı bir sistem oluşturulmuştur.

İnternet sitesi ASP.NET Core MVC mimarisi üzerine inşa edilmiştir. ASP.NET Core, Microsoft tarafından geliştirilen, yüksek performanslı ve çapraz platform destekli bir web geliştirme kütüphanesidir. Mimarisi ile özellikle büyük ölçekli projelerde esneklik, yeniden kullanılabilirlik ve bakım kolaylığı sunmaktadır (Kao, et al., 2018).

Sistemde API ile teknenin batarya durumu, su seviyesi, pusula yönü, hız bilgisi ve su parametre verisi gibi daha az kritik verilerin istemciye aktarımı sağlanmaktadır. RESTful API yaklaşımı istemci ile sunucu arasındaki veri alışverişini hızlı, güvenilir ve ölçeklenebilir hale getirmektedir. Kullanıcı arayüzü tasarımı için HTML, CSS ve JavaScript kullanılmıştır. HTML sayfanın yapısal bileşenlerini tanımlarken, CSS kullanıcı arayüzünün daha estetik ve mobil uyumlu olmasını sağlamaktadır. JavaScript kullanıcı etkileşimlerini yöneterek sistemin dinamik ve interaktif bir yapıya kavuşmasını mümkün kılmaktadır.

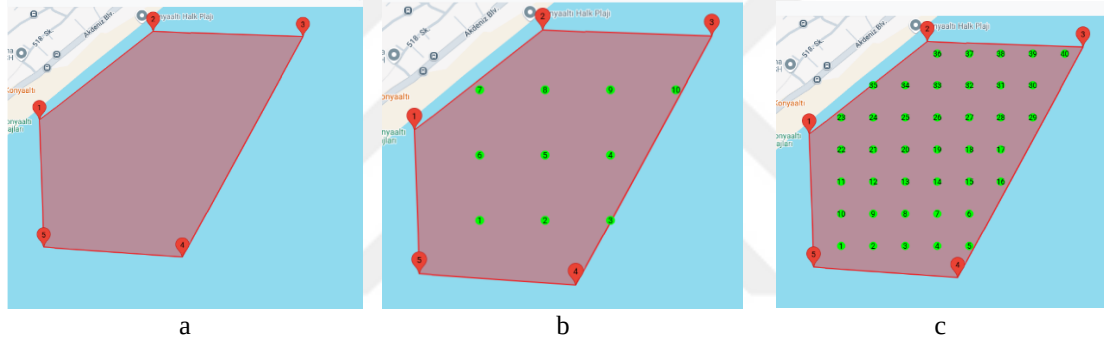
Sistemin en önemli bileşenlerinden biri SignalR teknolojisidir. SignalR istemci ve sunucu arasında çift yönlü, düşük gecikmeli ve sürekli veri akışını sağlayan bir gerçek zamanlı haberleşme kütüphanesidir (Ingebrigtsen, 2013). Bu teknoloji sayesinde İYA'ya ait veriler anlık güncellenerek kullanıcıya anlık bilgi akışı sağlanmaktadır. Böylece kullanıcı herhangi bir sayfa yenilemesi yapmadan teknenin konumu gibi kritik verilere anlık olarak erişebilmektedir. Bunun yanı sıra Google Maps API entegrasyonu ile teknenin anlık konumu harita üzerinde görselleştirilmekte ve kullanıcının hedef noktalar belirleyerek tekneyi yönlendirmesine olanak tanınmaktadır. Google Maps API harita tabanlı veri görselleştirme ve coğrafi analiz işlemleri için yaygın olarak kullanılan bir araç olup, coğrafi koordinat tabanlı sistemlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır (Santos vd. 2011).

İnternet sitesi sayesinde uzaktan tekne kontrolü ve izleme işlemleri, güvenilir ve verimli bir şekilde gerçekleştirilmektedir. API'ler aracılığıyla veri alışverişi sağlanırken, SignalR ve Google Maps API gibi teknolojilerle gerçek zamanlı takip ve yönlendirme işlemleri etkin bir şekilde uygulanmaktadır. Kullanıcı dostu arayüzü, modüler yapısı ve

yüksek performanslı veri akışı ile sistem hem manuel kontrol hem de otonom navigasyon için optimize edilmiştir.

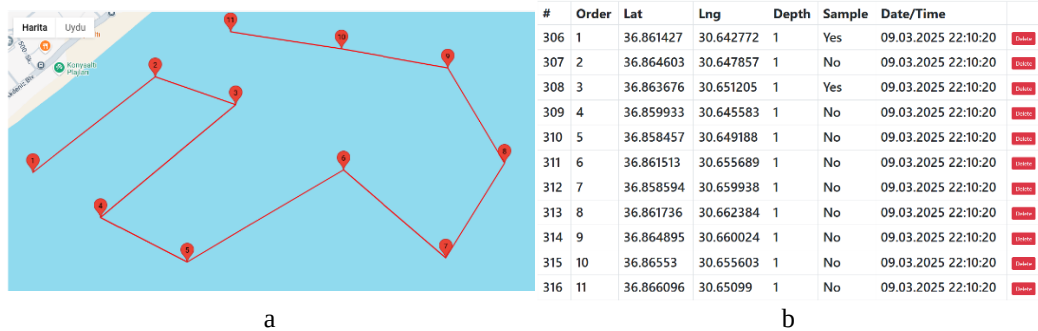
Kontrol panelinde mobil cihazlarda da kullanılabilen, 8 farklı işlemin yapılabildiği bölüm bulunmaktadır. Bunları otonom ve manuel görev tanımlama, görev denetimi ve gerçek zamanlı İYA izleme, İYA uzaktan kontrol, toplanan su parametre verileri ve verilerin analizi, çalışma alanı sınırlılıkları, toplanan İYA verilerinin gösterildiği bölümler olarak adlandırılmaktadır.

Birinci bölüm otonom görev tanımlarının yapıldığı bölümdür. Otonom görev tanımlama işlemi harita üzerinden parametrelerin izlenmesi istenen bölge seçilerek yapılır (Şekil 3.28a). Bölge seçiminden sonra seçilen bölgenin kaç farklı noktasından ölçüm yapılacağı belirlenir ve bu bilgi girilir. Ardından noktaların otomatik biçimde oluşması sağlanır (Şekil 3.28b-c). Bu aşamada sistem seçilen alana göre, belirtilen nokta sayısı kadar alan dahilinde olacak şekilde grid yapısı oluştur ve eşit mesafelerde ölçüm noktalarını hesaplayıp gösterir. Ardından görev tanımlama ve açıklaması bilgisi girilip veri tabanına kaydedilir.



Şekil 3.28. Otonom görev tanımlama a) Alan seçimi; b) 10 görev noktalı; c) 40 görev noktalı

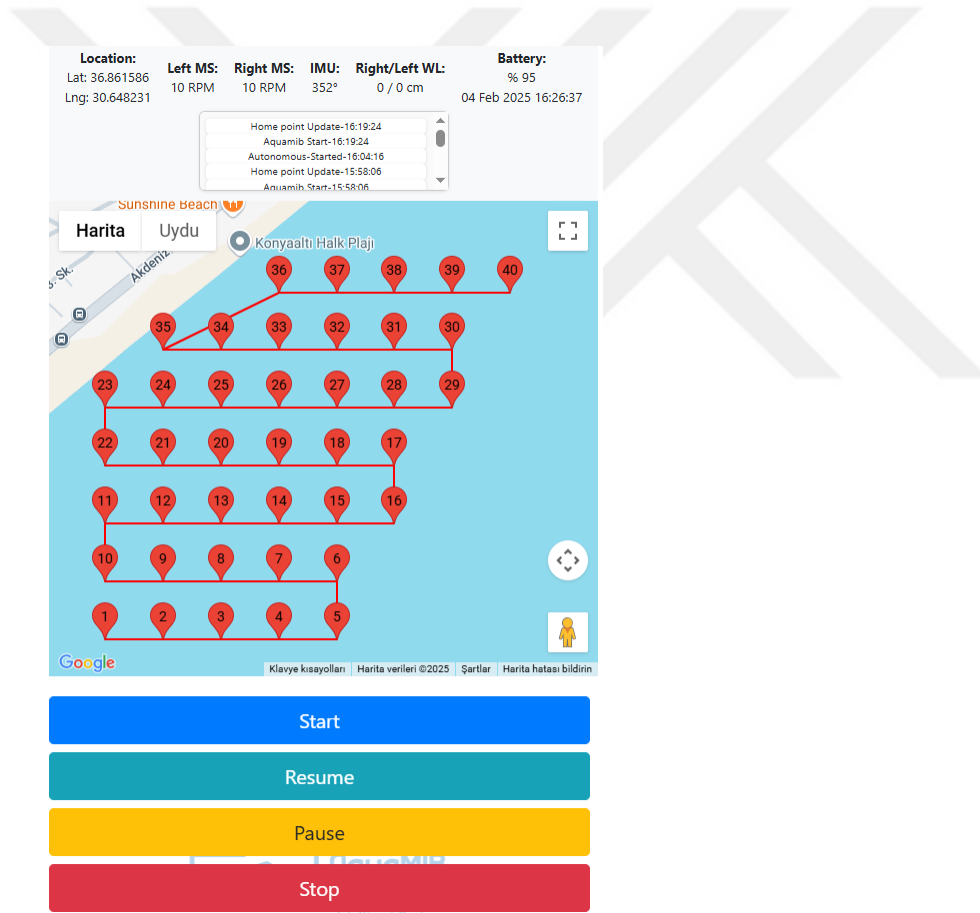
İkinci bölüm İYA'ya yaptırılacak görevlerin manuel olarak tanımlandığı bölümdür. Bu aşamada görevler kullanıcı tarafında sırayla tanımlanır. Önce su parametresinin izleneceği koordinat seçilir, daha sonra numune alınıp alınmayacağı belirtilir ve son olarak görev listesine eklenir (Şekil 3.29a). Bu şekilde kaç adet noktadan işlem yapılacağı tek tek seçilip bir görev listesi oluşturulur (Şekil 3.29b) ve bu şekilde veri tabanına kaydedilmesi sağlanır.



Şekil 3.29. Manuel görev rotası a) Görev noktası seçimi; b) Görev noktası bilgisi

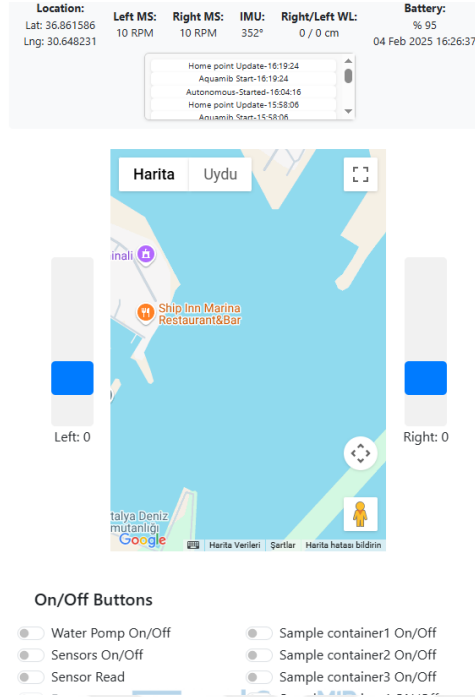
Üçüncü bölüm, bir ve ikinci bölümde oluşturulan görev listelerine göre işlemleri uygulama ve izleme bölümüdür. Bu bölümde sisteme daha önceden kaydedilen görevler listelenir. Görev seçiminden sonra görev başlatma, durdurma, duraklatma gibi işlemler bu sayfadan yapılır. Otonom görevde alansal dağılıma göre belirlenen noktalar arası sefer en az enerji tüketimi ile gerçekleşmesi için görev sırası bu aşamada yazılım ile belirlenir. Ayrıca görev esnasında İYA'nın anlık olarak konumu, motor hızları, güvenlik bilgileri ve çalışma aşamasında tüm adımlar buradan izlenebilir (Şekil 3.30).

Bu bölümde İYA ile kontrol ünitesi arasında SignalR teknolojisi ile iletişim sağlanmaktadır. Start, Stop, Pause, ve Resume komutları gönderildiği anda İYA tarafından sürekli dinlenen SignalR hub'ına iletilir ve İYA, gelen komuta göre bağlı anında olarak işlem yapar. Buna ek olarak konum, motor hızları, pusula, kabuklardaki su seviyesi ve batarya verileri anlık olarak İYA tarafından izleme ekranına gönderilmektedir. Bu veriler de ekranda takip edilebilmektedir.



Şekil 3.30. İYA gerçek zamanlı izleme ve görev talimatı iletme sayfası

Dördüncü bölüm, İYA'nın uzaktan manuel olarak kontrol edilebildiği bölümdür. Bu bölümde İYA motor hızları değiştirilebilmekte, su parametreleri izleme sisteminde bulunan pompa, sensörler ve numune alım sistemi aktif veya pasif edilebilmektedir. Uzaktan kontrol sayfası otonom olarak çalışması zor alanlar için tasarlanmış olup yine izleme bölümünde yer alan anlık bilgilendirmeler burada da yapılmaktadır (Şekil 3.31).



Şekil 3.31. İYA uzaktan kontrol bölümü

Beşinci bölüm toplanan su parametre değerlerinin listelendiği bölümdür. Listeleme işlemi bir tarih aralığına göre yapılabilir. Bu işlem için uygun seçim yapıldıktan sonra listeleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Aynı zamanda bu bölümde elde edilen liste bilgisayara CSV dosya formatında kaydedilebilmekte ve uygun programlar ile farklı analizler yapılmasına olanak sağlamaktadır (Şekil 3.32).

Select Date-Time

2025-02-04 13:00

Select Date-Time

2025-02-04 14:00

Filter

#	DateTime	Latitude	Longitude	Conductivity	Temperature	pH	Oxygen	ORP
1164	4.02.2025 13:12:24	36,854715	30,623531	11955	20,4	8,47	1,13	274,1
1163	4.02.2025 13:10:38	36,853531	30,62499	12007	20,6	8,54	1,16	273,3

Download CSV

Şekil 3.32. Su parametreleri listeleme ve indirme sayfası

Altıncı bölümde toplanan su parametresi verileri IDW, Kriging, Spline ve Doğal Komşu analiz yöntemleri ile gerçek zamanlı analiz edilebilmektedir. Bu aşamada analizler önce görev seçimi, daha sonra yöntem seçimi ve son olarak da sensör seçimi ile yapılmaktadır. Her bir su parametresi için farklı renklerde yayılım haritaları oluşturulabilmektedir. Ayrıca parametre seçimlerinden sonra online harita üzerinde ölçüm

yapılan koordinatlara göre ısı haritası çıkartılmaktadır. Analizlerde, her bir su kalite parametresine ait mekânsal değişkenlik, Kriging, IDW, Spline ve Doğal Komşu enterpolasyon teknikleri kullanılarak modellenmiştir. Bu yöntemlerin seçilmesinin temel nedeni, literatürde sıkça kullanılmaları, çevresel verilerle yüksek uyum göstermeleri ve mekânsal analizlerde farklı güçlü yönleri sahip olmalarıdır. Ayrıca bu dört yöntemin tamamı, gerçek zamanlı web tabanlı sistemlerde hesaplama açısından uygulanabilir düzeydedir (Chen ve Liu, 2012).

IDW enterpolasyon yönteminde, bir noktanın değeri ile ona komşu noktaların değerleri arasında, mesafeye bağlı olarak ters orantılı bir ilişki kurulmaktadır. Hesaplanacak nokta çevresinde bilinen noktaların değerlerine olan uzaklıklarına göre ağırlıklandırılmaktadır. Bu hesaplama için;

$$Z_{(x,y)} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}} \quad (3.1)$$

formülü kullanılmıştır (Shepard 1968). Formülde; $Z_{(x,y)}$ enterpolasyonu yapılmak istenen noktanın tahmini değerini, z_i i indeksli gözlem noktasındaki bilinen değeri, d_i tahmin edilen nokta ile gözlem noktası arasındaki mesafeyi, p ise ağırlık katsayısı olarak tanımlanmaktadır. p değeri yakın olan noktaların daha baskın olduğu ancak uzak olan noktaların etkisinin tamamen dışlandığı dengeli bir enterpolasyon yüzeyi üretmek amacıyla yaygın olarak kullanılan 2 değeri verilmiştir (Shepard, 1968). Daha yüksek p değerleri yakın noktalara çok daha yüksek ağırlıklar atayarak enterpolasyon yüzeyinde keskin değişimler oluşturur; bu da verideki küçük farklılıkların büyümesine yol açtığı gözlemlenmiştir. Düşük p değerleri ise yüzeyi daha düz hale getirip uzak noktaların etkisini arttırdığı enterpolasyonun hassasiyetini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca uygulamada enterpolasyon noktası mevcut gözlem noktalarından biriyle çakıştığında, $d_i = 0$ durumu oluşmakta ve bu durum formülde sıfıra bölme hatasına neden olmaktadır. Bu problemi çözmek için de mesafe değeri yerine küçük bir sabit değer (0.0001) kullanılmıştır.

Kriging mekânsal korelasyonu da dikkate alarak tahmin yaptığı için, mekânsal olarak birbirine yakın noktaların benzer değerlere sahip olacağı varsayımı ile çalışır. Ancak klasik enterpolasyon yöntemlerinden farklı olarak, Kriging hesaplamasında yalnızca mesafe değil, aynı zamanda verilerin mekânsal dağılım yapısı, varyansı ve otokorelasyon özellikleri de dikkate alınmaktadır. Bu sayede hem bir tahmin sağlar hem de bu tahmine ilişkin bir belirsizlik oranı verir. Varyogram olarak adlandırılan bu yapı, veriler arasındaki mesafeye göre varyansın nasıl değiştiğini tanımlamakta ve Kriging tahminlerinin temel parametresini oluşturmaktadır. Kriging hesaplaması için:

$$\hat{Z}(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\gamma(h_i)} * Z(x_i) \right)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\gamma(h_i)}} \quad (3.2)$$

formülü kullanılmıştır (Chiles ve Delfiner 2012). Formülde $\hat{Z}(x_0)$ enterpolasyonu yapılmak istenen noktadaki tahmini değeri, $\gamma^{(h_i)}$ tahmin noktası ve i . gözlem noktasındaki varyogram değeri, h_i ilgili mesafeyi, $Z(x_i)$ bilinen noktalardaki değerleri göstermektedir.

Klasik Kriging yaklaşımı varyogram modellemesi, kovaryans matrislerinin çözülmesi ve tahmin varyansının hesaplanması gibi hesaplama açısından karmaşık işlemleri içerir. Bu durum özellikle gerçek zamanlı sistemler, web tabanlı uygulamalar, düşük işlem gücüne sahip cihazlar ya da örnekleme sayısının az olduğu uygulamalar için maliyetli olmaktadır. Bu nedenle çalışmada, klasik Kriging yöntemi temelinde, temel prensiplerini koruyan deterministik, sadeleştirilmiş bir Kriging algoritması kullanılmaktadır. Bu tür sadeleştirilmiş hesaplamalar, literatürde de sezgisel kriging, yaklaşık kriging veya deterministik varyogram ağırlıklandırması gibi kavramlarla karşılık bulmaktadır. Gelişmiş jeostatistiksel yöntemlerin sadeleştirilerek kullanımı gerçek zamanlı karar destek sistemlerinde etkili olmaktadır (Li ve Heap, 2008).

Spline enterpolasyonu, bilinen veri noktaları arasındaki sürekli geçişleri modelleyerek düzgün bir yüzey üretmeyi amaçlayan bir yöntemdir. Matematiksel olarak Spline genellikle polinom parçalarının belirli noktalarda birleştirilmesiyle oluşturulur. Bu sayede türevleri sürekli olan, yumuşak geçişli eğriler elde edilir (ArcGIS Pro, 2025). Gerçek zamanlı izleme sistemlerinde karmaşık hesaplamaya sahip klasik Spline enterpolasyon teknikleri yerine daha sadeleştirilmiş yaklaşımlar tercih edilmektedir. Bu çalışmada kullanılan yaklaşım, Spline tabanlı ama deterministik ve sadeleştirilmiş bir enterpolasyon tekniğidir. Spline yönteminde;

$$\hat{Z}_{(x,y)} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot U(|(x,y) - (x_i, y_i)|) + a_1x + a_2y + a_3 \quad (3.3)$$

formülü kullanılmıştır (Franke 1982). Formülde $\hat{Z}_{(x,y)}$ enterpolasyonu yapılmak istenen noktanın tahmin değerini, λ_i ağırlık katsayıları, U_r radyal baz fonksiyonu, a_1, a_2, a_3 doğrusal regresyon terimlerini, i . gözlem noktasındaki değeri belirtmektedir.

Doğal komşu enterpolasyonu mekânsal verilerde tahmin yapılacak noktanın etrafındaki en yakın gözlem noktalarına dayalı olarak, doğal geçişler içeren yüzeyler oluşturmayı amaçlayan bir yöntemdir. Bu yöntemde enterpolasyon yapılacak noktanın çevresindeki örnekleme noktaları dikkate alınır ve genellikle Voronoi diyagramları kullanılarak “doğal komşular” belirlenir. Klasik Natural Neighbor yöntemi her bir komşunun katkısını, o komşunun Voronoi hücresinden tahmin noktasına yeni hücre eklendiğinde ne kadar alan kaybettiğine göre belirler (Sambridge vd. 1995).

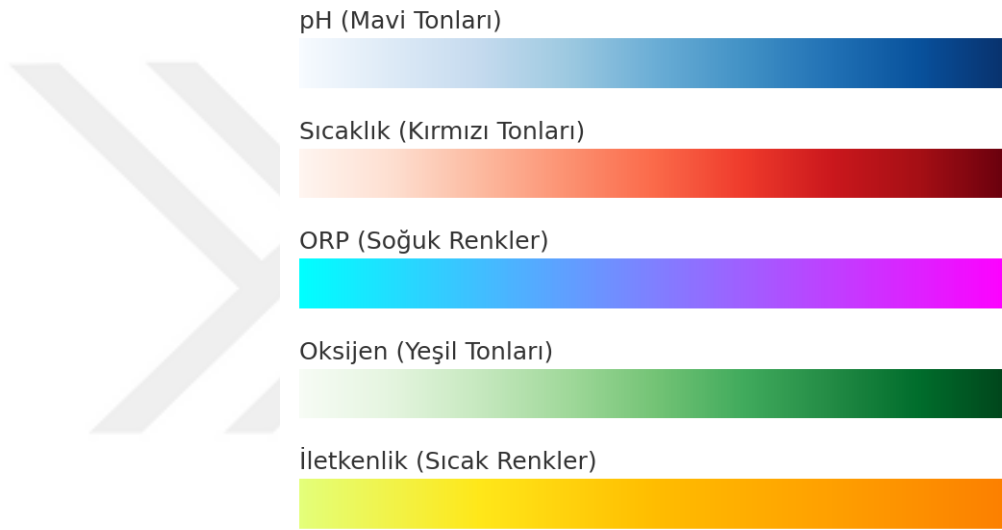
Bu çalışmada kullanılan yöntem yalnızca en yakın veri noktasının değeri üzerinden tahmin yapmaktadır. Çalışmada doğal komşu enterpolasyonu için:

$$\hat{Z}_{(x,y)} = Z_{(x_k, y_k)} \quad (3.4)$$

$$k = \arg \min_i \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (3.5)$$

formülü kullanılmıştır (Sambridge vd. 1995). Tahmin yapılmak istenen (x, y) noktasına en yakın olan gözlem noktası bulunur (k) ve tahmin doğrudan bu noktanın değeri olarak alınır. Bu sayede hesaplama hızlı ve verimli olmaktadır. Ancak ani değer sıçraması ve belirsizlikler gözlemlenmiştir. Bu nedenle ön izleme amacıyla veya başlangıç amacıyla gerçekleştirilebilecek uygulamalarda uygun bir seçim olarak eklenmiştir.

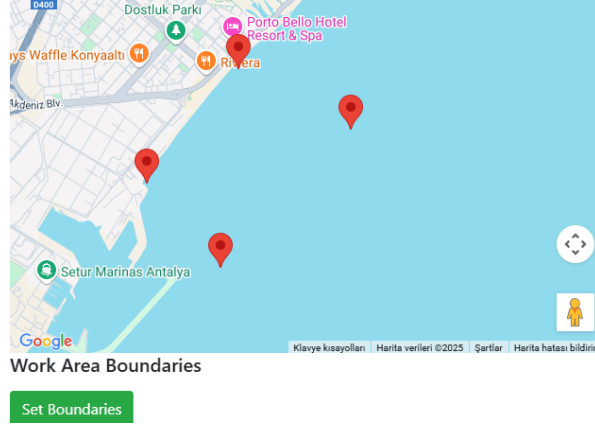
Belirtilen yöntemler seçmeli olarak uygulanabilmekte ve her bir parametre değeri için alansal dağılım haritaları oluşturulabilmektedir. Haritalar her bir parametre farklı renk ile temsil edilmektedir. Skalada gösterilen yapıda veri değerlerinde soldan sağa doğru artışı ifade etmektedir (Şekil 3.33).



Şekil 3.33. Alansal dağılım haritaları renk skalası

Ayrıca bu bölümde yoğunluk haritası grafik tipi kullanılarak, coğrafi tabanlı su parametreleri bir harita üzerinde görselleştirilmektedir. Bu yaklaşım harita üzerinde gerçek koordinatlara dayalı yoğunluk haritalarının oluşturulmasına olanak tanır. Verilerden elde edilen yoğunluk bilgisi, ilgili su parametresine karşılık gelen değerlerle standart olarak renklendirilir. Böylece kullanıcı farklı koordinatlardaki toplanan ölçüm verilerini harita üzerinde karşılaştırmalı olarak inceleyebilir. Etkileşimli yapı sayesinde kullanıcı fare ile veri noktalarının yoğunluk bölgelerini keşfedebilir, yakınlaştırma yapabilir ve renk skalasını yorumlayarak çevresel durumu değerlendirebilir.

Yedinci bölümde güvenlik amacıyla İYA'nın çalışma sınırlarını belirlemek için bir yapı kurulmuştur. Burada amaç İYA'nın kontrolünü kaybetmesi veya herhangi bir sinyal kaybı gibi durumlarda belirlenen sınırlar dışına çıkmasını engellemektir. İşlem harita üzerinden çalışma alanını kapsayacak şekilde bir alan seçilmesi ve seçilen alanın İYA'ya gönderilmesi basamaklarından oluşmaktadır (Şekil 3.34).



Şekil 3.34. İYA çalışma alanı sınırları belirleme sayfası

Son olarak sekizinci bölümde de İYA'dan toplanan anlık veriler listelenmektedir. Herhangi bir görev veya uzaktan kontrollü sürüşte İYA'nın motor hız, konum, yön ve üzerinde bulunan diğer sensörlerden toplanan veriler sunucuya gönderilmektedir. Gönderilen bu veriler bu bölümden izlenebilmektedir. Ayrıca bu bölümde toplanan veriler istenildiği takdirde bilgisayara indirilebilmektedir (Şekil 3.35).

Select Date-Time

2025-02-04 13:00

Select Date-Time

2025-02-04 14:00

[Filter](#)

[Download CSV](#)

#	DateTime	Latitude	Longitude	Battery	IMU	IP	GSM Signal Strength	Right/Left Motor	Left/Right Water Level
29530	4.02.2025 13:08:46	36,895501	30,644357	0	352	194.27.186.190	31	10/10	0/0
29531	4.02.2025 13:08:55	36,8955	30,644357	0	350	194.27.186.190	31	10/10	0/0
29532	4.02.2025 13:08:59	36,895499	30,644357	0	351	194.27.186.190	31	10/10	1/0
29533	4.02.2025 13:09:03	36,895499	30,644357	0	352	194.27.186.190	31	10/10	1/0

Şekil 3.35. Gerçek zamanlı toplanan İYA verileri

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde geliştirilen İYA sisteminin tasarımı ve yazılımı, saha testleri ve uygulama süreçleri sırasında elde edilen sonuçlar, deneysel veriler ile analiz edilerek tartışılmıştır. Uygulama sırasında hem otonom hem de manuel sürüş modları test edilerek farklı senaryolarda sistemin tepkileri, doğruluk payı, kullanıcı etkileşimi ve çevresel koşullara adaptasyonu incelenmiştir. Ayrıca su parametresi verilerinin toplanması ve analizi sürecinde sistemin işlevselliği değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme sürecinde yalnızca teknenin yön bulma ve görev gerçekleştirme başarısı değil, aynı zamanda kullanıcı arayüzü, sensör doğruluğu, haberleşme süreleri ve genel sistem kararlılığı da değerlendirilmiştir.

Otonom modda çalışırken teknenin rota sapma düzeyleri, hedefe ulaşma süresi ve engelden kaçınma becerisi gibi metrikler değerlendirilmiştir. Ayrıca manuel modda ise insan faktörünün sisteme etkisi, kullanıcıdan gelen komutlara olan tepki süresi ve yönlendirmenin hassasiyeti gibi parametreler değerlendirilmektedir. Sistemin en önemli bileşenlerinden biri olan su parametresi ölçümleri de gerçek zamanlı olarak sensörler aracılığıyla gerçekleştirilmiş ve sistemin topladığı sıcaklık, pH, EC, DO ve ORP gibi parametreler toplanma süreleri ve parametre değerlerinden elde edilen alansal dağılım haritaları değerlendirilmiştir. Ayrıca sistemin genel performansı da değerlendirmeye tabi tutulmuş; haberleşme altyapısında yaşanan gecikmeler, pil ömrü, motor verimliliği ve kontrol algoritmalarının başarımı detaylı şekilde analiz edilmiştir.

Bu kapsamda sistemin saha koşullarında ve gerçek zamanlı uygulamalarda nasıl davrandığı, teorik tasarımların pratikteki karşılığı ve hangi alanlarda iyileştirme potansiyeli bulunduğu hakkında genel bir çıkarım yapılması amaçlanmıştır. Her bir alt başlık projenin farklı bir bileşenine odaklanmakta olup gerek teknik performans gerek kullanıcı deneyimi gerekse çevresel veri yönetimi açısından proje çıktılarının bütüncül bir şekilde yorumlanmasına olanak sağlamaktadır.

4.1 İYA Donanım ve Yazılımı

İYA iki ayrı kabuğun birbirlerine paralel biçimde birleştirilmesi ile Idris vd. (2016), Balbuena vd. (2017) ve Bautista vd. (2022) gibi çalışmalarda da kullanılan katamaran formunda tasarlanmıştır. Katamaran form geliştirirken her iki kabuktaki ağırlık dengesi ve formun orta kısmına yerleştirilen su parametre ölçüm sistemi dengeli bir biçimde yerleştirilmiştir. Aracın ağırlık dengesi İYA'nın hareketi esnasında herhangi bir yöne saptmasının önüne geçmektedir. Kaizu vd. (2011) bu konuda asimetrik ağırlık dağılımı İYA'larda düz yoldan sapma eğilimi gösterdiğini belirtmektedir. Sökülüp takılabilir yapıda kurgulanan kabuk bağlantıları sayesinde İYA'ya modüler bir yapı kazandırılmış, denemeler esnasında kolay taşınabilirlik özelliği katmıştır. Idris vd. (2016) geliştirdikleri İYA'da kolay montaj ve demontaj özelliğinin taşınabilirlik ve bakım kolaylığına katkı sağladığını belirtmektedir.

İYA içerisinde bulunan donanımlar ve elektronik bağlantılar olası su girişi durumundan en az etkilenmeleri için belirli bir yüksekliğe ve bir muhafaza içerisine yerleştirilmiştir. Buna ek olarak İYA'nın en dip noktasına su seviyesi ölçüm sensörü yerleştirilmiş ve herhangi bir su birikmesi söz konusu olduğunda su uyarısını kontrol paneline göndermektedir. Su seviye sensörü bir sünger içerisine yerleştirilmiş ve İYA

içerisinde olası su birikmelerinde hareketten dolayı elektronik donanımların etkilenmesi ihtimali en aza indirilmiştir. Özellikle, aracın en dip noktasına yerleştirilen ve olası su birikintilerini kontrol paneline bildiren su seviyesi ölçüm sensörü, diğer birçok İYA çalışmasından ayırt edici ve yenilikçi bir güvenlik özelliğidir.

Elektronik donanımların korunması konusunda hassas bileşenler, ek yük getirmemek için doğrudan ayrı bir muhafaza içerisine alınmayıp, bunun yerine kabuğun tabanından yüksek bir yere konumlandırılmış ve aracın ana gövdesi muhafaza olarak kullanılmıştır. Bu sayede iki veya daha fazla muhafaza yükü yerine tek muhafaza içerisinde donanımların güvenliği sağlanmıştır. Geliştirilen bu tasarım İYA'nın deney aşamalarında test edilmiş ve başarı ile çalışmıştır. Deneylerde az miktarda su girişi olduğu gözlemlenmiş ve herhangi bir donanıma zarar vermemiştir. Balbuena vd. (2017) ile Chang vd. (2021), minimum IP65 derecesine sahip su geçirmez muhafazaların kullanıldığı ya da su geçirmez konektörlerle donatılmış plastik kutuların tercih edildiği, ikincil koruma katmanı içeren yapıları kullanmışlardır; bu durum, kullanılan yöntemin bu yapılardan farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, ALANIS (Caccia vd. 2009) ismi verilen araçta elektroniklerini IP65 dereceli alüminyum kutular içinde muhafaza ederken, WeMo (Madeo vd. 2020) isimli araçta elektronikler merkezi bir ABS plastik kutu içerisine yerleştirmektedir.

İYA üzerinde iki farklı GPS modülü kullanılmıştır. Bu yapılandırma, konum doğruluğu, güvenilirliği ve sistem kararlılığı açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Öncelikle GNSS yedekliliği sayesinde bir modülde sinyal kaybı veya geçici bağlantı sorunları yaşandığında diğer modül devreye girerek kesintisiz konum takibini mümkün kılar. Ayrıca, iki ayrı GPS modülünden alınan veriler karşılaştırılarak konum doğruluğu artırılmış, filtreleme ve hata düzeltme algoritmaları ile kesintisiz veri takibi ve genel sistem kararlılığı açısından anlamlı konum bilgisi elde edilmiştir. Bu durum özellikle hareketli sistemlerde navigasyon hatalarının azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır. Ayrıca iki GPS modülünün kullanılması pusula sistemine de destek sağlamaktadır. Bu çoklu GNSS yapısı sistemin çevresel koşullara karşı dayanıklılığını ve veri güvenilirliğini artırarak, saha koşullarında daha kararlı bir performans elde edilmesine katkı sağlamıştır. Bu yaklaşım geliştirilen sistemin konumlandırma konusunda birçok tek GPS kullanılarak geliştirilen çalışmalardan farklılığını göstermektedir. Kaizu vd (2011) yaptığı çalışmada iki GPS alıcısını hem konum hem pusula amaçlı kullanılmıştır. GPS antenlerini aracın farklı noktalarına yerleştirilen bu sistemde iki koordinat arasındaki açısal değer yön açısı belirlemek için kullanılmıştır.

İYA gerçek zamanlı ve kararlı bir şekilde çalışan bir yapıya sahiptir. Bu yapı, temel olarak çoklu iş parçacığı mekanizması üzerine kurulmuştur. Python programlama dili kullanılarak geliştirilen bu sistemde, farklı işlemler birbirinden bağımsız iş parçacıkları aracılığıyla eş zamanlı olarak yürür. Örneğin; uzaktan kumanda, Zigbee modülü, SignalR bağlantısı, PID kontrol algoritması ve LiDAR gibi bileşenlerin her biri ayrı bir iş parçacığı içinde çalışır ve kendi verisini düzenli olarak üretir ya da tüketir. Bu yaklaşım sistemin farklı kaynaklardan gelen verileri aynı anda işleyebilmesini sağlar. İş parçacıkları sürekli olarak kendi veri akışlarını izler ve gerektiğinde merkezi değişkenleri günceller. Örneğin; otonom sürüşte PID algoritması motor hızlarını belirlerken, uzaktan kumandadan gönderilen bir veri araya girip yeni hız verisini belirleyebilmektedir. Her bir iş parçacığı kendi görevine odaklandığı için, sistem yüksek performans ve düşük gecikme ile çalışır. Bu yapı donanım tabanlı kesmelerin yerini yazılım düzeyinde olayların

yönetimiyle doldurur. Çoklu iş parçacıklı bu mimari sayesinde tekne hem manuel kontrol modunda hem de otonom modda esnek bir şekilde hareket edebilmektedir. İş parçacıkları arası senkronizasyon ve veri paylaşımı ayrıntılı şekilde yönetilerek, çakışmalar önlenmekte ve görevler öncelik sırasına göre işlenebilmektedir. Bu da teknenin çevresel değişimlere hızlı tepki vermesini ve görevlerini güvenli bir şekilde yerine getirmesini sağlar. Villa vd. (2020) yaptığı çalışmada ROS işletim sistemi kullanan modüler bir mimariye sahip sistemde de engel tespiti, rota takibi, kontrol gibi işlemler eş zamanlı ve bağımsız şekilde her biri ayrı iş parçacığı şeklinde çalışacak biçimde tasarlanmıştır. Bu modüler ve iş parçacığı yaklaşımı Python tabanlı hazırlanan program ile geliştirilen sistemde uygulanmıştır.

Geliştirilen İYA'da kullanıcılara hem kapsamlı bir web sitesi arayüzü (kontrol paneli) hem de manuel kumanda seçeneği kullanılmıştır. Web sitesi arayüzü, uzaktan izleme, veri görselleştirme ve görev planlama için zengin bir platform yapısı sağlarken, manuel kumanda, acil durumlar veya hassas manevralar için doğrudan kontrol imkânı sunar. Bu çift katmanlı yaklaşım kullanıcının ihtiyacına göre esneklik sağlayarak operasyon kolaylığını ve erişilebilirliği maksimize eder. Literatürde birçok çalışmada sisteme uygun tasarımlar yerine mevcut var olan sistemleri, OneNET (Xing vd. 2020), Google (Melo vd. 2019), LabView (Shou vd. 2017), özelleştirilerek kullanımlar gözlemlenmiştir. Ayrıca geliştirilen sistemde veri iletimi için ZigBee ve 4G olmak üzere iki farklı iletişim protokolünü kullanmaktadır. ZigBee düşük güç tüketimiyle kısa menzilli ve yoğun sensör ağı iletişimi için idealken, 4G uzun mesafeli, geniş bant genişliğine sahip veri transferi için güçlü bir altyapı sunar. Bu kombinasyon, Wi-Fi (Balbuena vd. 2017) veya Bluetooth (Chang vd. 2021) gibi sınırlı menzilli çözümlerle karşılaştırıldığında, sistemin hem yerel hem de uzaktan kesintisiz ve güvenilir veri aktarımı yapabildiğini sağlayarak üstün iletişim esnekliği ve menzil sunmaktadır.

4.2 Kumanda Kontrollü Çalışmalar

Geliştirilen İYA ve su parametreleri ölçüm sistemi hem otonom hem de manuel kumanda kontrollü çalışabilmektedir. Otonom modda gerçekleştirilecek görevlerden önce, hız, yönelim, sapma ve engellerden kaçınma gibi kritik performans parametrelerinin değerlendirilmesi manuel kontrol modunda yapılmıştır. Bu kapsamda İYA'nın kontrolü için geliştirilen fiziksel (Şekil 3.20) ve web tabanlı (Şekil 3.31) iki farklı kumanda sistemi kullanılmıştır. Her iki kumanda arayüzünün yönlendirme ve kontrol kabiliyetleri, kontrollü deney koşulları altında havuz ortamında test edilmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Havuzda yapılan kumanda kontrollü deney

Fiziksel olarak geliştirilen kumanda (Şekil 3.20) İYA'nın sağ ve sol motorlarını kontrol etmektedir. Motor hızlarının kontrolü için joystick ve potansiyometre bulunmaktadır. Potansiyometre motor hızlarında daha hassas ayar yapabilmek için, joystick ise hızlı yönlendirme yapabilmek için kullanılmaktadır. Web uygulaması (Şekil 3.31) olarak geliştirilen kumanda motor hızlarına ek olarak su parametresi izleme sisteminde bulunan pompa, sensör ve numune sistemini de kontrol edebilme ve İYA hakkında anlık olarak hız, yön, konum, işlem bilgisini yansıtmaktadır.

Deneylerde kumandadan gönderilen hız değerlerinin İYA'nın hareketine etkileri gözlemlenmiş ve motorların yük ve hız kalibrasyonları gerçekleştirilmiştir. İYA'nın hareketi için 7-20 arasında sayılar ile hız değerleri belirlenmiştir. Bu değerler gerçek hayattaki hız değeri değil yazılımsal olarak algoritmada kullanılan değerlerdir. 10 hız değeri motorları durdurmakta, sırasıyla 9,8,7 değerleri İYA'yı geriye doğru hızlandırmakta, 11,12...19,20 hız değerleri de İYA'yı ileriye doğru hızlandırmaktadır. Bu hız değerlerinin her biri motorlara farklı PWM sinyali olarak gönderilmektedir. Bu hız değeri skalası aynı zamanda İYA'nın mevcut noktadan çıkış, hedef noktaya yaklaşma aşamalarında ve numune alımı esnasında PID algoritmasından gelen veriler doğrultusunda hızlı/yavaş konum değişikliklerini sağlaması için oluşturulmuştur. İYA üzerinde bulunan pusula ve GPS modüllerinden gelen veriler ile kalibrasyon işlemleri yapılmıştır. Wang vd. (2023), iki motora aynı DC besleme uygularken, her motora özgü PWM ayarlaması yaparak çıkış gerilimini eşitlemeye yönelik bir algoritma geliştirmiştir. Algoritmada PWM'leri eşitlemek için inverter periyot dağılımı optimize edilirken, geliştirilen sistemde uygulanan yöntem hız değerleri ve PWN arasında kalibrasyon gerçekleştirilmesi şeklindedir. Kalibrasyon öncesi ve kalibrasyon sonrası motor sapma değerleri ve mesafe verileri Çizelge 4.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Motor dönüş kalibrasyon işlemi öncesi ve sonrası elde edilen değerler

	Sol-Sağ Hız Değerleri	Mesafe	Sapma
Kalibrasyon Öncesi	11-11	0,5 m/sn	2%
	18-18	1,3 m/sn	8%
Kalibrasyon Sonrası	11-11	0,4 m/sn	0,9%
	18-18	1,2 m/sn	1,2%

Kalibrasyon işlemi sonrası web uygulaması olarak geliştirilen kumanda da deneyde kullanılmıştır. Web tabanlı kumanda saniyede bir İYA'ya veri paketi göndermektedir. Gönderilen veri paketi bir dizi halinde gitmekte ve içerisinde motor hız bilgileri, pompa başlatma-durdurma bilgileri ve sensör aktif/pasif kontrol verileri bulunmaktadır. Havuzda yapılan deneylerde web tabanlı kumandanın tüm özellikleri tek tek denenmiş ve verimli bir şekilde çalıştırılmıştır.

Kumanda kontrollü çalışmalarda fiziksel kumanda 3km ve daha kısa mesafelerde özellikle tekneyi kıyıya yanaştırma aşamalarında kullanılması için tasarlanmıştır. Web tabanlı kumanda da herhangi bir sınırlama olmadan GSM servis sağlayıcının hizmet alanı kapsamında her noktadan kontrol, yönlendirme ve izleme gerçekleştirilebilmektedir. Dsouza vd. (2021) yaptıkları çalışmada teknenin hareket kontrolü için kumanda olarak akıllı telefon kullanmış araç ile arasındaki iletişim Bluetooth ile sağlanmaktadır. Bu

yaklaşım kapsam alanı açısından geliştirilen sistemde kullanılan Zigbee ve GSM modülüne göre sınırlı kalmaktadır.

Geliştirilen sistemde web tabanlı kumandada haberleşme için kullanılan SignalR teknolojisi ile her 1 saniyede İYA'dan kontrol ünitesine bilgi gönderilmektedir. Bu bekleme süresi sistemin stabil işlemesi için özellikle belirlenmiştir. Bu şekilde veri alışverişinde yaşanabilecek karmaşanın önüne geçilmiştir. Bu aşamada gönderilen verinin boyutunun ham veri dahil yaklaşık 150 bayt boyutunda olması ağ bant genişliğini belirli ölçüde attırmaktadır. Bu düzenli mesaj akışı, paket varış zamanlarında değişkenlik meydana getirerek gerçek zamanlı verilerin tutarlılığını bozma olasılığını arttırmaktadır. Sunucu ve istemci tarafında da her bağlantı için anlık mesajın işlenmesi CPU ve bellek kullanımını artırır. Daha kritik gerçek zamanlı uygulamalar için saniyelik güncellemeler bazen yeterli tepki süresi sunmayabilir, daha hızlı işlem gerektiren senaryolarda kontrol gecikmesine yol açabilir. Zhang vd (2017) bu gibi durumlar için veri paketinin küçültülmesi, kullanılan donanımların daha güçlü belirlenmesi gibi ihtiyaçları belirtmektedir.

Kumanda ile yapılan deneylerde kullanılan LiDAR testleri de yapılmıştır. LiDAR yazılımsal olarak sadece otonom sürüşte devreye girecek şekilde ayarlanmıştır. Ancak deney aşaması kumandalı sistemde de uygulanmıştır. Bu aşamada İYA'nın ön tarafına bir engel konulmuş ve ön taraftaki yoğunluğun arttığı tespit edilmiş ayrıca hızını kestiğini gözlemlenmiştir. Bu süre bazı durumlarda yeterli olmadığı için ön taraftaki mesafenin 1 metreden az olması durumlarında motorlar tersine dönmesi sağlanmıştır. Sağ ön, sağ arka, sol ön ve sol arka taraflarda engel yoğunluğu tespit edildiğinde de engel yoğunluğunun tersinde bulunan motor hızlarının azaltılarak engelden kaçınıldığı gözlemlenmiştir. Bu deneyler havuz ortamında 10 farklı senaryoda yapılmış ve senaryoların 6 tanesinden engele çarpmadan İYA yoluna devam edebilirken, 4 tanesinde engele çarpmıştır. Yapılan deneylerde %60 lık bir başarı elde edilmiş olup engelin büyüklüğü, LiDAR'ın İYA üzerindeki konumlandırmasından kaynaklı sınırlılıklar gözlemlenmiştir. Ancak otonom sistem deneylerinin yapıldığı çalışma alanının fiziksel özellikleri, su kenarında bulunan ve İYA'nın yüksekliğinden daha yüksek duvarlar İYA tarafından engel olarak tespit edilmiş ve herhangi bir çarpma veya kaza yaşanmamıştır. Özellikle Plan 4 de bulunan Nokta 1, Nokta 7 ve Nokta 8 koordinatlarında kıyıya yakın olan engeller tespit edilmiş ve engellerden kaçınılmıştır. Leong vd. (2024) LiDAR'ın engel algılama çalışmalarında tek başına kullanımı yerine, kamera, radar kombinasyonlarıyla oluşturulacak sensör füzyon yapısının engel tespitinde başarıyı arttırdığını belirtilmektedir.

Su parametre izleme sistemi üzerinde yapılan deneylerde ise parametre değerleri başarı ile okunmuştur. Parametre değerleri okunurken bazı okuma aşamalarında anlamsız veriler olduğu gözlemlenmiştir. Bu işlem yanlış okumaya sebep olacağından her bir parametre değerinden 100ms lik aralıklar ile 50 anlamlı değer okunana kadar okuma yapılmış ve bu değerlerin ortalaması alınmıştır. Kawahito ve Seo (2016) sensör değerlerinde anlamlı verilerin elde edilmesi için ortalama yöntemini önermektedir. Bu yöntem sayesinde 5 parametre değeri yaklaşık 25sn de okunabilmektedir. Bu aşamada farklı süre ve adette okuma denenmiş, fazla değerlerin zaman kaybına, az değerlerin ise veri kaybına neden olduğu gözlemlenmiştir. Su parametresi izleme sisteminde yer alan numune alım sisteminde 4 adet 200ml'lik numune kapları kullanılmıştır. Bu kapların tamamının doldurulması İYA hareketinden kaynaklı olası taşmalara sebep olabilmektedir. Bu nedenle dolm miktarı 80-100ml arası olarak ayarlanmış ve peristaltik pompanın 20

saniyelik çalışması bu miktarın toplanması için yeterli olduğu belirlenmiştir. Chang vd. (2021) geliştirdikleri insansız yüzey aracında iki adet 60ml hacminde numune kabı, Arko vd. (2020) ise bir adet 100ml hacimli numune kabı kullanılmıştır. Geliştirilen sistem toplanan numune miktarı ve numune adedi açısından diğer çalışmalara göre ayırt edici özelliktedir.

Kumanda ile gerçekleştirilen çalışmalarda, İYA'nın çevrimiçi harita üzerindeki konumu ile kontrol ünitesi arasındaki haberleşme hızı test edilmiştir. Bu kapsamda, İYA'dan gelen veriler hem RESTful API hem de SignalR teknolojisi kullanılarak ayrı ayrı gönderilmiştir. Özellikle pompa durumu, anlık konum ve sensör kontrolleri gibi kritik işlemler, düşük gecikme gerektirdiğinden SignalR aracılığıyla gerçek zamanlı olarak iletilmiştir. Çalışmada “WPR: {'s_do': 1.13, 's_ph': 8.47, 's_ec': 11955.0, 's_orp': 274.1, 's_tp': 18.4, 'depth': 1, 'sample': 1}” şeklindeki 105 karakterli bir veri 130 ms de kontrol merkezine iletilip veri tabanına kaydolduğu gözlemlenmiştir. Bu süre, Bray vd. (2024)'ün çalışmalarında belirtilen hücresel bağlantılar üzerinden ve VPN erişimli kontrollü ağ ile çalışan sistemler için belirtilen 115–270 ms gecikme aralıklarıyla uyumlu bir performansı yansıtmaktadır. Kritik bilgiler bu yöntem ile kontrol merkezine gönderilebilmektedir. Sistemin işleyişi için önem seviyesi daha düşük ve daha uzun bilgilerin kontrol merkezine gönderilmesi API ile olmaktadır. Bu durumda [36,891109,30,730788,173,0,0,0,10,178.240.130.168,31,2025-01-31 15:28:05.890] şeklindeki verinin İYA'dan kontrol merkezine gönderilip veri tabanına kaydolması yaklaşık 3 sn sürmektedir. Geliştirilen sistemin sürekliliği, veri doğruluğu, enerji tasarrufu durumları dikkate alındığında sistemin işleyişinde anlık bilgilendirmeler için SignalR, diğer işlemleri için ise API haberleşme yöntemi kullanılmıştır.

Geliştirilen İYA uzaktan kumanda yapısı açısından literatürdeki bazı yaklaşımlardan farklılık gösterirken, bazı ortak özelliklere de sahiptir. İYA'da yer alan fiziksel kumanda 3 km ve daha kısa mesafelerde, özellikle kıyıya yanaştırma aşamalarında kullanılması, Tyschuk vd. (2023) tarafından geliştirilen ve Wi-Fi teknolojisiyle 1-2 km menzil sınırlarını aşan yakın alan kontrol yeteneği sağlamaktadır. Bununla birlikte İYA'nın web tabanlı kumandası aracılığıyla GSM servis sağlayıcının hizmet alanı kapsamında herhangi bir mesafe sınırlaması olmaksızın kontrol, yönlendirme ve izleme imkânı diğer çalışmalardan öne çıkan farkını oluşturmaktadır.

Zhu vd. (2019) tarafından önerilen ve geleneksel yöntemlere göre kontrol mesafesini önemli ölçüde arttıran 4G tabanlı sistem kullanılmıştır. Kontrol paneli ile araç arasındaki iletişimin 0.089 saniyelik bir gecikme gösterdiği ve gerçek zamanlı uzaktan kontrolü etkilemediğini belirtmektedir. Mobil uygulama olarak tasarlanan kontrol panelinden araç yönlendirilebilmekte ve araç üzerindeki kamera görüntüsü izlenebilmektedir. İYA ile web tabanlı kontrol paneli arasındaki haberleşme benzer iletişim yöntemini ve 1sn'lik bekleme süresi ile gerçekleştirilse de kontrol panelinden yönlendirme, harita üzerinden izleme, yön, hız ve güvenlik bilgilendirmelerinin yapılması, veri tabanına kayıt gibi birçok özellikte birlikte su parametre sistemi kontrolü gibi ek özellikler kapsamlı bir yapı oluşturmakta ve etkili bir kumanda imkânı sağlanmaktadır. İletişimde 1 sn'lik bekleme süresi sistemin işleyişi, verilerin işlenmesi ve kaydedilmesi için gereken bu sürenin daha düşük tutulması tepkime süresinin daha hızlı gerçekleşmesine katkı sağlayacaktır.

4.3 Otonom Modda Çalışmalar

Otonom mod İYA'nın belirtilen koordinatlara, belirtilen görevleri kendi karar mekanizması ile yaptığı moda verilen addır. Manuel modda yapılan çalışmalar sonucunda yapılan, hız ve sapma kalibrasyonları, kontrol ünitesi ile iletişim testlerinden sonrasında İYA'nın otonom modu özellikleri test edilmiştir (Şekil 4.2). Otonom mod testleri için 4 ayrı görev planı hazırlanmıştır. Otonom mod için görev planları iki türlü hazırlanabilmektedir. İlk yöntem gidilecek koordinatların ve yapılacak işlemlerin el ile tek tek seçilerek yapılması (Şekil 3.29), ikincisinde ise gidilecek koordinatların bir alan seçimine göre adet verilerek otomatik olarak belirlenmesi (Şekil 3.28) şeklindedir.



Şekil 4.2. Otonom deney çalışmaları

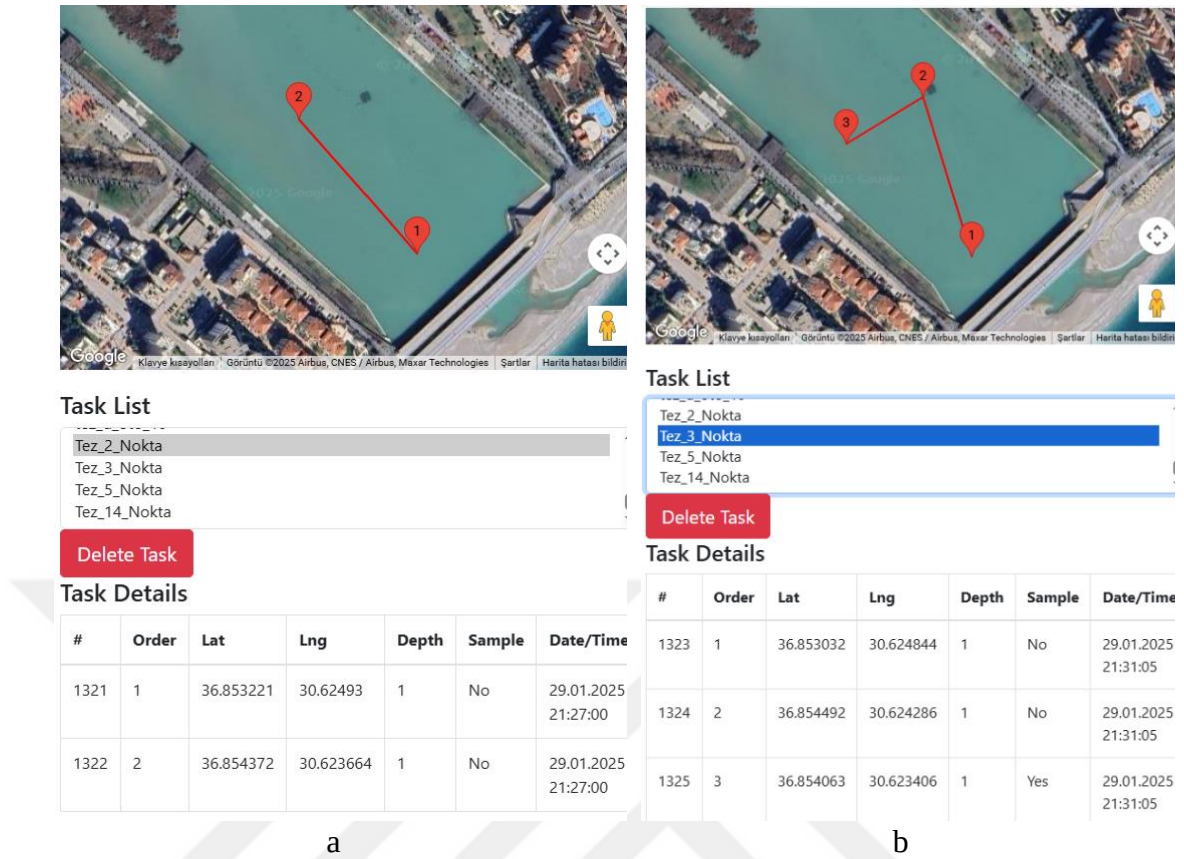
Birinci deneyde görev noktaları harita üzerinden seçilirken, ikinci deneyde kullanıcının seçtiği çokgen alana, yine kullanıcı tarafından belirlenen sayıda örnekleme noktasının homojen ve sistematik biçimde yerleştirilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Bu işlem için ızgara temelli bir algoritma uygulanmış, noktaların yalnızca çokgenin içerisinde kalanları dikkate alınarak belirlenmesi sağlanmıştır. Yöntem, CBS'de sıkça kullanılan ızgara tabanlı örnekleme prensiplerine dayanmaktadır (Theobald vd. 2007). Öncelikle çokgenin koordinatları temel alınarak, alanı çevreleyen minimum dikdörtgen belirlenir ve karşılıklı iki koordinatları elde edilir. Alanın yatay ve dikey uzunlukları hesaplandıktan sonra toplam genişlik ve toplam yükseklik elde edilir. Kullanıcı tarafından belirtilen örnekleme noktası sayısı kadar nokta yoğunluğu eşit tutulacak şekilde noktalar belirlenir ve noktalar arası uzunluklar metreye çevrilir. Çevirme işleminde 1 derece enlem yaklaşık olarak 111 km alınır. Boylam derecesi enleme bağlı olarak değişkenlik gösterdiğinden, dönüşümde ortalama enlem değeri baz alınmıştır. Izgara tabanlı noktalar oluşturulduktan sonra, Google Maps Geometry kütüphanesi kullanılarak noktaların yalnızca çokgenin içerisinde kalan noktalar değerlendirmeye alınmıştır. Sonuçta elde edilen noktalar, rota sürecinde enerji verimliliğini artırmak amacıyla zigzag sıralama yöntemiyle sıralanır. Bu yöntemde bir satır soldan sağa, bir sonraki satır sağdan sola olacak şekilde işlenir. Böylece

İYA'nın gereksiz dönüşler yapması engellenmiş olur. Bu işlem sonucunda istenilen sayıda örnekleme noktası çokgen içerisinde yerleştirilemezse, ızgara mesafe uzunluğu her defasında %1 oranında azaltılarak algoritma tekrar çalıştırılır. Bu yapı noktaların istenilen hassasiyette seçilen alan içerisinde yer almasını sağlamaktadır. Bu aşamada herhangi bir alan içerisinde örneğin 10 nokta seçilince çözünürlüğü daha düşük aynı alanda 40 nokta seçilince çözünürlüğü daha yüksek bir izleme gerçekleştirilebilmesi sağlanmaktadır (Şekil 3.28). Bu özellik ile alansal izlemeye çözünürlük değerleri de kullanıcı tarafından belirlenebilmektedir. Ayrıca oluşturulan noktalardan herhangi bir veya daha fazla nokta istenmeyen bir koordinatı işaret eder ise manuel olarak görev listesinden kaldırılabilir.

Otonom mod için öncelikle iki plan hazırlanmıştır. Plan 1'de iki koordinat harita üzerinden seçilmiş ve bu iki nokta içinde numune alınmama seçeneği belirlenmiştir. Plan2'de ise koordinatlar yine harita üzerinden işaretlenmiş bu defa da numune alınma özelliği sadece 3. nokta işaretlemesi eklenirken belirlenmiştir. Manuel hazırlanan iki plana ait koordinat ve diğer ayrıntılar Çizelge 4.2'de gösterilmektedir. Planlar oluşturulduktan sonra oluşan ekran görüntüleri Plan 1 için Şekil 4.3a'da, Plan 2 için Şekil 4.3b'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.2. Harita üzerinden görev tanımlamaları

Plan	Koordinatlar	Numune Durumu
Plan 1	36.853231 – 30.624930	Alma
	36.854372 – 30.623664	Alma
Plan 2	36.853032 – 30.624844	Alma
	36.854492 – 30.624286	Alma
	36.854063 – 30.623406	Al



Şekil 4.3. Manuel plan a) Plan 1 rotası; b) Plan 2 rotası

Plan 1’de iki koordinat arası mesafe yaklaşık olarak 145 m olup, görev başlangıcından 5 dakika 31 saniye sonra görev tamamlanmıştır. Görevde iki koordinat arası mesafe 2 dakika 30 saniyede tamamlanırken geri kalan 3 dakika 1 saniyelik süre de parametre değerlerinin okunma, sunucuya gönderim ve kayıt süresidir.

Plan 2’de üç koordinat bulunmakta ve toplam yol 261 m olarak hesaplanmıştır. Bu yolu 10 dakika 8 saniyede tamamlamış ve 6 dakika 6 saniyelik kısmı parametre ölçüm ve son görev noktasında numune alım işlemi geri kalan 4 dakika 2 saniyelik süre de İYA’nın yolda geçirdiği süre olarak tespit edilmiştir. Plan 2 kapsamında yapılan son koordinat noktası için su numunesi alımı işlemi de gerçekleştirilmiştir. Su numunesi peristaltik pompanın 20 sn çalıştırılması ile yeterli miktarda toplanmış ve numune kabına aktarılmıştır. Bu işlemten sonra numune kabının son hali Şekil 4.4’te gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Numune kabı ve toplanan su

Manuel koordinat seçimi yapılarak uygulanan çalışmada Plan 1’de 2 noktadan, Plan 2’de ise 3 noktadan, toplamda 5 farklı noktadan su parametre değeri toplanmış, toplanan parametre değerleri veri tabanına kaydedilmiştir (Çizelge 4.3). Plan 1 ve Plan 2 de belirlenen noktalar (koordinatlar) arasındaki kuş uçuşu yol ve İYA’nın izlediği yol Şekil 4.5’te gösterilmektedir.

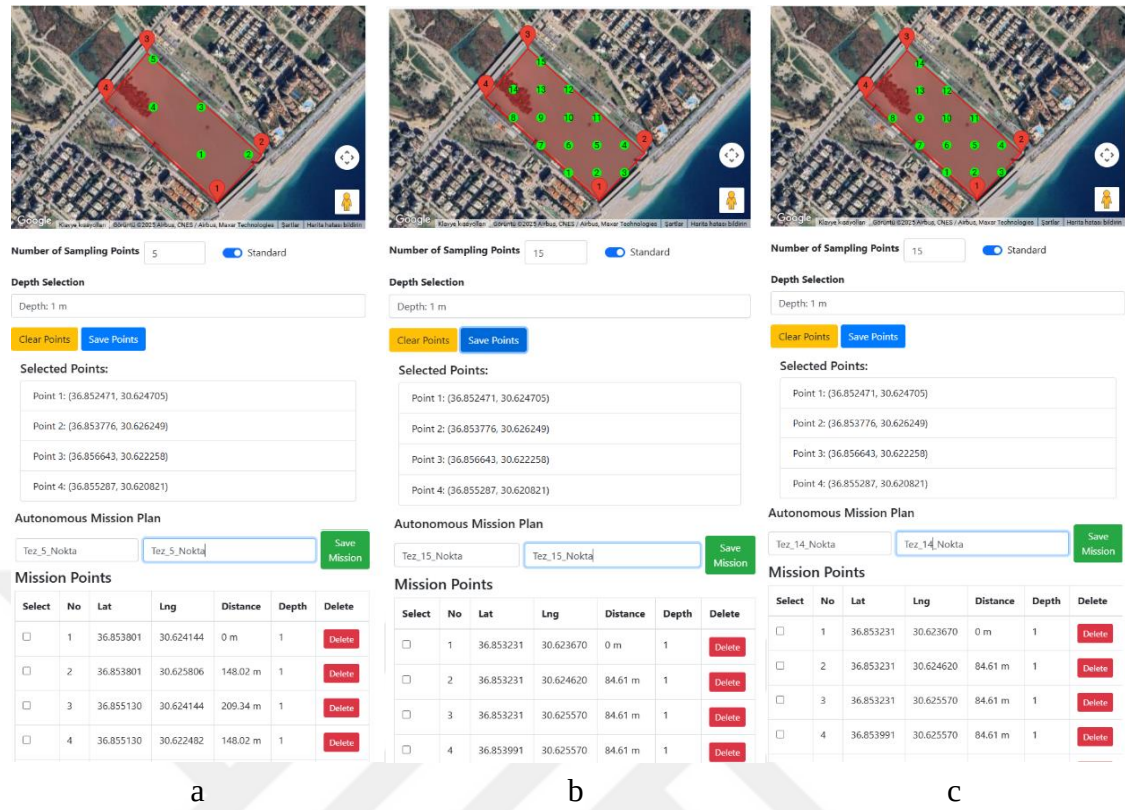
Çizelge 4.3. Manuel koordinat seçimine göre yapılan denemelerde elde edilen su parametre verileri

Planlar	Görev Noktaları	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	pH (pH)	DO (mg/L)	OPR (mV)
Plan 1	1	12530.00	15.50	8.55	5.26	128.80
	2	12519.00	15.50	8.56	5.92	127.10
Plan 2	1	11865.00	15.80	8.63	5.51	122.80
	2	11345.00	15.70	8.83	5.12	126.30
	3	11409.00	15.70	8.63	5.52	129.40



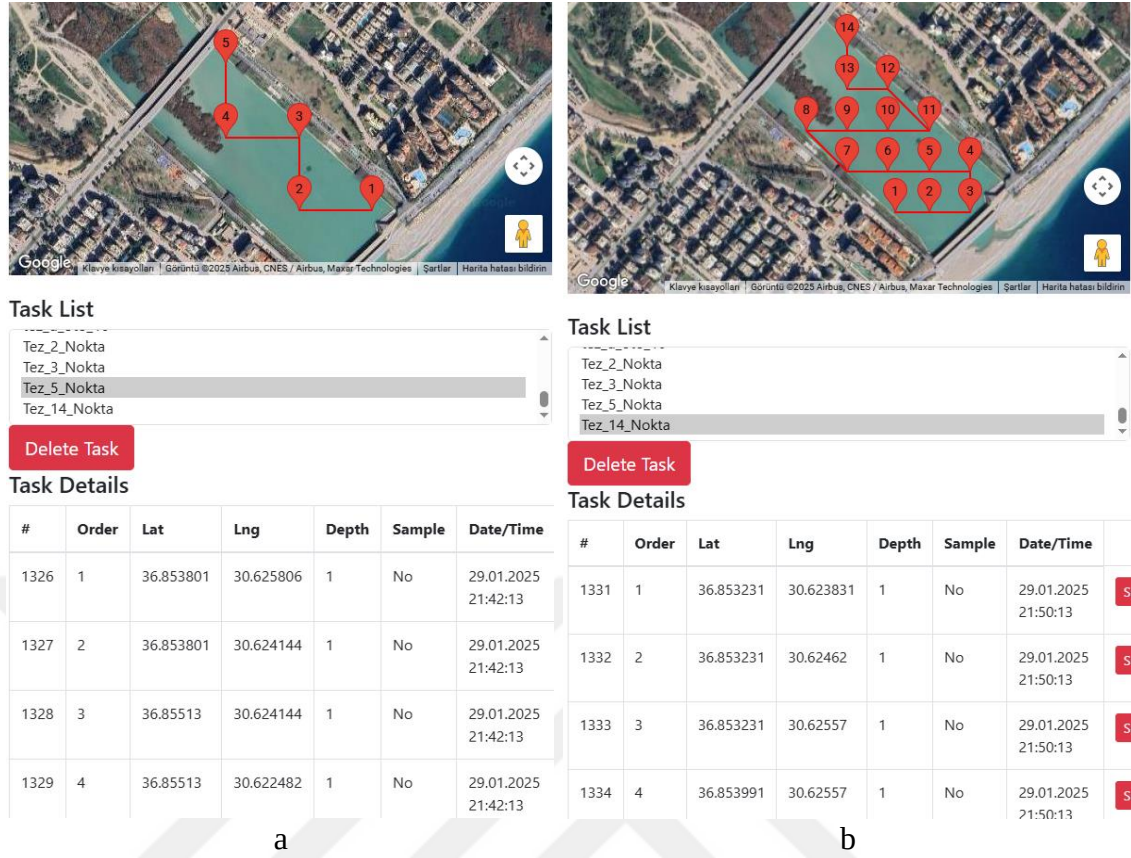
Şekil 4.5. Manuel koordinat seçimine göre yapılan denemelerde kuş uçuşu yolu (mavi) ve İYA hareket yolu (kırmızı) **a)** Plan1 rotası; **b)** Plan2 rotası

Otonom mod denemeleri için hazırlanan bir başka planda da koordinatlar belirli bir alan içerisinde koordinatların otomatik olarak belirlenmesiyle oluşturulmuştur. Bu yeni oluşturulan planlar Plan 3 ve Plan 4 olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntemde öncelikle alan seçilmiştir. Alan belirlenirken harita üzerinden 36.852471, 30.624705 — 36.853776, 30.626249 — 36.856643, 30.622258 — 36.855287, 30.620821 koordinat noktaları işaretlenmiş ve yaklaşık 9,38 hektarlık bir alan seçilmiştir. Seçilen alan kapsamında Plan 3 için 5 (Şekil 4.6a), Plan 4 için 15 (Şekil 4.6b) nokta sayısı verilmiş ve buna göre görev noktaları belirlenmiştir. Noktaların belirlenme aşamasında 15 nokta atanırken 14 numaralı nokta sazlık bir alana gelmiş ve bu nokta görev listesinden kaldırılmıştır (Şekil 4.6c).



Şekil 4.6. Alansal seçim ile görev noktası belirleme; **a)** 5 noktalı görev; **b)** 15 noktalı görev; **c)** 14 noktalı görev

Görev noktaları belirleme işlemi sırasında görev noktalarından su numunesi alınmaması seçeneği işaretlenmiş ve veri tabanına kayıt işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada görev noktalarına verilen numaralar aynı zamanda öncelik sırasını da belirtmektedir. Bu nedenle plan veri tabanına kaydedilirken İYA'nın izleyeceği rota da oluşmaktadır. Plan 3 (Şekil 4.7a) ve Plan 4 (Şekil 4.7b) ait rotalar kontrol panelinden görülebilmektedir.



Şekil 4.7. Görev planı rotaları a) Plan 3 rotası; b) Plan 4 rotası

Plan 3, 5 adet koordinat bulunmakta ve toplam mesafe 591.53 metredir. Planda tanımlanan görevler başlangıçtan bitime kadar 20 dakika 31 saniye sürmüştür ve bu sürenin 11 dakika 25 saniyelik kısmı su parametre değerleri ölçüm süresini, 9 dakika 6 saniyelik kısmı da yolda geçen zamanı göstermektedir.

Plan 4, 14 adet koordinattan veri alınması planlanmıştır ve toplam mesafe 1170.1 metre olarak hesaplanmıştır. 14 noktadan okunan su parametreleri için 23 dakika 9 saniye, noktalar arası yol için ise 18 dakika 58 saniyelik bir süre izlenmiştir toplamda görev süresi 42 dakika 7 saniye olarak gözlemlenmiştir.

Grid yöntemi koordinat seçimine göre yapılan denemelerde koordinatlar arası kuş uçuşu yol ve İYA'nın izlediği yollar kontrol ünitesi üzerinden gözlemlenmiştir Plan 3 (Şekil 4.8a) ve Plan 4 (Şekil 4.8b) işlem sonucu ortaya çıkan görüntüler Şekil 4.8'de gösterilmektedir. Su parametresi ölçüm noktalarından elde edilen parametre değerleri daha önceden veri tabanına kaydedilen satırlar her okuma sonrasında güncellenerek ilgili satırlara eklenmiştir. Kontrol panelinden Plan 3 ve Plan 4 için indirilen veriler Çizelge 4.4'te gösterilmektedir.

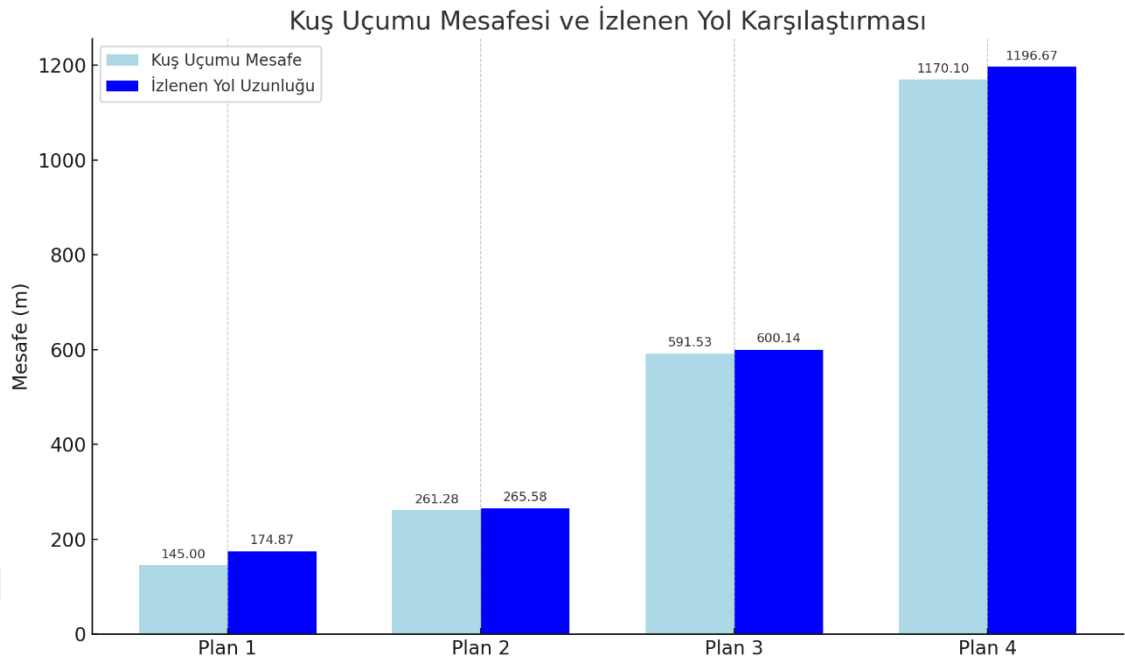


Şekil 4.8. Grid yöntemi koordinat seçimine göre yapılan denemelerde kuş uçuşu yol (mavi) ve İYA hareket yolu (kırmızı) **a)** Plan 3 rota; **b)** Plan 4 rota

Çizelge 4.4. Plan 3 ve Plan 4 görev noktalarına göre okunan su parametre verileri

Planlar	Görev Noktaları	EC ($\mu\text{S/cm}$)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	pH (pH)	DO (mg/L)	OPR (mV)
Plan 3	1	11842.00	15.60	8.38	4.96	140.30
	2	11971.70	15.80	8.37	5.34	136.00
	3	11740.90	15.70	8.32	5.91	128.60
	4	11782.80	15.80	8.45	5.66	130.00
	5	11881.30	15.50	8.38	5.01	138.20
Plan 4	1	11742.00	15.80	8.38	4.96	140.30
	2	11741.70	15.70	8.47	5.24	136.00
	3	11740.90	15.60	8.32	5.11	138.60
	4	11882.80	15.30	8.35	4.86	141.70
	5	11991.30	15.80	8.78	5.11	162.20
	6	11742.00	15.80	8.48	4.76	150.30
	7	11941.70	15.50	8.57	5.12	157.00
	8	11740.90	15.90	8.42	5.06	152.60
	9	11852.80	15.60	8.35	4.86	149.00
	10	11861.30	15.60	8.58	5.01	141.20
	11	11481.30	15.60	8.83	5.01	144.30
	12	11801.30	15.80	8.45	5.01	151.00
	13	11481.30	15.80	8.40	5.01	140.10
	14	11521.30	15.90	8.56	5.01	139.90

İYA'nın otonom olarak hareket ettiği 4 ayrı planda İYA'nın hareket rotası ile kuş uçuşu rota arasındaki farklar gözlemlenmiştir. İYA'nın işaretlenen koordinatlar arasındaki izlediği yol ile kuş uçuşu mesafe arasındaki farklar Şekil 4.9'da gösterilmektedir.



Şekil 4.9. Plan 1-4 için Kuş uçuşu mesafe ve İYA rotası

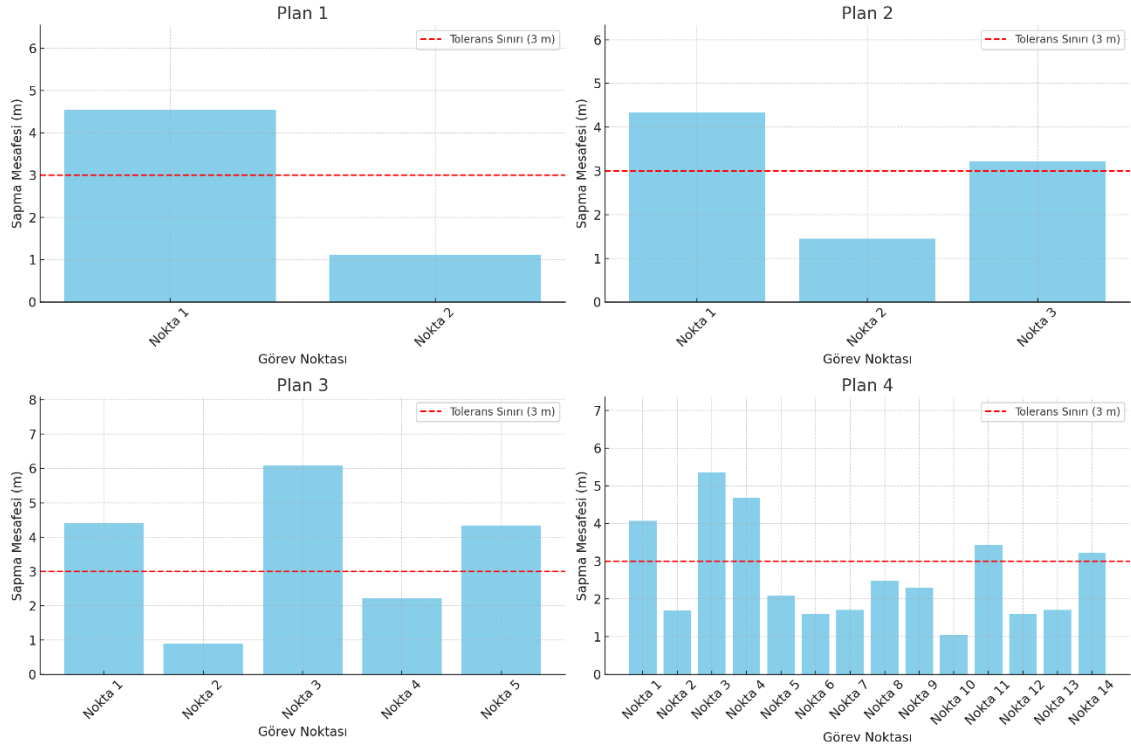
Plan 1'de kuş uçuşu mesafe 145 m iken İYA'nın izlediği yol uzunluğu 174.87 metre olmuştur. Burada yaklaşık %20.6 oranında bir yol uzaması söz konusudur. Bu durum, rotada uygunsuz manevralar nedeniyle hedefe doğrudan gitmekten sapıldığını göstermektedir. Plan 2'de kuş uçuşu mesafe 261.28 m olup izlenen yol 265.58 metredir. Buradaki fark %1.6 olup oldukça küçüktür. Bu, geminin rotayı oldukça verimli takip ettiğini, doğrudan hedefe yakın bir çizgide ilerlediğini göstermektedir. Plan 3'te kuş uçuşu mesafe 591.53 m, izlenen yol ise 600.14 m. Bu planda da fark %1,45 olup çok azdır, dolayısıyla rota izleme hassasiyeti oldukça yüksektir. Plan 4'te ise kuş uçuşu mesafe 1170.1 m, izlenen yol uzunluğu ise 1196.67 m olarak kaydedilmiştir. Buradaki fark %2.27 olup biraz daha artmış olsa da yine de rota genel olarak doğrudan ve verimli bir şekilde takip edilmiştir. Planlar arasında en yüksek sapmanın Plan 1'de olduğu görülmektedir. Bunun muhtemel sebepleri arasında her ne kadar rota mesafesi kısa olsa da mevcut koordinattan bir sonraki koordinata olan mesafenin uzun olması yapılan manevraların etkisinin daha belirgin olması, çevresel etkenler kaynaklı yön düzeltme ihtiyacıdır. Diğer planlarda ise, rota sapmaları oldukça düşük seviyede kalmıştır. Bu durum, sistemin genel olarak hedeflere doğrudan ilerleme konusunda başarılı olduğunu ve güzergâh optimizasyonunun iyi yapıldığını göstermektedir.

İYA planlarda belirtilen koordinat noktaları arasında ilerlerken PID algoritmasına göre ilerlemektedir. Algoritmada mevcut konum verisi GPS den gelirken ve hedef konum tanımlanan görevlerden gelmektedir. Mevcut konum ile hedef konum arasındaki mesafe arttıkça izlenen yolda sapma oranının arttığı gözlenmiştir. PID kontrolörün belirlediği yön daha sabit bir açıya karşılık geldiğinden, sabit yön doğrultusunda küçük sapmalar sistem tarafından kayda değer bir fark olarak nitelendirilmemektedir. Bunun nedeni PID algoritmasının hata sinyaline verdiği tepkinin hedefe olan mesafeye bağlı olarak zayıflamasıdır. Yani sistem, Sun vd. (2025) belirttiği gibi hedef uzakta olduğunda küçük sapmaları düzeltmekte geç kalmakta, bu durum da İYA'da yoldan sapmalara sebep

olmaktadır. Hedefe ilerlerken sanki eğik bir çizgi veya salınımlı bir yol gibi hareket etmektedir. Diğer taraftan hedef yakın olduğunda küçük yön sapmaları bile hedefe belirgin sapma olarak yansımakta, PID bu hatayı daha büyük ve acil bir hata olarak algılamakta, bu da daha hızlı ve net düzeltmeler yapılmasını sağlamaktadır.

Zhang vd. (2024) yaptıkları çalışmada, gemi hareket kontrolü için kullanılan "aşırı kısa vadeli tahminin" yüksek doğruluk ve güncelleme sıklığı gerektirdiğini belirtmektedir. PID gibi kontrol algoritmalarının, ortam koşulları büyük ölçüde sabit varsayıldığında, küçük hataları anlık ve hassas bir şekilde düzeltme yeteneğini göstermektedir. Buna karşılık, gemi hareket modellerinin daha uzun mesafeler veya süreler boyunca daha doğru hareket modelleri gerektirdiği durumlarda, daha karmaşık ve zamanla değişen koşullar altında, PID gibi bir algoritmanın, "biriken hatalar" veya "aşırı düzeltmeler" nedeniyle geminin hedeften sapmasını arttırdığını belirtmektedir. Benzer bir durum geliştirilen İYA'da da karşılaşılmıştır. Sadece PID algoritması kullanılması uzun mesafelerde kısa mesafelere göre daha fazla hata oranı ortaya çıkarmıştır.

İYA'ya her planda farklı aralıklarla görev noktaları tanımlanmıştır. Görev noktasına 3 metre yaklaştığında kabul görececek şekilde ayarlanmıştır ki bu durum Federal Havacılık İdaresi GPS Performans Analiz Raporunda (U.S. Ocean Acidification Interagency Working Group 2014), standart bir GPS cihazının doğruluğu %95 güvenilirlikle 3 m içindedir şeklinde belirtilmektedir. Ayrıca bu veri İYA'nın boyutları, GPS'in hassasiyeti ve çevresel etkiler dikkate alınarak belirlenmiştir. 4 farklı plan için İYA'nın su parametresi ölçüm noktaları ve planda belirtilen koordinatlar arasındaki ilişki Şekil 4.10'da gösterilmektedir.



Şekil 4.10. 4 farklı planda hedef koordinata (noktalara) erişim mesafeleri grafiği

Her plan kapsamında hedeflenen görev noktası ile İYA'nın okuma ve örnek alımı yaptığı nokta arasındaki mesafe farkları ölçülmüş ve 3 metre tolerans sınırı belirlenerek değerlendirme yapılmıştır. Plan 1'de iki görev noktası için ölçüm yapılmıştır. Nokta 1'de sapma 4.55 m ile tolerans sınırının üzerinde gerçekleşirken, Nokta 2'de sapma 1.11 m ile toleransın altında kalmıştır. Plan 2'de üç görev noktası değerlendirilmiştir. Nokta 1'de 4.34 m ile tolerans aşılrken, Nokta 2'de 1,45 m ve Nokta 3'de de 3.22 m sınırdan veya sınırın hemen altında kalmıştır. Özellikle Nokta 3'te sapmanın toleransın biraz üstünde olması, manevra hassasiyeti gerekliliğini göstermektedir. Plan 3, daha fazla görev noktası içermekte olup beş noktadan oluşmaktadır. Bu planda Nokta 1, 3 ve 5 gibi bazı noktalarda ciddi sapmalar gözlemlenmiştir. Bununla birlikte Nokta 2 ve 4 gibi noktalarda sapmalar 2–3 m aralığında kalarak daha kontrollü bir hareket sağlanmıştır. Plan 4, en fazla görev noktasını kapsayan plan olup 14 farklı noktaya ait sapmalar analiz edilmiştir. Plan 4'te genel olarak sapmaların çoğunun 3 metre tolerans sınırının altında kaldığı görülmektedir. Ancak bazı noktalarda (Nokta 1, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 11 ve Nokta 14) toleransın aşıldığı dikkat çekmektedir.

24 görev noktasından 16 görev noktası (%66.6) 3 metre tolerans sınırı içerisinde kalmış, 8 görev noktası (%33.4) ise 3 metre toleransını aşmıştır. Bu dağılım, genel anlamda sistemin hedeflerine yüksek doğrulukla ulaştığını göstermektedir. Ancak, özellikle bazı görev noktalarında sapmaların anlamlı düzeyde arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum benzer şekilde rota tabinde yaşanan PID kaynaklı gecikmelerden (Jiang vd. 2025) ortaya çıkmaktadır. Görev noktalarına ulaşımında düşük sapmalar çoğunlukta olmakla birlikte, çevresel faktörlerin (Lobo F. 2019) veya GPS hata payının (Zhu vd. 2023) devreye girdiği durumlarda sapma artmıştır. Bu sonuçlar, sistemin genel doğruluk açısından başarılı olduğunu ancak yüksek hassasiyet gereken uygulamalarda ek önlemler alınması gerektiğini göstermektedir. Sapmaların azaltılması için; daha hassas GPS sistemleri, çevresel faktörlerin etkilerinin değerlendirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, Jiang vd. (2025)'de yaptıkları yüksek hassasiyetli GNSS navigasyonu kullanılarak geliştirdikleri sistemde hata oranını %50 oranında azaldığı, bununla birlikte navigasyon performansının iyileştirildiği belirtilmektedir.

Kaizu vd. (2011) su kalitesi haritalaması için geliştirilen insansız hava botu, otomatik navigasyon kabiliyetine sahip olup ve önceden tanımlanmış örneklem noktalarına giderek çalışma yapılmıştır. Deneylerde, sazlık alanda, tekne belirlenen 130 hedef noktaya 40 metrelik bir ızgara aralığıyla başarılı bir şekilde ulaştığı belirtilmekle birlikte herhangi bir net bir başarı oranı verilmemiştir. Çalışmanın 231 dakika sürdüğü, 144 dakikasının hareket kalan 87 dakikalık yolun ise ölçüm süresi olduğu kaydedilmiştir. Toplamda 5760m seyir mesafesini, iki adet dört zamanlı benzinli motor ile maksimum hızının 1.2 m/s değerlerine ulaşabildiği belirtilmektedir. Geliştirilen İYA çevre dostu batarya teknolojisi ile benzinli motor ile ulaşılan hızlara yakın bir hız değerine ulaşabilmektedir. Ayrıca kullanılan batarya ile yaklaşık 2300 m yol kat etmiş ve %60 doluluk oranı halen batarya da gözlemlenmiştir. Ancak İYA sazlık alanlar için uygun bir tasarıma sahip değildir.

Geliştirilen İYA'nın boyut ve ağırlık özellikleri göz önünde bulundurulduğunda, kullanılan motor ve pervane yapısı ile sistemin ortalama 1 m/s hızla ilerlemiştir. Çalışma kapsamında toplanan veriler, yalnızca hız değil, aynı zamanda hedef koordinat ile ulaşım noktası arasında oluşan sapmaların da analiz edilmesini sağlamıştır. Bu tür konumsal sapma verileri, su kalitesi izleme amacıyla geliştirilen otonom insansız yüzey araçları

literatüründe yeterince ele alınmamış olup, bu çalışmada yapılan ayrıntılı değerlendirmeler, araştırmaya özgünlük kazandırmakta ve benzer sistemlerin optimizasyonuna yönelik gelecek çalışmalara önemli katkılar sunmaktadır.

4.4 Su Parametresi Verileri ve CBS Kullanılarak Değerlendirilmesi

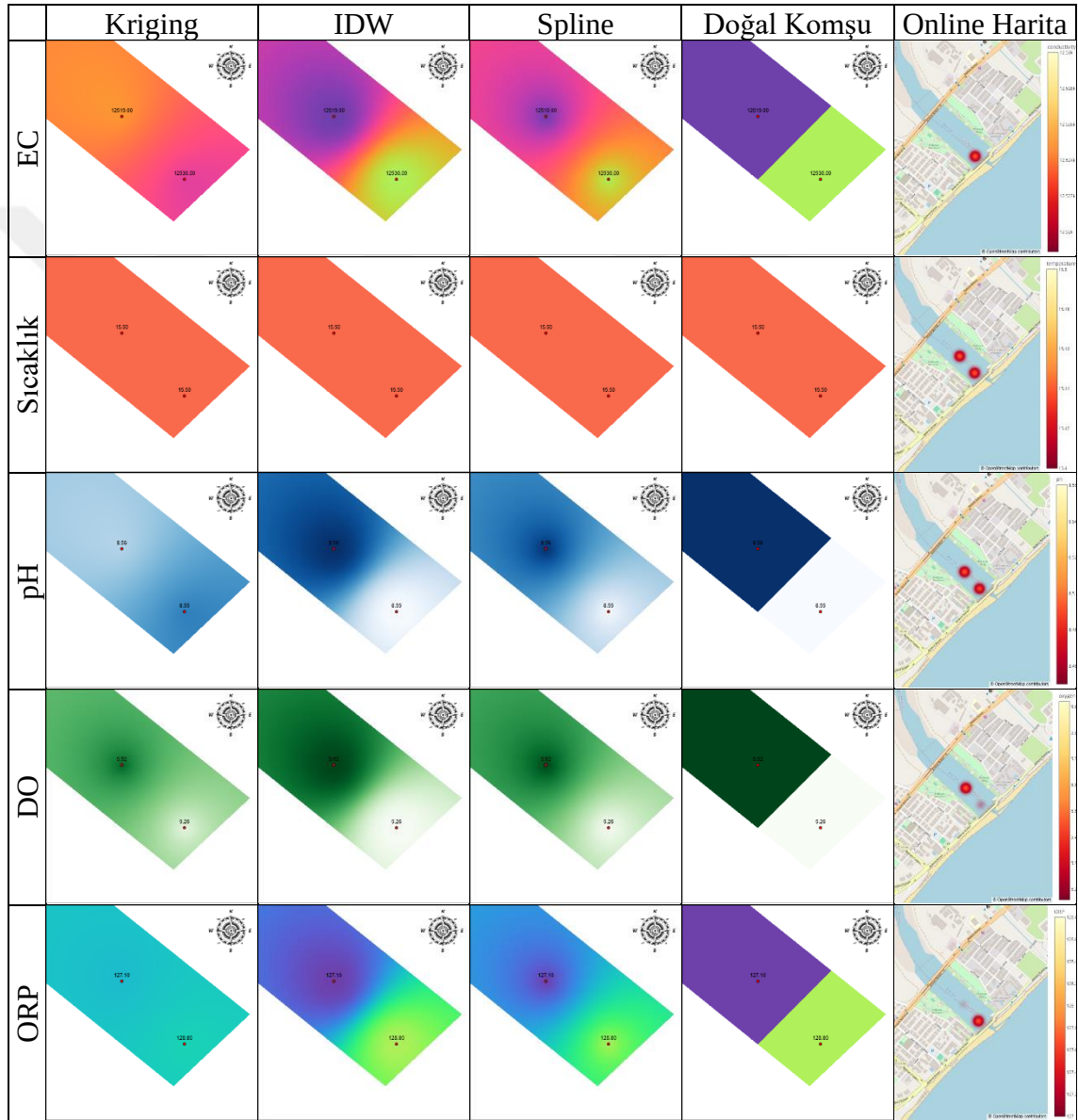
Çalışmada, yaklaşık 10 ha bir alanda aynı gün içerisinde dört farklı örnekleme planına göre su kalitesi verileri toplanmıştır (Çizelge 4.3 ; Çizelge 4.4). Plan 1, 2, 3 ve 4 sırasıyla 2, 3, 5 ve 14 farklı noktadan örnek alınarak giderek artan mekânsal yoğunlukla gerçekleştirilmiştir. Genel olarak tüm planlarda sıcaklık değerleri oldukça sabit kalmış (15.5–15.9 °C), bu da gün içi çevresel koşulların homojenliğini göstermektedir. EC değerleri Plan 1'de en yüksek ortalama sahipken, sonraki planlarda nispeten daha düşük ama istikrarlı değerler gözlemlenmiştir. Bu durum, alanda yer yer çözünmüş iyon farklılıklarının bulunduğunu, ancak daha fazla nokta ile bu farklılıkların daha dengeli dağıldığını göstermektedir. pH, DO ve ORP parametreleri değerlendirildiğinde, artan örnekleme yoğunluğuyla birlikte alandaki doğal varyasyonun daha net yakalandığı görülmektedir. Özellikle Plan 4'te, bazı noktalarda pH ve ORP değerlerinde belirgin farklılıklar tespit edilmiştir. Bu da az noktalı planların alandaki mikro ölçekteki değişimleri kaçırabildiğini, yüksek yoğunluklu planların ise daha ayrıntılı bir analiz imkânı sunduğunu ortaya koymaktadır. DO açısından ise tüm planlar genel olarak 5 mg/L civarında stabil değerler vermiştir. Sonuç olarak, aynı alanda yapılan bu çok aşamalı örnekleme tasarımı, su parametrelerinin mekânsal dağılımının doğru şekilde modellenebilmesi açısından veri yoğunluğunun ne kadar kritik olduğunu göstermektedir.

Toplanan bu parametre verileri, saha uygulamaları sonrasında kontrol paneli üzerinden anlık olarak işlenmiş ve CBS tabanlı analizlerle mekânsal dağılım haritalarına dönüştürülmüştür. Analizlerde her bir su parametresine ait mekânsal değişkenlik, Kriging, IDW, Spline, Doğal Komşu enterpolasyon teknikleri kullanılarak modellenmiştir. Bu yaklaşımla çalışma alanı içerisinde ölçüm yapılmayan noktaların da tahmini değerlere ulaşılması sağlanmış ve böylelikle su parametrelerinin alansal görünümü elde edilmiştir.

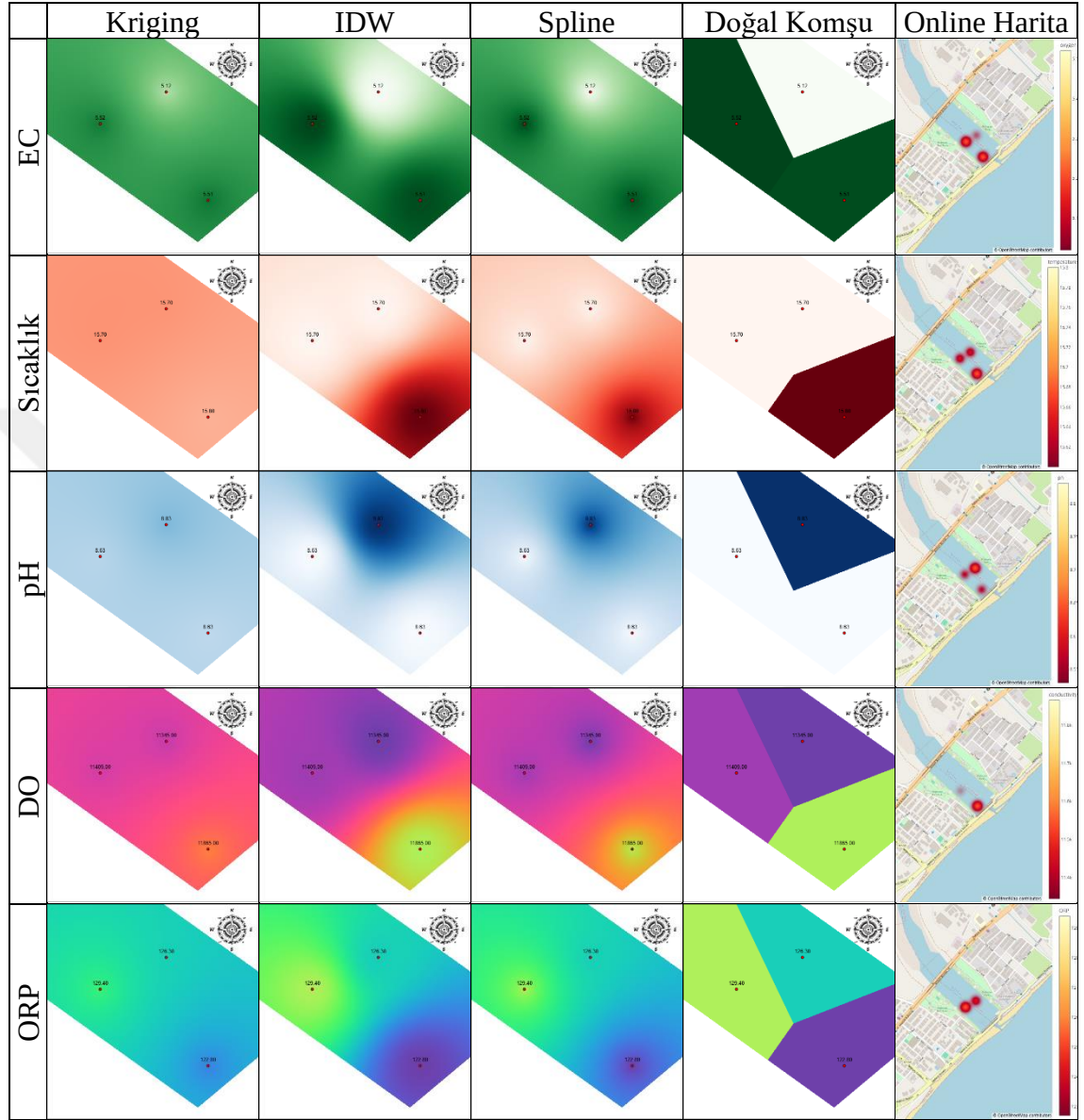
Uygulama sonuçları Plan 1 için Çizelge 4.5'te, Plan 2 için Çizelge 4.6'da, Plan 3 için Çizelge 4.7'de ve Plan 4 için Çizelge 4.8'de ayrıntılı olarak sunulmuştur. Her plan kapsamında elde edilen veriler kullanılarak ayrı ayrı alansal dağılım haritaları oluşturulmuş; böylece aynı bölgede farklı rota senaryolarının su kalitesi üzerindeki etkileri kıyaslanabilir hale getirilmiştir. Ayrıca elde edilen veriler yalnızca analiz sonrası değil, aynı zamanda gerçek zamanlı olarak da görselleştirilmiştir. İnsansız yüzey aracının hareketi sırasında algılanan tüm su parametreleri, sistemin kontrol paneline entegre edilen çevrimiçi harita arayüzü aracılığıyla anlık olarak harita üzerinde görüntülenmiştir. Bu sistem sayesinde, kullanıcılar hem aracın mevcut konumunu hem de o konuma ait ölçüm değerlerini eş zamanlı olarak takip edebilmekte; aynı zamanda parametrelerin renkli temsilleri ile mekânsal dağılım eğilimlerini canlı olarak gözlemleyebilmektedir. Gerçek zamanlı görselleştirme olası ani pH düşüşleri veya yüksek iletkenlik değerleri gibi değişimleri anında tespiti ve hızlı müdahale açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bu özellik sistemin yalnızca veri toplama değil, aynı zamanda izleme ve karar destek süreçlerine de katkı sunan bütünlük bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu yapı özellikle göl, baraj ya da deniz gibi geniş su kütlelerinde farklı bölgelerin fizikokimyasal özelliklerinin zamana ve lokasyona bağlı olarak nasıl değiştiği detaylı biçimde analiz edilebileceği gözlemlenmiştir. Ayrıca elde edilen bu veriler hem kısa vadeli izleme hem de uzun vadeli su yönetimi stratejilerinin planlanmasında kullanılabilecek önemli çıktılar sunmaktadır.

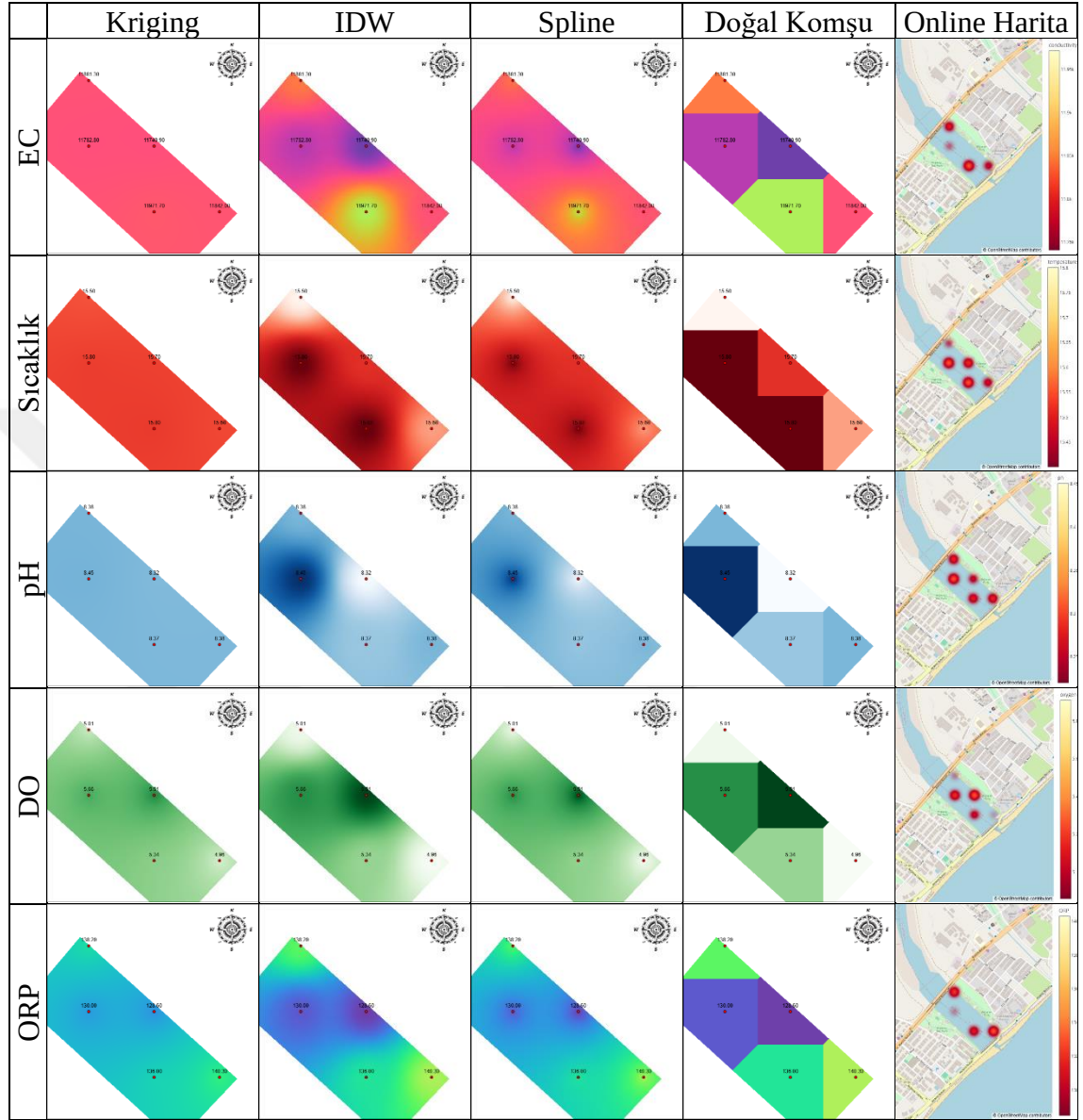
Çizelge 4.5. Plan 1'in EC, Sıcaklık, pH, DO ve ORP değerlerinin farklı enterpolasyon yöntemlerine göre oluşan alansal dağılım haritaları ve Google Haritalar tabanlı ısı haritası



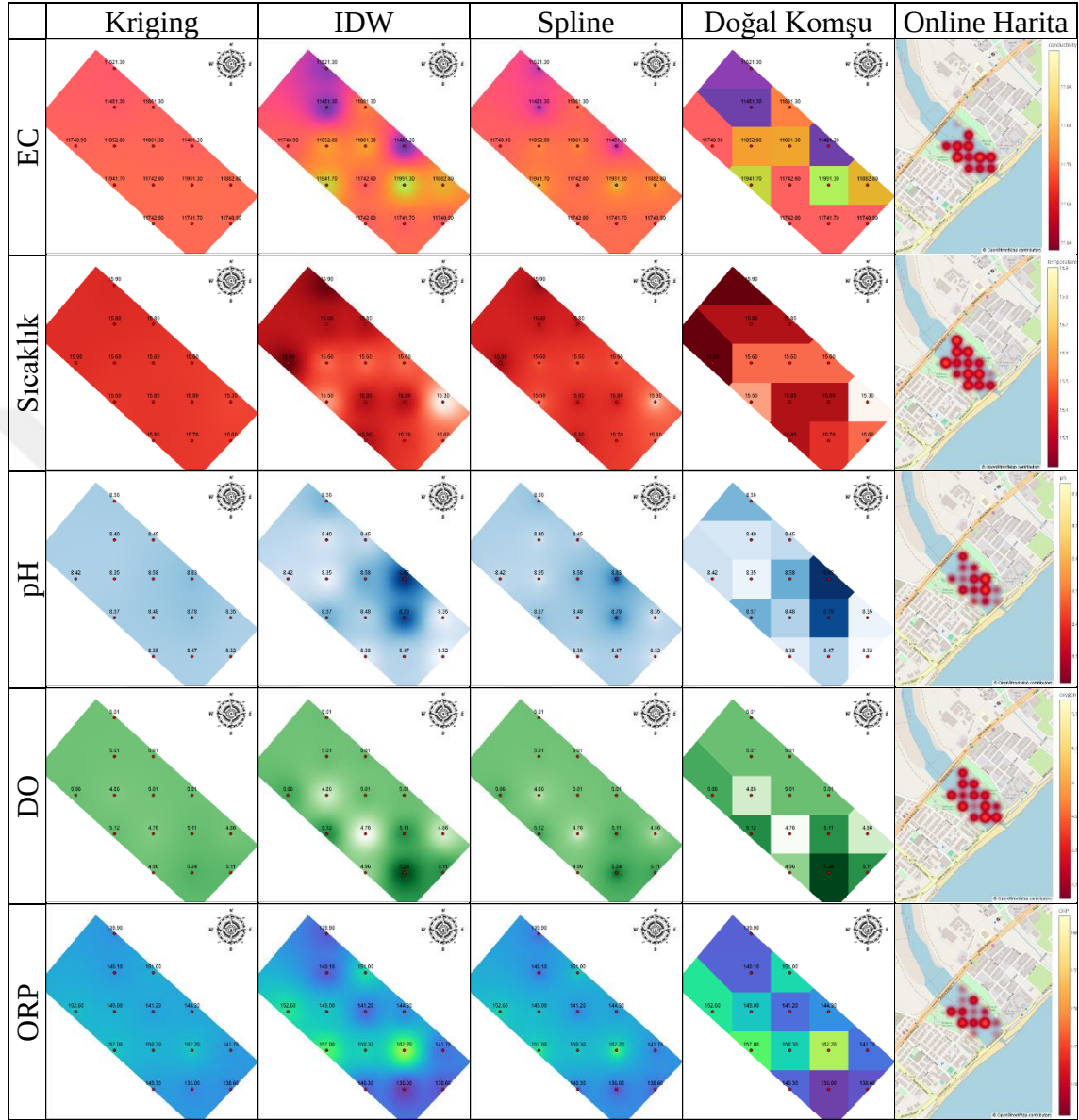
Çizelge 4.6. Plan 2'in EC, Sıcaklık, pH, DO ve ORP değerlerinin farklı enterpolasyon yöntemlerine göre oluşan alansal dağılım haritaları ve Google Haritalar tabanlı ısı haritası



Çizelge 4.7. Plan 3'in EC, Sıcaklık, pH, DO ve ORP değerlerinin farklı enterpolasyon yöntemlerine göre oluşan alansal dağılım haritaları ve Google Haritalar tabanlı ısı haritası



Çizelge 4.8. Plan 4'in EC, Sıcaklık, pH, DO ve ORP değerlerinin farklı enterpolasyon yöntemlerine göre oluşan alansal dağılım haritaları ve Google Haritalar tabanlı ısı haritası



Haritalar incelendiğinde, IDW ve Spline yöntemlerinin mekânsal dağılımları daha net ve sürekli biçimde temsil ettiği, buna karşılık Kriging ve Doğal Komşu yöntemlerinin daha sınırlı bir dağılım sağladığı gözlemlenmiştir. Bu farkın oluşmasında veri yoğunluğu belirleyici bir faktör olmuş; özellikle noktasal veri sayısının sınırlı olması, Kriging ve Doğal Komşu yöntemlerinin performansını olumsuz yönde etkilemiştir. Tayyap vd. (2023) yaptıkları enterpolasyon için coğrafi tekniklerin karşılaştırılması ile ilgili çalışmada veri yoğunluğundan, IDW ve Spline yöntemlerini daha az etkilediği, Kriging ve Doğal Komşu yöntemlerinin daha fazla etkilediğini belirtmektedir. Ancak çalışmada tüm enterpolasyon yöntemlerinde veri yoğunluğu ile tahmin hatası arasında negatif bir korelasyon olduğu vurgulanmaktadır. Benzer bir durum geliştirilen sistemde de

bulunmaktadır. 14 noktalı çalışmada oluşan alansal dağılım haritasında 2 noktalı çalışmaya göre daha anlamlı dağılımlar gözlemlenmektedir.

Geliştirilen sistemde gerçek zamanlı analizler ile ilde edilen sonuçlarda görüldüğü gibi mekânsal örnekleme yoğunluğu çözünürlüğün belirleyici unsurudur. 2 noktalı çalışmalara göre 14 noktalı çalışmalar sonucu oluşan alansal dağılım haritalarında ortaya çıkan yayılımlar, yüzeyin daha detaylı temsilini göstermektedir. Dash vd. (2023) tarafından 8 303 km²'lik sahada gerçekleştirilen çalışmada, örnekleme yoğunluğu 3, 6, 12, 24, 48 ve 96 nokta/1000 km²'ye çıkartıldığında semivariogram model uyumunun belirgin şekilde arttığını, özellikle 24 nokta/1000 km²'den sonra doku kaybının azaldığını belirtilmektedir.

Geliştirilen sistemde enterpolasyon yöntemlerinde çeşitlilik de sunulmaktadır. Bu durum birden fazla yöntemin karşılaştırılmasına imkân sağlamıştır. Guo vd. (2010)'da yapılan çalışmada LiDAR verisi ile yapılan bir çalışmada, örnekleme yoğunluğunun 0.0128–0.1024 nokta/m² arasında artırıldığında IDW, kriging ve spline gibi yöntemlerin performanslarında iyileşme sağlandığı gözlenmiştir. Kriging gibi istatistiksel yöntemlerin nümerik olarak hassas sonuçlar üretebilmesi için yüksek yoğunluklu örneklemenin kritik olduğu belirtilmektedir.

Geliştirilen sistemin sahip olduğu gerçek zamanlı enterpolasyon yeteneği, çevresel veri izleme uygulamaları açısından önemli bir yenilik ve avantaj sunmaktadır. Literatürde geleneksel enterpolasyon yöntemleri genellikle çevrim dışı veri kümeleri üzerinde çalışırken, bu sistemde anlık olarak toplanan verilerin eş zamanlı değerlendirilip haritalanabilmesi, acil müdahale gerektiren durumlar için kritik öneme sahiptir. Bu durum, özellikle ani kirlenme, alg patlamaları ya da su kalitesinde hızlı değişimlerin izlenmesinde önemli kazanımlar sağlamaktadır.

Liang vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, sürekli sensör verilerinin gerçek zamanlı olarak IDW yöntemiyle entepole edilmesinin, çevresel sistemlerin takibinde oldukça etkili olduğu belirtilmiştir. Araştırmada özellikle radyasyon gibi hızla yayılan olayların mekânsal olarak izlenmesinde gerçek zamanlılığın getirdiği avantajlar vurgulanmıştır. Bu sonuç, su kalitesi gibi dinamik değişkenlerin izlenmesinde de aynı mantıkla fayda sağlanabileceğini göstermektedir.

Pebesma vd. (2015) ise çevresel izleme ağlarında gerçek zamanlı veri akışının işlenerek otomatik haritalama yapılmasının, karar destek sistemleri açısından önemli olduğunu belirtmiştir. Anlık harita üretiminin operatörlere hızlı müdahale fırsatı tanıdığı, sistemin yönetimini kolaylaştırdığı ve operasyonel verimliliği artırdığı belirtilmiştir. Geliştirilen sistemimizde hem verinin sürekli alınması hem de bu verinin anlık enterpolasyonla yorumlanması sayesinde, izleme yalnızca gözleme değil, aktif karar verme süreçlerine de entegre edilebilir hale gelmiştir.

Bu bağlamda çalışmada geleneksel CBS destekli veri değerlendirme yaklaşımlarını kullanmak yerine, literatürde vurgulanan gerçek zamanlılık ihtiyacına da katkı veren bir yapı sunmaktadır. Böylece sistem hem çözünürlük hem enterpolasyon çeşitliliği hem de anlık karar destek altyapısı yönünden güçlü bir bütünlük sergilemektedir.

4.5 Sistem Performansı

Geliştirilen İYA sistemi, tasarlanan donanım ve yazılım altyapısıyla birlikte hem laboratuvar hem de saha ortamında test edilmiş; sistemin genel performansı çeşitli kriterler üzerinden değerlendirilmiştir.

Batarya performansı araç üzerindeki sensörlerin, haberleşme modüllerinin ve motorların sürekli çalıştığı senaryolarda değerlendirilmiştir. 11.1V 24Ah batarya ile İYA'nın 3 saat boyunca kesintisiz çalışabildiği gözlemlenmiştir. Enerji tüketiminde en büyük payı motorlar alırken, düşük güç modunda çalışan sensörler ve iletişim modülleri toplam enerji tüketimini dengelemiştir. Yapılan testlerde batarya kapasitesi için ise %30 altı sınırları belirlenmiştir. Bataryaların ve diğer donanımların sudan etkilenmemesi için su seviye sensöründe alarm noktası, %10 ve üstü ki bu da 50ml ve üstü bir suya karşılık gelmektedir. Su parametre izleme sisteminde ise güneş paneli desteği sayesinde enerji sürekliliği sağlanmıştır. Balbuena vd. (2020) geliştirdikleri araçta 40 Ah kapasiteli bir batarya kullanarak yaklaşık 2 saatlik kesintisiz çalışma süresi elde ettiklerini ve aracın ortalama 1 m/s hızla hareket ettiğini bildirmiştir. Idris vd. (2016) ise 9.8 Ah kapasiteli batarya ile yaptıkları denemelerde aracın yaklaşık 45 dakika çalışabildiğini ve 2 m/s'lik bir hızla seyrettiğini belirtmiştir. Madeo vd. (2020) tarafından geliştirilen sistemde ise 9 Ah batarya ile yaklaşık 20 dakikalık çalışma süresi elde edilmiş ve benzer şekilde 2 m/s'lik ortalama hız değeri belirtilmektedir. Shuo vd. (2017) tarafından Dongpo Gölü'nde gerçekleştirilen bir çalışmada, geliştirilen aracın maksimum hızının 1.5 m/s olduğu belirtilmiş; 473 m × 215 m'lik çalışma alanında 4 ayrı noktadan toplam 291 saniyede örnekleme yapılmış, bunun 276 saniyesinin seyir süresine ait olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada ise 24 Ah kapasiteli batarya ile yapılan otonom ve uzaktan kumandalı testler sonucunda yaklaşık 3 saatlik kesintisiz çalışma süresi sağlanmış ve aracın otonom sürüşte ortalama hızı 1 m/s olarak gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, geliştirilen sistemin enerji verimliliği açısından benzer ya da daha büyük batarya kapasitelerine sahip sistemlerle karşılaştırıldığında rekabetçi bir performans ortaya koyduğunu göstermektedir.

Su parametresi için kullanılan sensör verileri, 50 ölçümün ortalaması alınarak yorumlandığında, sistemin veri doğruluğu anlamlı düzeyde artmıştır. Her bir parametrenin ortalama ölçüm süresi 5 saniye olup, beş parametreden oluşan bir ölçüm döngüsü yaklaşık 25 saniyede tamamlanmıştır. Veri filtreleme algoritmaları sayesinde hatalı veya eksik veri iletimi engellenmiş, ölçüm güvenilirliği artırılmıştır. Kaizu vd. (2011), su parametrelerinin ölçümünü gerçekleştirirken her bir parametre için 5–6 tekrar ölçüm yapmış ve bu değerlerin ortalamasını esas alarak veri doğruluğunu artırmayı hedeflemişlerdir. Ayrıca sistemlerinde, sensörlerin su içerisine indirilip çıkarılabilir bir yapıda tasarlandığı belirtilmiştir. Bununla birlikte, literatürde yer alan bazı çalışmalarda (Shou vd. 2017; Arko vd. 2020; Chang vd. 2021), yalnızca tek bir ölçüm alınarak veri kaydı yapılmıştır. Öte yandan, Xing vd. (2020), bulanıklık sensörlerinden elde edilen verilerde geçersiz veya hatalı olanları filtreleyerek veri kalitesini artırmaya amaçlamıştır. Geliştirilen sistemde ise her su parametre değeri için 50 geçerli veri elde edilene kadar okuma yapılmış, hatalı veya anlamsız veriler sistem tarafından otomatik olarak elenmiş ve yalnızca geçerli değerlerin ortalaması dikkate alınarak kayıt gerçekleştirilmiştir. Böylece hem çoklu ölçüm yaklaşımı hem de geçersiz veri ayıklama süreci entegre edilerek, elde edilen verilerin doğruluğu literatürdeki örnek çalışmalara kıyasla daha yüksek seviyeye çıkarılmıştır.

Sistemin haberleşme performansı, SignalR teknolojisi üzerinden her saniyede bir veri paketi iletilmesiyle test edilmiştir. Ortalama 105 karakterlik veri paketleri 130 ms gibi düşük bir gecikmeyle kontrol merkezine ulaştırılabilmiş, bu da gerçek zamanlı izleme için yeterli düzeyde bir performans sağlamıştır. Microsoft Azure SignalR Service'in (2025) benzer yüklerde 100–200 ms gecikme sağladığı rapor edilmektedir. Bununla birlikte, uzun ve detaylı veri dizileri API üzerinden gönderilmiş ve yaklaşık 3 saniyelik gecikmeyle veri tabanına başarıyla kaydedilmiştir. SignalR ve RESTful API'nin birlikte kullanılması hem anlık tepki gerektiren işlemlerde hem de yüksek hacimli veri aktarımında sistemin esnek çalışmasını sağlamıştır. Medavarapu (2022) gerçek zamanlı sistemlerde sistemde geliştirilen hibrit yaklaşımı hem performans hem de esneklik açısından önermektedir.

Engel algılama ve kaçınma performansı sistemin güvenli çalışması için hayati önem taşımaktadır. İYA engelleri tespit etmek amacıyla LiDAR teknolojisi kullanılmıştır. LiDAR mesafe ve yoğunluk bileşenleri işlenerek, İYA'nın ön, sağ ön, sol ön, sağ arka ve sol arka olmak üzere beş farklı bölgesindeki engel yoğunlukları belirlenmiştir. Bu bilgiler doğrultusunda, engelin az olduğu yöne doğru dönüş yapabilmek için motorlara sinyal gönderilmiştir. Havuz ortamında yapılan 10 farklı senaryoda, %60 oranında engelden çarpmadan kaçınma başarısı elde edilmiştir. Ancak LiDAR'ın konumlandırılması ve bazı engellerin yükseklik özelliği gibi sınırlılıklar gözlemlenmiştir. Bu durum Leong vd. (2024) yaptıkları çalışmada da vurgulanmaktadır. Yazarlar 2D LiDAR'ın araç üzerindeki konumu nedeniyle sadece paralelindeki engelleri tespit ettiğini altta ve üstte kalan engelleri tespit edemediğini belirtmektedir. Ayrıca yazarlar sensör fizyon uygulamasının LiDAR ile tespit edilen engelden kaçınma, aracın çarpışma önleme yeteneğini artırdığını belirtmektedir. Geliştirilen sistemde de LiDAR'ın İYA'nın anten bölümüne yerleştirilmesi nedeniyle aynı hizada bulunan engelleri tespit edip kaçınabilirken, alt veya üstte bulunana engelleri tespit edememiş ve engelden kaçınma gerçekleştirmemiştir. Bununla birlikte pusula ve GPS ile uygulanan sensör füzyonun LiDAR tarafından engel tespit edilince çarpışmayı önlemede başarılı olduğu gözlemlenmektedir. Yazarların belirttiği yaklaşım saha testlerinde, çalışma alanında bulunan yüksek duvarların İYA tarafından engel olarak başarılı bir şekilde tespit edilmesi ve herhangi bir kaza yaşanmaması durumunu da açıklamaktadır. Bu durum LiDAR'ın konumlandırmasının ve engel yüksekliğinin önemini ortaya koymakta, yazarların ortaya koyduğu yaklaşıma katkı sağlamaktadır.

Kontrol panelinin altyapısı modern web teknolojileri ve gerçek zamanlı iletişim yöntemlerinin hibrit bir yaklaşımını benimsemiştir. Microsoft tarafından geliştirilen yüksek performanslı ve çapraz platform destekli bir web geliştirme kütüphanesi olan ASP.NET Core MVC mimarisi üzerine inşa edilmiştir. Bu mimari özellikle büyük ölçekli projelerde esneklik, yeniden kullanılabilirlik ve bakım kolaylığı sunarak sistemin modüler ve ölçeklenebilir yapısına katkıda bulunmuştur. Kullanıcı arayüzü tasarımı için HTML, CSS ve JavaScript kullanılmış; bu sayede sayfanın yapısal bileşenleri tanımlanmış, estetik ve mobil uyumlu bir görünüm sağlanmış, ayrıca kullanıcı etkileşimleri dinamik ve interaktif bir şekilde yönetilmektedir. Cao vd. (2018) tarafından web sitesi olarak geliştirilen ve temel HTML ve Javascript dillerini kullanan kontrol panelinden çok daha kapsamlı ve etkileşimli bir panel geliştirilmiştir. Buna ek olarak Dsouza vd. (2021) geliştirilen mobil uygulama şeklindeki kontrol paneli mobil cihazlarda kullanılabilirken kişisel bilgisayarlardan erişilememekte ve sistemi mobil platformlarla

sınırlı bırakmaktadır. Ancak geliştirilen sistemdeki kontrol paneli mobil cihaz duyarlı yapısı ile sadece bilgisayarlarda değil mobil cihazlarda da kullanılabilir.

Kontrol paneli, İYA'nın görev yürütme kabiliyetini büyük ölçüde artıran kapsamlı bir görev tanımlama ve yönetim arayüzü sunmaktadır. Kullanıcılar, harita tabanlı arayüz aracılığıyla hem manuel hem de otonom görev noktaları tanımlayabilmektedir. Otonom görev tanımlama bölümünde, istenilen izleme bölgesi harita üzerinden seçildikten sonra, bu bölgenin kaç farklı noktasından ölçüm yapılacağı belirtilir ve sistem otomatik olarak bu noktalara homojen ve sistematik bir grid yapısı oluşturur. Noktaların enerji verimliliğini artırmak amacıyla zigzag sıralama yöntemiyle sıralanması sağlanmıştır. Manuel görev tanımlama ise kullanıcının su parametresinin izleneceği koordinatları tek tek seçip numune alınıp alınmayacağını belirlemesiyle gerçekleşir. Oluşturulan bu görev listeleri veri tabanına kaydedilmekte ve İYA'nın belirlenen sıraya göre hareket etmesi sağlanmaktadır. Görev tanımlamadaki kontrol paneline entegre edilen hibrit yaklaşım, Kaizu vd. (2011) geliştirdikleri alansal tarama yaklaşımını, Gou vd. (2018) manuel koordinat seçimli yaklaşımını bir araya getirerek, tüm bu işlemlerin gerçek zamanlı yapılabilmesine olanak tanıyan bir sistem haline getirmektedir.

Gerçek zamanlı izleme ve görev denetimi kontrol panelinin en güçlü yönlerinden biridir. Görevler başlatıldığında İYA'nın anlık konumu, motor hızları, pusula yönü, kabuklardaki su seviyesi ve batarya durumu gibi kritik güvenlik bilgileri kontrol paneline sürekli olarak iletilir ve harita üzerinde gerçek zamanlı olarak görüntülenebilmektedir. Bu sayede kullanıcılar aracın hareketini, mevcut durumunu ve herhangi bir anormallığı anlık olarak takip edebilir, gerekli durumlarda müdahale edebilirler. Geliştirilen kontrol panelindeki bu özellik İYA'ya özel tasarlanmış olup kontrol paneli olarak NavMonPc, RealTerm (İdris vd. 2016), HEX Pixhawk 2.1 CUBE ORANGE+ (Zhartybayeva vd. 2024) gibi hazır paket program kullanılan sistemlerden ayrılmaktadır. Uzaktan kumanda bölümü ise özellikle zorlu veya kıyıya yakın alanlarda manuel kontrol ihtiyacı duyulduğunda devreye girer. Bu bölümde kullanıcı İYA'nın motor hızlarını değiştirebilir, su parametreleri izleme sistemindeki pompa, sensörler ve numune alım sistemini aktif veya pasif edebilir. Fiziksel kumanda 3 km'ye kadar menzil sunarken, web tabanlı kumanda internet erişimi olan her yerden kontrol imkânı sağlamaktadır. Stateczny ve Burdziakowski (2019) uzaktan kumandayı her otonom sistem için tavsiye etmekte ve daha yüksek seviyeli öncelik verilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Bu yaklaşımla manuel komutlar ile özellikle otonom hareket esnasında anlık müdahale gereksinimlerini belirtmektedir. Geliştirilen sistemde iki adet uzaktan kumanda iki farklı haberleşme sistemi üzerinden bilgi aktaracak şekilde geliştirilmiştir. Bu durum literatüre farklı bir bakış açısı getirmekte manuel ve otonom modlu sistemlerin iki katmanlı yapısına bir katman daha ekleyip farklı bir haberleşme yöntemi ile farklı bir kumanda yapısı sunmaktadır. Ayrıca İYA yazılımında geliştirilen iş parçacıklı model sayesinde hareket esnasında kumandalar arası seviyelendirme de gerçekleştirilmiştir. Bu durumda fiziksel kumanda en öncelikli, web tabanlı kumanda ikinci öncelikli, otonom sürüş algoritmasından gelen veri de en son öncelikli olacak şekilde işlenmektedir. Bu sayede kumandalar otonom sürüş esnasında anlık müdahalelerde bulunmak için kullanılmaktadır.

Kontrol paneli toplanan su verilerinin sadece listelenmesini değil, aynı zamanda CBS tabanlı ileri düzey analiz ve görselleştirilmesini de sağlamaktadır. Toplanan su parametre değerleri tarih ve saat aralığına göre listelenebilir ve CSV dosya formatında

yerel bilgisayara indirilebilir, bu da kullanıcıların ArcGIS, QGIS gibi profesyonel CBS yazılımlarıyla daha ileri analizler yapmasına olanak tanımaktadır. En önemlisi kontrol paneli üzerinde IDW, Kriging, Spline ve Doğal Komşu gibi farklı enterpolasyon yöntemleri kullanılarak su parametrelerinin anlık alansal dağılım haritaları oluşturulabilmektedir. Kullanıcılar diledikleri enterpolasyon yöntemini seçebilmekte ve Google Maps tabanlı ısı haritaları ile parametrelerin alansal dağılımını gerçek zamanlı olarak gözlemleyebilmektedir. Ryu (2022) yaptığı çalışmada toplanan parametre değerlerinin grafiksel olarak gösterimine olanak sağlayan ThingSpeak yapısını kullanmaktadır. Idris vd. (2016) parametre değerlerini NavMonPc programından CSV dosya formatı biçiminde indirip daha sonra Mike Zero yazılımında iki ve üç boyutlu çizimlere dönüştürmüştür. Geliştirilen kontrol panelinde su parametreleri üzerinde grafiksel gösterim kontrol paneline entegre edilmemiştir. Ancak gerçek zamanlı enterpolasyon yöntemleri kullanılarak oluşturulan haritalar kontrol paneline özgün bir yaklaşım sunmaktadır.

Kontrol paneli ayrıca İYA'nın çalışma sınırlarını belirlemek ve güvenliğini izleyip müdahale edebilmek için tasarlanmıştır. Harita üzerinden sadece çalışma alanının seçilmesiyle belirlenen sınırlar dışında, güvenlik sınırlarının da kontrol panelinden belirlenmesi ile güvenlik sınırı dışına çıkması engellenmekte, böylece kontrol kaybı veya sinyal kaybı gibi durumlarda aracın güvenliği sağlanmaktadır. Bu özellik kontrol paneline özgün bir yapı kazandırmaktadır. Bununla birlikte güvenlik önlemi olarak Chen vd. (2021) yaptıkları çalışmada konum hatasını belirlemek için bir $\pm 20\text{m}$ 'lik bir eşik belirleyerek hız hatasını da $\pm 1\text{m/s}$ içinde tutmak için Kalman Filtresi gibi algoritmalar kullanmışlardır. Bu sayede aracı rotadan fazla sapmamasını sağlayarak çalışma alanı sınırlarına otomatik olarak uymasına katkı sağlanmaktadır.

Sonuç olarak kontrol paneli, geliştirilen İYA sisteminin sadece bir arayüzü olmaktan öte, tüm operasyonel süreçlerin yönetildiği, izlendiği ve analiz edildiği kapsamlı bir platformdur. Kullanıcı dostu arayüzü, gerçek zamanlı iletişim yetenekleri, esnek görev tanımlama ve güçlü veri analiz araçlarıyla sistemin performansını önemli ölçüde artırmıştır. Bu bütünleşmiş yapı, İYA'nın çevresel izleme görevlerini daha verimli, güvenilir ve sürdürülebilir bir şekilde yerine getirmesini sağlayarak, çevresel yönetim ve karar destek sistemleri için ölçeklenebilir bir altyapı sunmaktadır.

5. SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında, su kalitesi izleme süreçlerine yenilikçi bir yaklaşım getirilerek, otonom olarak görev yapabilen ve çevrim içi veri aktarımı sağlayabilen bir İYA sistemi geliştirilmiştir. Sistemin temel amacı, sıcaklık, pH, EC, DO ve ORP gibi su kalitesi parametrelerinin geniş alanlarda, gerçek zamanlı ve sürekli bir biçimde izlenebilmesini sağlamak, aynı zamanda bu verilerin CBS ortamında analiz edilerek karar destek süreçlerine katkı sunmaktır.

Çalışmada geliştirilen sistem donanım ve yazılım bileşenleri açısından kapsamlı bir yapıya sahiptir. Katamaran formunda tasarlanmış İYA üzerinde yer alan çoklu sensör modülleri, PID algoritmasına dayalı yönlendirme sistemi, LiDAR ile desteklenen engel tespiti modülü, konumlandırma için GPS ve yön kontrolü için dijital pusula gibi donanımlar birbirini tamamlayıcı niteliktedir. Yazılım tarafında ise, Raspberry Pi tabanlı Python programlama dili kullanılarak; görev yürütme, veri işleme, motor kontrolü ve haberleşme işlevleri tek bir platform üzerinden yönetilmiştir. Gerçek zamanlı veri aktarımı, SignalR teknolojisi ile sağlanmış; kullanıcı arayüzü olarak geliştirilen kapsamlı bir web tabanlı kontrol paneli ile İYA'nın tüm hareketleri ve verileri anlık olarak takip edilebilmiştir.

Geliştirilen İYA ile hem havuzda hem de 36.852471, 30.624705 —36.853776, 30.626249 — 36.856643, 30.622258 — 36.855287, 30.620821 koordinat noktaları arasında yer alan su alanında çalışmalar yapılmıştır. Havuzda yapılan çalışmalarda İYA, su parametreleri ölçüm sistemi ve geliştirilen uzaktan kumanda donanım ve yazılımları ile kontrol paneline ait tüm özellikler tek tek denenmiştir. İYA hareketi ile ilgili yapılan denemelerde her ne kadar İYA'da kullanılan motor, sürücü, şaft ve pervaneler aynı model ve marka olsa da iki tarafta yer alan motorların İYA üzerindeki etkileri farklılık göstermiştir. Uzaktan kumandadan gönderilen aynı hız sinyali motor hareketine ki dolayısıyla İYA hareketine farklı etki göstermiş %8'e varan sapmalar meydana gelmiştir. İYA'nın farklı hız sinyallerine nasıl tepki verdiği gözlemlenmiş ve yapılan kalibrasyon işlemleri ile sapma değeri %1'e kadar indirilmiştir. Bu işlem İYA'ya gelen hız birimlerinin motorlara gönderilen PWM sinyali dönüştürülmesi aşamasında gerçekleştirilmiştir. Hız birimlerine karşılık gelen PWM sinyalleri yeniden eşleştirilmiştir. Su parametreleri ölçüm sistemi ile sisteme çekilen suyun İYA üzerindeki ağırlığa ve İYA'nın hareketine etkisi de gözlemlenmiş ve yazılımda yapılan değişiklikler ile İYA hareketinin su parametre ölçüm sistemindeki suyun tamamen tahliyesinden sonra hareket etmesi gerektiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte numune kaplarında toplanan numunelerin ki kapların İYA'nın merkez noktasına yakın olması sebebi İYA'nın ilerlemesinde olumsuz bir etkisi olmamıştır. Havuz deneylerinde uzaktan kumandanın mesafe testi de gerçekleştirilmiş ve açık alanda 3km olarak belirlenmiştir. Bu sınırlılık web tabanlı kumandada bulunmamakta, internet erişimi olan her yerden iletişim sağlanabilmektedir. GPS, dijital pusula, su seviye sensörleri ve batarya seviye devresi gibi sistemler stabil olarak çalıştığı gözlemlenmiş ve veri akışı kesintisiz olarak izlenmiştir. Engel algılama testlerinde İYA'nın önüne yerleştirilen engellerden %66'lık bir oranda kaçınma algoritmaları devreye girmiş ve engellerden kaçınmıştır. Geri kalan kısımda LiDAR tarafından engeller tespit edilememiş ve algoritma devreye girmemiştir. LiDAR'ın İYA üzerindeki konumu engellerin hem tespit edilmesinde hem de edilememesinde belirleyici olmuştur. LiDAR'ın farklı noktalara yerleştirilmesi bir öneri olmakla birlikte engelin tespiti için LiDAR'ın dikey olarak da tarama yapabilecek şekilde

konumlandırılması, mesela servo motor kullanılarak aşağı yukarı hareketi sağlanabilir, engel tespitinde başarıyı arttıracakları öngörülmektedir.

Havuzda İYA ile kontrol paneli arasındaki iletişim ve geliştirilen algoritmalarda test edilmiştir. Kontrol panelinden İYA'nın hareket ettirilmesi, İYA'dan gelen verilerin takibi, kontrol panelinde su parametre ölçüm sistemine gönderilen mesajlar ve sistemin geri bildirimleri test edilmiş ve geliştirilen algoritma başarı ile çalıştırılmıştır. Gerçek zamanlı olarak geliştirilen kontrol panelinde SignalR ve RESTful API'nin birlikte kullanılması ile hibrit bir yaklaşım oluşturulmuş bu sayede hem yüksek performanslı hem de esnek bir yapı geliştirilmiştir.

Havuz testlerinin başarıyla tamamlanmasının ardından, İYA ile geniş bir su alanında dört farklı otonom görev planı oluşturularak saha testleri gerçekleştirilmiştir. Tüm görevler, kullanıcı dostu bir kontrol paneli aracılığıyla gerçek zamanlı olarak tanımlanmış ve sisteme entegre edilmiştir. Bu dört plan kapsamında toplamda 24 görev noktası belirlenmiş ve İYA, bu noktaları belirlenen sıralamaya göre başarıyla ulaşmıştır. Görevler boyunca araç toplamda 2248,35 metre yol katetmiş, bu mesafeyi 34 dakika 36 saniyede tamamlamış ve ortalama 1,08 m/sn hızla seyretmiştir. Görev noktaları arasındaki toplam kuş uçuşu mesafesi 2167,91 metre olarak hesaplanmıştır. Gerçek rota ile doğrusal rota arasındaki 80,44 metrelik fark, araç hareketinin çevresel etkiler, yön düzeltmeleri ve rota güncellemelerinden etkilendiğini göstermektedir. Bu fark, ideal rotaya göre yaklaşık %3,5'lik bir sapmaya karşılık gelmektedir. Bu değer, su ortamındaki doğal koşullar ve düşük hızlı manevralar dikkate alındığında kabul edilebilir sınırlar içerisinde. Buna ek olarak sistemde kullanılan iki ayrı GPS'den gelen verinin tek bir veriye dönüştürülerek kullanımı, dijital pusula kullanılması ve motorlarda yapılan kalibrasyon ayarları %96,5'lik rota takip oranına katkı sağlamıştır.

Bununla birlikte her 24 görev noktasına İYA'nın yaklaşması, görev noktasında durması ve görevini yerine getirip tekrar hareket etmesi aşamaları da kontrol panelinden izlenmiş ve 3 metrelik tolerans ile değerlendirilmiştir. 24 görev noktasından 16 görev noktası 3 metre tolerans sınırı içerisinde kalmış, 8 görev noktası ise 3 metre toleransını aşmıştır. İYA'nın belirlenen koordinata su yüzeyinde erişimi bakımından değerlendirildiğinde %66'lık bir oran ortaya çıkmaktadır. Su ortamındaki koşullar, motorlar durduktan sonraki oluşan salınım gibi etmenler dikkate alındığında bu oran kabul edilebilir sınırlar içerisinde yer almaktadır. Ayrıca geliştirilen sistem su parametre değerlerini ölçmekte ve değerlendirme aşamasında enterpolasyon yaklaşımlarını kullanıp alansal dağılım haritaları oluşturmaktadır. Bu kapsamda ölçüm yapılan noktanın ve o noktaya yakın noktaların veri değerleri halihazırda sistemde hesaplanıp, gözlenmektedir. Bu nedenle tanımlanan görev noktası ile ölçüm yapılan görev noktası arasındaki farklılıklar belirgin farklar oluşturmamaktadır.

Ancak daha hassas görev uygulamaları için bu sapma oranının minimize edilmesi gerekmektedir. Bu sapma oranının daha da azaltılabilmesi için, konumlama doğruluğunu artırmak amacıyla klasik GNSS sistemleri yerine RTK-GNSS gibi santimetre hassasiyetine sahip sistemler, çevresel etkenlerin (akıntı, rüzgar gibi) etkisini azaltmak ve etkisini tespit etmek için ek donanımlar, görev noktaları arasındaki uzun mesafeler yerine, rotaya daha fazla ara geçiş noktası eklenmesi gibi yöntemler kullanılabilir. Buna ek olarak sistemde duruş testleri, salınım testleri gibi testler yapılarak hassas görevlerde hedef koordinata daha etkili biçimde yaklaşması sağlanabilir.

Her bir görev noktasında sıcaklık, pH, EC, ORP ve DO olmak üzere 5 farklı parametre değerlerini okunup kontrol ünitesine veri paketi olarak gönderilmiş, kontrol ünitesinden de veri paketleri ayrıştırılıp veri tabanına kaydedilmiştir. 23 noktada sadece parametre ölçümü olurken 1 noktada ek olarak numune alım işlemi de gerçekleştirilmiştir. Tüm bu işlemler toplamda 44 dakika 32 saniye içerisinde yapılmış ve ortalama bir işlem süresi 1 dakika 55 saniye olarak tespit edilmiştir. Okunan parametre değerleri veri tabanına kayıt işleminden sonra kontrol ünitesinde bulunan farklı sayfalar aracılığı ile CSV formatında indirilebilmekte, gerçek zamanlı haritalar üzerinde gözlemlenebilmekte ve ayrıca IDW, Spline, Kriging ve Doğal komşu gibi farklı enterpolasyon yöntemleri ile gerçek zamanlı alansal dağılım haritaları oluşturulabilmektedir.

Çalışma alanında aynı gün içerisinde yapılan farklı planlar ile farklı koordinattan 5 farklı parametre ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümlerde okunan parametre değerleri arasında yüksek benzerlik gösterdiği saptanmıştır. Ayrıca birbirlerine yakın noktalar arasında okunan sensör değerlerinde benzerlik göstermektedir. Bu durum aynı zamanda çalışma öncesi kalibrasyonu yapılan sensörlerin çalışma sırasında da doğruluğunu göstermektedir. Plan 3 ve Plan 4'ten elde edilen parametre değerleri kapsama alanı olarak Plan 1 ve Plan 2'ye göre daha geniş olduğundan parametre değerlerinde daha çok değişim göstermektedir. Bu durum alansal dağılım haritalarına da yansımaktadır. Aynı bölgelere yakın ölçümler arasında aşırı farklılıklar oluşmaması sensörlerin zamansal stabilitesini de doğrulamaktadır.

Bu çalışmada toplanan su kalite verileri, CBS altyapısı kullanılarak gerçek zamanlı olarak analiz edilmiş ve IDW, Kriging, Spline ve Doğal Komşu enterpolasyon yöntemleri ile mekânsal modelleme gerçekleştirilmiştir. Böylece, yalnızca sayısal veri izleme ile sınırlı kalınmamış, aynı zamanda ölçülen su parametrelerinin harita tabanlı olarak görselleştirilmesi ve yorumlanması mümkün hale getirilmiştir. Geliştirilen sistemde, kullanıcılar her bir ölçüm planı için dilediği enterpolasyon yöntemini kontrol paneli üzerinden seçebilmektedir. Seçilen yönteme bağlı olarak sistem, eş zamanlı olarak hem Google Maps tabanlı sıcaklık haritası hem de seçilen enterpolasyon metoduna göre oluşturulan alansal dağılım haritasını kullanıcıya sunmaktadır. Bu yapı, mekânsal analizlerin anlık olarak değerlendirilmesini ve farklı yöntemlerin karşılaştırmalı olarak gözlemlenmesini sağlamaktadır.

Analiz sonuçlarına göre, Doğal Komşu yöntemiyle oluşturulan haritalar, çalışma yapılan bölgenin genel yapısını ve su parametreleri hakkında ön bilgi sağlayan dengeli bir yüzey üretmektedir. IDW yöntemi, komşu noktalarla ters orantılı ağırlık ilişkisi kurduğundan, özellikle ara bölgelerdeki değerleri daha belirgin bir şekilde ortaya koymakta ve parametre farklılıklarını belirginleştirmektedir. Spline yöntemi ise, ölçüm noktaları arasında daha yumuşak geçişli ve sürekli bir yüzey oluşturmakta, bu da özellikle homojen bölgelerdeki görselleştirmeleri desteklemektedir. Kriging yöntemiyle oluşturulan haritalarda ise yüzeydeki parametre dağılımları daha az belirgin gösterilmiştir. Bunun temel nedeni, Kriging'in yalnızca mesafe ilişkisini değil, aynı zamanda verilerin istatistiksel mekânsal bağımlılığını da dikkate almasıdır. Ayrıca, gerçek zamanlı sistemlerde hesap yükünün azaltılması amacıyla Kriging formülünde sadeleştirilmiş bir model tercih edilmiştir. Bu durumda, varyogram fonksiyonunda yalnızca uzaklık değil, sensör verilerinin birbirine benzer olması da etkili olmuş ve sonuç yüzeylerinin daha düz çıkmasına neden olmuştur. Ek olarak, örneklem sayısının artırılmasının da doğrudan etki ettiği gözlemlenmiştir. Örneğin, yalnızca 2 örneklem

noktasına sahip bir plan ile 14 örneklem noktasına sahip bir plan arasında oluşturulan yüzeylerde anlamlı farklılıklar ortaya çıkmıştır. Bu durum, ölçüm yapılan nokta sayısı arttıkça hem model doğruluğunun arttığını hem de haritalarda elde edilen mekânsal detayların daha anlamlı hale geldiğini göstermektedir.

Geliştirilen kontrol paneli, geleneksel sistemlerin ötesine geçerek, modern web teknolojileriyle donatılmış çok yönlü ve kullanıcı dostu bir arayüz sunmaktadır. ASP.NET Core MVC temelli mimarisi sayesinde hem masaüstü hem de mobil cihazlarla tam uyum içinde çalışabilen bu sistem, yalnızca verileri listeleyen bir yapıdan ibaret değildir; aynı zamanda görev tanımlama, canlı takip, uzaktan kontrol ve veri güvenliği gibi işlevleri bütünlüştürmüş bir şekilde sunarak gerçek zamanlı çevresel izleme faaliyetlerine etkin biçimde katkı sağlamaktadır. Manuel ve otonom görev planlamasını tek bir arayüzde birleştiren hibrit yaklaşımı sayesinde, kullanıcılar izleme bölgelerini ister manuel seçip özelleştirebilir ister sistemin akıllı algoritmalarıyla otomatik olarak tanımlatabilir. Görev noktalarının enerji verimliliğine göre sıralanması, iki farklı uzaktan kumanda sistemiyle anlık müdahale imkânı ve önceliklendirme tabanlı komut işleme altyapısı gibi özellikler, bu sistemin pratikteki esnekliğini ve operasyonel üstünlüğünü ortaya koymaktadır.

Kontrol panelinin bir diğer dikkat çekici yönü, gelişmiş CBS tabanlı analiz ve görselleştirme kapasitesidir. Toplanan su parametreleri, tarih ve saat filtrelemesiyle sorgulanabilir, dışa aktarılabilir ve Google Maps tabanlı arayüzde anlık olarak entropolasyon haritalarına dönüştürülebilir. IDW, Kriging, Spline ve Doğal Komşu gibi farklı algoritmaların eş zamanlı uygulanabilmesi, kullanıcıya yöntemler arası karşılaştırma yapma ve mekânsal eğilimleri analiz etme imkânı sunmaktadır. Ayrıca sistem, izleme alanı dışında kalan sınırları kullanıcı tanımlı güvenlik bölgeleriyle kontrol ederek, aracın belirlenen bölge dışına çıkmasını yazılımsal olarak engelleyebilmekte ve operasyonel güvenliği artırmaktadır. Tüm bu özellikler, kontrol panelini sadece bir arayüz olmaktan çıkarıp, otonom çevresel izleme süreçlerini gerçek zamanlı olarak planlayan, yöneten, izleyen ve analiz eden merkezi bir platform haline getirmektedir.

Geliştirilen İYA, ilk aşamada, kontrollü ve durağan su kütlelerinde, özellikle yüzme havuzları ve benzeri durgun su ortamlarında, test edilmiştir. Bu testler sonucunda İYA'nın temel hareket kabiliyetinin, yönelme hassasiyetinin ve genel dengesinin başarılı bir şekilde çalıştığı gözlemlenmiştir. Test sürecinde aracın manevra kabiliyeti, su üzerindeki stabilitesi ve kontrol sistemlerinin işleyişi açısından herhangi bir teknik sorunla karşılaşmamıştır. Özellikle devrilme, dengesizlik ya da kontrol kaybı gibi güvenlik ve işlevsellik açısından kritik sorunlar gözlenmemiştir. İYA'nın dış çevre koşullarındaki performansı henüz sistematik olarak değerlendirilmemiştir. Rüzgâr, akıntı, dalga etkisi ve değişken hava koşulları gibi doğal çevresel etmenlerin aracın hareket kabiliyeti, yön kararlılığı ve enerji tüketimi üzerindeki olası etkileri konusunda bir çalışma yapılmamıştır. Bu nedenle, İYA'nın açık deniz veya nehir gibi doğal su ortamlarında nasıl bir performans sergileyeceğini belirlemek için ileri düzey saha testlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Geliştirilen sistem su kalitesinin izlenmesi açısından hem donanımsal hem de yazılımsal olarak başarılı bir bütünlük sergilemiştir. Sistem; gerçek zamanlı veri aktarımı, otonom hareket kabiliyeti, engelden kaçınma mekanizması, web tabanlı kontrol paneli ve CBS tabanlı veri analizi bileşenleriyle, literatürde yer alan benzer uygulamalardan farklı olarak daha bütüncül bir yapı sunmuştur. Düşük maliyetli ve modüler bileşenlerden

oluşan sistemin, farklı sensörlerin entegrasyonu ile genişletilebilecek yapıda olması, onu hem bilimsel araştırmalar hem de çevresel yönetim uygulamaları açısından uygulanabilir kılmaktadır. Sistemin genel başarımlı oranı yüksek bulunmuş, mevcut tolerans sınırları içinde güvenilir bir şekilde görev noktalarına ulaşabildiği gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, bu sistemin sunduğu tüm fonksiyonlar; çevresel izleme, kaynak yönetimi, kirlilik tespiti ve modelleme gibi alanlarda kullanılabilir, ölçeklenebilir bir karar destek altyapısı niteliği taşımaktadır. Gerçek zamanlı veri işleme, esnek model seçimi ve harita tabanlı görselleştirme gibi yetenekleri sayesinde sistem, yalnızca akademik araştırmalar değil; belediyeler, çevre ajansları ve su yönetimi kurumları için de etkili bir araç olarak değerlendirilmektedir.

Mevcut sistemin geliştirilmesi ve gelecek çalışmalar için öneriler kapsamında, daha hassas GPS modüllerinin (RTK-GNSS) kullanılması, hava ve su koşullarının da tespitini yapabilecek, rüzgâr, nem, akıntı gibi sensörlerin kullanılması, LiDAR sisteminin görüş açısının artırılması ve sadece yatayda değil dikey de tarama yapabilecek şekilde konumlandırılması, sensör füzyon yaklaşımının genişletilerek kamera, ultrasonik sensör gibi donanımların da engel algılama sistemine entegrasyonu, batarya yönetim sisteminin geliştirilmesi ve yapay zekâ destekli rota optimizasyon algoritmalarının entegre edilmesi yer almaktadır. Bunlarla birlikte toplanan su parametre değerlerinin farklı indeks hesaplamaları ve algoritmalar ile su hakkında sınıflandırma ve yorum yapabilecek şekilde sonuçlar döndürebilmesi, alansal haritalarda da interaktif sistemlerin kullanılması bulunmaktadır. Ayrıca mevcut sistemin, nehir ağzları, liman bölgeleri ve tarımsal drenaj alanları gibi farklı sucul ortamlarda test edilmesi ve farklı mevsimsel koşullarda çalışabilirliğinin değerlendirilmesi, sistemin daha kapsamlı bir çevresel izleme aracı haline getirilmesine katkı sağlayacaktır. İYA'nın farklı su ve hava koşullarındaki dayanıklılığını, uyum yeteneğini ve genel performansını daha kapsamlı biçimde ortaya koyacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Algamili, A. S., Khir, M. H. M., Dennis, J. O., Ahmed, A. Y., Alabsi, S. S., Ba Hashwan, S. S., Junaid, M. M., 2021. A review of actuation and sensing mechanisms in MEMS-based sensor devices. *Nanoscale research letters*, 16, 1-21.
- ArcGIS Pro, 2025. How Spline works. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-spline-works.htm> [Son erişim tarihi: 03.07.2025].
- Arko, S. R., Issa, R. B., Das, M. ve Rahman, M. S., 2020. Autonomous Surface Vehicle for Real-time Monitoring of Water Bodies in Bangladesh. *Global Oceans 2020: Singapore–US Gulf Coast*, ss. 1-7, 05-30 Ekim, Biloxi, MS, USA
- Atlas Scientific, 2025. Industrial Conductivity Calibration K 1.0 Set. <https://atlas-scientific.com/calibration-solutions/industrial-conductivity-calibration-k-1-0-set/> [Son erişim tarihi: 03.07.2025].
- Atlas Scientific, 2025. Dissolved Oxygen Kit. https://files.atlas-scientific.com/LG_DO_probe.pdf [Son erişim tarihi: 03.07.2025].
- Atlas Scientific, 2025. Zero Dissolved Oxygen Calibration Set Kit. <https://atlas-scientific.com/calibration-solutions/zero-dissolved-oxygen-calibration-solution-set/> [Son erişim tarihi: 03.07.2025].
- Atlas Scientific, 2025. Mini Conductivity K 1.0 Kit. https://files.atlas-scientific.com/Mini_EC_K_1.0_probe.pdf [Son erişim tarihi: 03.07.2025].
- Atlas Scientific, 2025. ORP Calibration Set. <https://atlas-scientific.com/calibration-solutions/orp-calibration-set/> [Son erişim tarihi: 03.07.2025].
- Atlas Scientific, 2025. OPR Kit. https://files.atlas-scientific.com/orp_probe.pdf [Son erişim tarihi: 03.07.2025].
- Atlas Scientific, 2025. pH Kit. https://files.atlas-scientific.com/pH_probe.pdf [Son erişim tarihi: 03.07.2025].
- Atmel, 2016. ATmega324P/V DataSheet. https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42743-ATmega324P_Datasheet.pdf [Son erişim tarihi: 03.07.2025].
- Balbuena, J., Quiroz, D., Song, R., Bucknall, R., ve Cuellar, F., 2017. Design and implementation of an USV for large bodies of fresh waters at the highlands of Peru. *OCEANS 2017-Anchorage*, ss. 1-8, 18-21 Eylül, Anchorage, AK, USA.
- Bangira, T., Matongera, T. N., Mabhaudhi, T. ve Mutanga, O., 2024. Remote sensing-based water quality monitoring in African reservoirs, potential and limitations of sensors and algorithms: A systematic review. *Physics and Chemistry of the Earth*, 134, 103536.

- Bautista, A. J. C., Cruz, A. D. T., Adams, J. A. S. ve Giron, E. L. C., 2022. Development of Arduino Based Autonomous Navigation Platform for Water Monitoring Boat Prototype. 2022 8th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR) ss. 237-241, 08-10 Mayıs, Xiamen, China.
- Bayusari, I., Adawiyah, N. A., Dwijayanti, S., Hikmarika, H., Husin, Z., ve Suprpto, B. Y., 2021. Water quality monitoring system in autonomous underwater vehicle based on internet of things (IoT). 8th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI), ss. 328-334, 20-21 Ekim, Semarang, Indonesia.
- Benzouai, S., Houma, F., Belkessa, R., Zerouali, K., ve Boufeniza, R. L., 2015. Using GIS for spatio-temporal assessment of some physicochemical parameters in the bay of Algiers. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), ss 4526-4529, 26-31 Temmuz, Milan, Italy.
- Bijjahalli, S., Sabatini, R. ve Gardi, A., 2020. Advances in intelligent and autonomous navigation systems for small UAS. *Progress in Aerospace Sciences* 115, 100617.
- Boatsmart, 2025. Boating Knowledge Base. <https://www.boatsmartexam.com/knowledge-base/article/boat-hull-types/> [Son Erişim Tarihi: 03.07.2025].
- Bukhair, M. S., Tufail, S. M., Sultan, S. ve Ansari, M. Z., 2023. Development of Cloud-based Water Quality Monitoring System. *Journal of Artificial Intelligence and Computing*, 1(1), pp. 23-29.
- Burrough, P. A., McDonnell, R. A., Lloyd, C. D., 2015. Principles of geographical information systems. Oxford university press, United Kingdom, ss. 147-200
- Bray, N., Boeding, M., Hempel, M., Sharif, H., Heikkilä, T., Suomalainen, M. ve Seppälä, T., 2024. A latency composition analysis for telerobotic performance insights across various network scenarios. *Future Internet*, 16(12), 457.
- Caccia, M., Bibuli, M., Bono, R., Bruzzone, G., Bruzzone, G., Spirandelli, E., 2009. Aluminum hull USV for coastal water and seafloor monitoring. OCEANS 2009-EUROPE, ss. 1-5, 11-14 Mayıs, Bremen, Germany.
- Cao, H., Guo, Z., Gu, Y. ve Zhou, J., 2018. Design and implementation of unmanned surface vehicle for water quality monitoring. IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), ss. 1574-1577, 12-14 Ekim, Chongqing, China.
- Chang, H. C., Hsu, Y. L., Hung, S. S., Ou, G. R., Wu, J. R., ve Hsu, C., 2021. Autonomous water quality monitoring and water surface cleaning for unmanned surface vehicle. *Sensors*, 21(4), 1102.

- Chen, F.-W., Liu, C.-W., 2012. Estimation of the spatial rainfall distribution using inverse distance weighting (IDW) in the middle of Taiwan. *Paddy and Water Environment*, 10, 209–222
- Chen, L., Liu, L., Liu, S., Shi, Z., Shi, C., 2025. The Application of Remote Sensing Technology in Inland Water Quality Monitoring and Water Environment Science: Recent Progress and Perspectives. *Remote Sensing*, 17(4), 667.
- Chen, F. L., Yang, B. C., Peng, S. Y., Lin, T. C., 2020. Applying a deployment strategy and data analysis model for water quality continuous monitoring and management. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 16(6), 1550147720929825.
- Chen, W., Hao, X., Yan, K., Lu, J., Liu, J., He, C., Zhou, F., ve Xu, X., 2021. The Mobile Water Quality Monitoring System Based on Low-Power Wide Area Network and Unmanned Surface Vehicle. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2021(1), 1609612.
- Childs, C., 2004. Interpolating surfaces in ArcGIS spatial analyst. <https://www.esri.com/news/arcuser/0704/files/interpolating.pdf> [Son erişim tarihi: 03.07.2025].
- Chiles, J. P., Delfiner, P., 2012. Geostatistics: modeling spatial uncertainty. John Wiley ve Sons, Canada.
- Clark, I., 1979. Background information about Practical Geostatistics. <http://www.kriging.com/PG1979/> [Son erişim tarihi: 03.07.2025].
- Darmawan, Y., Munawar, M., Atmojo, D. A., Wahyujati, H., ve Nainggolan, L., 2023. Accuracy assessment of spatial interpolations methods using ArcGIS., E3S Web Conf, 09005, 18 Kasım.
- Dash, P. K., Miller, B. A., Panigrahi, N., ve Mishra, A., 2024. Exploring the Effect of Sampling Density on Spatial Prediction with Spatial Interpolation of Multiple Soil Nutrients at a Regional Scale. *Land*, 13(10), 1615.
- de Lima, R. L. P., Boogaard, F. C. ve de Graaf-van Dinther, R. E., 2021. Innovative water quality and ecology monitoring using underwater unmanned vehicles: field applications, challenges and feedback from water managers. *Water*, 12(4), 1196.
- DeepChand, K. N. A., Saxena, P. ve Goyal, S. K., 2022. Assessment of Supply Water Quality Using GIS Tool for Selected Locations in Delhi—A Case Study. *Air, Soil and Water Research*, 15, 11786221221111935.
- Dhal, S. B., Singh, R., Pandey, T., Dey, S., Kalafatis, S., ve Kesireddy, V., 2024. Modeling Sea Level Rise Using Ensemble Techniques: Impacts on Coastal Adaptation, Freshwater Ecosystems, Agriculture and Infrastructure. *Analytics*, 3(3), 276-296.

- Digi, 2025. XBee/XBee-PRO S2C Zigbee RF Module User Guide. <https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/pdfs/90002002.pdf> [Son erişim tarihi: 03.07.2025].
- Dow, C., 2024. Internet of Things Programming Projects: Build Exciting IoT Projects Using Raspberry Pi 5, Raspberry Pi Pico, and Python. Packt Publishing, Birmingham, UK.
- Dsouza, V. L., Dsouza, S. F., Sarosh, M., Kukkilaya, S., Chilimbi, V., ve Fernandes, S. R., 2021. Remotely controlled boat for water quality monitoring and sampling. *Materials Today:Proceeding*, 47, 2391-2400.
- Duran, H. Yücel, F., 2021. Kablosuz Algılayıcı Ağları Yöntemi ile Su Parametrelerini İzleyen Veri Toplama Sistemleri, International Integrated Pollution Prevention and Control Symposium ss. 33-41, 01-03 Nisan, Karabük.
- Etezadi, H., Eshkabilov, S., 2024. A comprehensive overview of control algorithms, sensors, actuators, and communication tools of autonomous all-terrain vehicles in agriculture. *Agriculture*, 14(2), 163.
- Faisal, A., Kamruzzaman, M., Yigitcanlar, T. ve Currie, G., 2019. Understanding autonomous vehicles: A systematic literature review on capability, impact, planning and policy. *Journal of Transport and Land Use*, 2(1), 45-72.
- Ferchichi, H., St-Hilaire, A., Ourda, T. B. M. J. ve Levesque, B., 2021. Impact of the future coastal water temperature scenarios on the risk of potential growth of pathogenic *Vibrio* marine bacteria. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 250, 10794.
- Franke, R. 1982. Smooth Interpolation of Scattered Data by Local Thin Plate Splines. *Computer and Mathematics with Applications*. 8 (4). 273–281.
- Gopalakrishnan, A., Gururajan, R., Zhou, X., Venkataraman, R., Chan, K. C., ve Higgins, N., 2024. A survey of autonomous monitoring systems in mental health. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery* 14(3), e1527.
- Guardeño, R., López, M. J., Sánchez, J. ve Conseglere, A., 2020. AutoTuning environment for static obstacle avoidance methods applied to USVs. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(5), p. 300.
- Guo, Q., Li, W., Yu, H., ve Alvarez, O., 2010. Effects of topographic variability and lidar sampling density on several DEM interpolation methods. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 76(6), 701-712.
- Gündüz Kimya, 2025. pH Kalibrasyon Sıvıları. <https://www.gunduzkimya.com.tr/urun-kategori/kalibrasyon-solusyonlari/ph-kalibrasyon-sivilari/> [Son erişim tarihi: 03.07.2025].

- Ha, S. W., Lee, Y. K., Vu, T. H. N., Jung, Y. J., Ryu, K. H., 2012. An environmental monitoring system for managing spatiotemporal sensor data over sensor networks. *Sensors*, 12(4), 3997-4015.
- Honeywell, 2025. 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L. <https://www.farnell.com/datasheets/1683374.pdf> [Son erişim tarihi: 03.07.2025].
- Hussein, A. K., Kadhim, N. A., Jaber, A. S. ve Abojassim, A. A., 2020. Water quality index for surface water assessment by using GIS techniques, Alnajaf, Kufa, Iraq. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 072023, 15-16 Temmuz, Thi-Qar, Iraq
- Idris, M. H. B. M., Kamarudin, M. A. A. B. C., Sahalan, M. I., Abidin, Z. B. Z., & Rashid, M. M., 2016. Design and development of an autonomous surface vessel for inland water depth monitoring. 2016 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE), ss. 177-182, 26-27 Temmuz, Lumpur, Malaysia
- Ingebrigtsen, E., 2015. SignalR: Real-time Application Development. Packt Publishing Ltd. Birmingham, UK.
- Isa, A. R. M., Yusoff, I. M. ve Rahman, R. A., 2024. Lake water quality assessment through gis based interpolation method: a case study of Beris dam, Kedah, Malaysia. *Trends in sciences*, 21(4), 1-16.
- Jiang, X., Kuroiwa, T., Cao, Y., Sun, L., Zhang, H., Kawaguchi, T., ve Hashimoto, S., 2025. Enhanced Pure Pursuit Path Tracking Algorithm for Mobile Robots Optimized by NSGA-II with High-Precision GNSS Navigation. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 25(3), 745.
- Jo, W., Hoashi, Y., Aguilar, L. L. P., Postigo-Malaga, M., Garcia-Bravo, J. M., ve Min, B. C., 2019. A low-cost and small USV platform for water quality monitoring. *HardwareX*, 6(e00076).
- Kaizu, Y., Iio, M., Yamada, H. ve Noguchi, N., 2011. Development of unmanned airboat for water-quality mapping. *Biosystems engineering*, 109(4), 338-347.
- Kao, K.-C., Cheieng, W.-H. ve Jeng, S.-L., 2018. Design and development of an IoT-based web application for an intelligent remote SCADA system. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 01202 24-26 Kasım, Dubai, UAE.
- Katsouras, G., Dimitriou, E., Karavoltsos, S., Samios, S., Sakellari, A., Mentzafou, A., Tsalas, N., ve Scoullou, M., 2024. Use of Unmanned Surface Vehicles (USVs) in Water Chemistry Studies. *Sensors*, 24(9), 2809.

- Kawahito, S., Seo, M. W., 2016. Noise reduction effect of multiple-sampling-based signal-readout circuits for ultra-low noise CMOS image sensors. *Sensors*, 16(11), 1867.
- Khorrami, B. ve Gündüz, O., 2019. Aylık Ortalama Yağış İçin Jeostatistiksel İnterpolasyon Tekniklerine Dayalı Geliştirilmiş Mekansal Varyasyon Deseni: İzmir-Türkiye'den Örnek Bir Çalışma. 10. Ulusal Hidroloji Kongresi, ss.1-13, 9-12 Ekim, Muğla-Türkiye.
- Khouni, I., Louhichi, G. ve Ghrabi, A., 2021. Use of GIS based Inverse Distance Weighted interpolation to assess surface water quality: Case of Wadi El Bey, Tunisia. *Environmental Technology ve Innovation*, 24, 101892.
- Kim, H., Koo, J., Kim, D., Park, B., Jo, Y., Myung, H., ve Lee, D., 2019. Vision-based real-time obstacle segmentation algorithm for autonomous surface vehicle. *IEEE Access*, 7, 179420-179428.
- Kong, S., Tian, M., Qiu, C., Wu, Z., ve Yu, J., 2020. IWSCR: An intelligent water surface cleaner robot for collecting floating garbage. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 51(10), 6358-6368.
- Kufoalor, D. K. M., Johansen, T. A., Brekke, E. F., Hepsø, A., ve Trnka, K., 2020. Autonomous maritime collision avoidance: Field verification of autonomous surface vehicle behavior in challenging scenarios. *Journal of Field Robotics*, 37(3), 387-403.
- Kurunc, A., Ersahin, S., Sonmez, N. K., Kaman, H., Uz, I., Uz, B. Y., ve Aslan, G. E., 2016. Seasonal changes of spatial variation of some groundwater quality variables in a large irrigated coastal Mediterranean region of Turkey. *Science of The Total Environment*, 554, 53-63.
- Lateef, Z. Q., Al-Madhhachi, A.-S. T. ve Sachit, D. E., 2020. Evaluation of water quality parameters in Shatt Al-Arab, Southern Iraq, using spatial analysis. *Hydrology*, 7(4), 79.
- LDRobot, 2025. Super Mini DTOF Principle Lidar. https://www.debix.io/Uploads/Temp/file/20220921/LDrobot_LD06_Datasheet.pdf [Son erişim tarihi: 03.07.2025].
- Leong, P. Y., Ahmad, N. S., 2024. LiDAR-based obstacle avoidance with autonomous vehicles: A comprehensive review. *IEEE Access*. 12, 164248-164261.
- Li, J. ve Heap, A. D., 2008. A review of spatial interpolation methods for environmental scientists. *Geoscience Australia*, 23, 137-145.

- Liang, Q., Nittel, S., Whittier, J. C., ve De Bruin, S., 2018. Real-time inverse distance weighting interpolation for streaming sensor data. *Transactions in GIS*, 22(5), 1179-1204.
- Liang, X., Wang, P., Zhang, X., Wen, B., Li, X., Tian, X., 2022. Multi-objective robust energy management for environment powered unmanned surface vehicles. *Ocean Engineering*, 247, 110624.
- Liu, Z., Zhang, Y., Yu, X., Yuan, C., 2016. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. *Annual Reviews in Control*, 41, 71-93.
- Lobo, F., Grael, D., Oliveira, H., Villas, L., Almehmadi, A., ve El-Khatib, K., 2019. Cooperative localization improvement using distance information in vehicular ad hoc networks. *Sensors*, 19(23), 5231.
- Madeo, D., Pozzebon, A., Mocenni, C. ve Bertoni, D., 2020. A low-cost unmanned surface vehicle for pervasive water quality monitoring. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(4), 1433-1444.
- Maliqi, E. ve Penev, P., 2019. Spatial representation of surface water monitoring and its assessment using geostatistical and non-geostatistical techniques in GIS. *Geodesy and cartography*, 45(4), 177-189.
- Martinez-Diaz, M. ve Soriguera, F., 2018. Autonomous vehicles: theoretical and practical challenges. *Transportation research procedia*, 33, 275-282.
- Medavarapu S.V, 2022, Real-Time Applications with Blazor and SignalR, *Journal of Artificial Intelligence, Machine Learning and Data Science*, 1(1), 1-5
- Melo, M., Mota, F., Albuquerque, V., Alexandria, A., 2019. Development of a robotic airboat for online water quality monitoring in lakes. *Robotics*, 8(1), 19.
- Microsoft Azure SignalR Service, 2025. Performance guide for Azure SignalR Service. https://learn.microsoft.com/en-us/azure/azure-signalr/signalr-concept-performance?utm_source=chatgpt.com [Son erişim tarihi: 03.07.2025].
- Miura, A., Parra, L., Lloret, J. ve Catala-Icardo, M., 2023. UV Absorption Spectrum for Dissolved Oxygen Monitoring: A Low-Cost Proposal for Water Quality Monitoring. *Photonics*, 10(12), 1336.
- Moulton, J., Karapetyan, N., Bukhsbaum, S., McKinney, C., Malebary, S., Sophocleous, G., Li, A.Q., ve Rekleitis, I., 2018. An autonomous surface vehicle for long term operations. OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston, ss. 1-10, 22-25 Ekim, Charleston, SC, USA
- Muhib, I. ve Kabir, H., 2021. Should optimum ph range for different surface water become fluctuate with usage and condition in perspective of aquatic environment

- and human health effects?. *American International Journal of Nursing Education and Practice*, 2(1), 19-22.
- Mukta, M., Islam, S., Barman, S. D., Reza, A. W., & Khan, M. S. H., 2019. IoT based smart water quality monitoring system. *IEEE 4th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS)*, ss. 669-673, 23-24 Şubat, Singapore.
- Murphy, R. R., Curriero, F. ve Ball, W. P., 2010. Comparison of spatial interpolation methods for water quality evaluation in the Chesapeake Bay. *Journal of Environmental Engineering*, 136(2), 160-171.
- Muthulakshmi, A., Natesan, U., Ferrer, V.A, Deepthi, K., Venugopalan. V. P., ve Narasiman, S. V., 2015. GIS based spatial distribution of Temperature and Chlorophyll-a along Kalpakkam, southeast coast of India. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 5(5), 121-126.
- O'Donnell, D., Rushworth, A., Bowman, A. W., Marian Scott, E., ve Hallard, M., 2014. Flexible regression models over river networks. *Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics*, 63(1), 47-63.
- Özşahin, E., 2013. CBS kullanılarak su kalitesinin dağılışı ve değerlendirilmesi: Cevizli Dere Havzası (Tekirdağ) örneği. *Electronic Turkish Studies*, 8(12).
- Pebesma, E., Dubois, G., ve Cornford, D., 2008. The Challenge of Real-Time Automatic Mapping for Environmental Monitoring Network Management. *geoENV VI – Geostatistics for Environmental Applications. Quantitative Geology and Geostatistics*, 15, ss. 467–475, Springer, Dordrecht.
- Peeters, R., Vanderschaeghe, H., Rongé, J., Martens, J. A., 2020. Energy performance and climate dependency of technologies for fresh water production from atmospheric water vapour. *Environmental Science: Water Research ve Technology*, 6(8), 2016-2034.
- Python, 2025. What is Python? Executive Summary. <https://www.python.org/doc/essays/blurb/> [Son erişim tarihi: 03.07.2025].
- Rashid, M. M., Roy, R., Ahsan, M. M., ve Siddique, Z., 2022. Design and development of an autonomous surface vehicle for water quality monitoring. *arXiv preprint arXiv:2201.10685*.
- Raspberry Pi, 2025. Raspberry Pi 4 Model B Datasheet. <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-datasheet.pdf> [Son erişim tarihi: 03.07.2025].

- Reis, J., Cohen, Y., Melão, N., Costa, J., ve Jorge, D., 2021. High-Tech Defense Industries: Developing Autonomous Intelligent Systems. *Applied Sciences*, 11(11), p. 4920.
- Roshanianfard, A., Noguchi, N., Okamoto, H. ve Ishii, K., 2020. A review of autonomous agricultural vehicles (The experience of Hokkaido University). *Journal of Terramechanics*, 91, 155-183.
- Ryu, J. H., 2022. Prototyping a low-cost open-source autonomous unmanned surface vehicle for real-time water quality monitoring and visualization. *HardwareX*, 12, e00369.
- Sambridge, M., Braun, J. ve McQueen, H., 1995. Geophysical parametrization and interpolation of irregular data using natural neighbours. *Geophysical Journal International*, 3(122), 837-857.
- Santos, L., Countinho-Rodriguse, J. ve Antunes, C. H., 2011. A web spatial decision support system for vehicle routing using Google Maps. *Decision Support Systems*, 51(1), 1-9.
- Semiconductor, D., 2024. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire®Digital Thermometer. <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temp/DS18B20.pdf> [Son erişim tarihi: 03.07.2025].
- Setiawan, J. D., Ihsan, M. S., Saputro, R., Munadi, M., Paryanto, P., ve Alimi, S., 2022. Evaluation and development of wireless monitoring systems for an autonomous sailboat. *Journal of Physics: Conference Series*, 2193, 012050, 2 Kasım, Medan, Indonesia.
- Setiawan, J. D., Septiawan, M. A., Ariyanto, M., Caesarendra, W., Munadi, M., Alimi, S., ve Sulowicz, M., 2022. Development and Performance Measurement of an Affordable Unmanned Surface Vehicle (USV). *Automation*, 3(1), 27-46.
- Sheehan, K. R. ve Welsh, S. A., 2009. An interpolation method for stream habitat assessments. *North American Journal of Fisheries Management*, 29(1), 1-9.
- Shepard, D., 1968. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference*, ss. 517-524, New York, NY, USA.
- Shuo, J., Yonghui, Z., Wen, R. ve Kebin, T., 2017. The unmanned autonomous cruise ship for water quality monitoring and sampling. *International Conference on Computer Systems, Electronics and Control (ICCSEC)*, ss. 700-703, 25-27 Aralık, Dalian, China

- SIMCom, 2025. SIM7600G-H, SIM7600G-H miniPCIE User manual. <https://www.tme.eu/Document/dd9ef0ab4024b6aae1366a3daad4b123/SIM7600G-H.pdf> [Son erişim tarihi: 03.07.2025].
- Singh, J. B., Vijayalakshmi, S. ve Sushmitha, S., 2021. Cloud based analysis of Drinking Water quality parameters. International Conference on Recent Trends in Computing (ICRTCE-2021), 1979(1), 012053, 20-21 Mayıs, Maharashtra, India.
- Singh, P. ve Verma, P., 2019. A comparative study of spatial interpolation technique (IDW and Kriging) for determining groundwater quality. *GIS and geostatistical techniques for groundwater science*, pp. 43-56.
- Siyang, S. ve Kerdcharoen, T., 2016. Development of unmanned surface vehicle for smart water quality inspector. 13th International conference on electrical engineering/electronics, computer, telecommunications and information technology (ECTI-CON), ss. 1-5, 28 Haziran-1 Temmuz, Chiang Mai, Thailand,
- Souissi, S., Boukattaya, M., Damak, T. ve Nejim, S., 2020. Adaptive control for fully-actuated autonomous surface vehicle with uncertain model and unknown ocean currents. *Ocean Engineering*, 217, 108147.
- Stateczny, A. ve Burdziakowski, P., 2019. Universal autonomous control and management system for multipurpose unmanned surface vessel. *Polish Maritime Research*, 26, 30-39.
- Steccanella, L., Bloisi, D. D., Castellini, A. ve Farinelli, A., 2020. Waterline and obstacle detection in images from low-cost autonomous boats for environmental monitoring. *Robotics and Autonomous Systems*, 124, 103346.
- Sun, H., Wang, L., Li, D., Wang, C. 2025. AUV Plane Track Tracking Control Algorithm Based on Three Closed Loops. International Conference on Applied Mathematics and Digital Simulation (AMDS 2024), 3004 (1), 012089, 31 Aralık, Wuhan, China.
- Tanjung, M., Syahreze, S. ve Rusdi, M., 2020. Comparison of interpolation methods based on Geographic Information System (GIS) in the spatial distribution of seawater intrusion. *Jurnal Natural*, 2(20), 24-30.
- Tayyab, M., Aslam, R. A., Farooq, U., Ali, S., Khan, S. N., Iqbal, M., Khan, M. I., Saddique, N., 2024. Comparative Study of Geospatial Techniques for Interpolating Groundwater Quality Data in Agricultural Areas of Punjab, Pakistan. *Water*, 16(1), 139.
- TEMA, 2025. Suyun Dağılımı. <https://sutema.org/suyun-dagilimi> [Son erişim tarihi: 03.07.2025].

- Theobald, D. M., Stevens, D. L., White, D., Urquhart, N. S., Olsen, A. R., Norman, J. B., 2007. Using GIS to generate spatially balanced random survey designs for natural resource applications. *Environmental Management*, 40, 134-146.
- Thirstrup, C. ve Deleebeeck, L., 2021. Review on Electrolytic Conductivity Sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70, 1-22.
- TUDAV, 2025. İklim Değişikliği ve Denizler Raporu. <https://tudav.org/calismalar/iklim-degisikligi/iklim-degisikligi-ve-denizler-raporu/> [Son Erişim Tarihi: 03.07.2025].
- Tyschuk, Y., Vertegel, V., Nikiforov, S., ve Nesterenko, A., 2023. Development and Implementation of a Remote-Control System for an Unmanned Research Small Vessel. *Transportation Research Procedia*, 68, 395-401.
- U.S. Ocean Acidification Interagency Working Group 2014. Global positioning system (GPS) standard positioning service (SPS) performance analysis report. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) 1 Nisan- 20 Haziran, DC, USA.
- Ublox, 2025. NEO-M8. https://www.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8-FW3_DataSheet_UBX-15031086.pdf [Son erişim tarihi: 03.07.2025].
- Vasudevan, G. ve Kumar, B. S., 2015. Embedded based real time monitoring and detection of bacterial contamination in drinking water using ORP measurement. *SSRG International Journal of Electronics and Communication Engineering*, 2 (9), 1-4
- Venkataraman, T. ve Manikumari, N., 2019. Spatial distribution of water quality parameters with using GIS. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 2278-3075.
- Villa, J., Aaltonen, J. ve Koskinen, K., 2020. Path-following with LiDAR-based obstacle avoidance of an unmanned surface vehicle in. *IEEE/ASME Trans. Mechatron*, 25, 1812-1820.
- Wang, H., Guo, F., Yao, H. ve He, S. X. X., 2019. Collision avoidance planning method of USV based on improved ant colony optimization algorithm. *IEEE Access*, 7, 52964-52975.
- Wang, W., Liu, Y., Chen, Y., Chunhua, L., 2023. Optimization-based duty cycle allocation for a five-leg inverter to drive two electric motors. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 38(9), ss.11327-11337
- Water Science School, 2018. Where is Earth's Water? <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/where-earths-water> [Son Erişim Tarihi: 03.07.2025].

- Wright, R. G., 2020. Unmanned and autonomous ships: an overview of mass. New York: Routledge.
- Xing, A., Fang, J., Gao, M. ve Zhang, C., 2020. Design of an unmanned boat system for floating garbage salvage and water quality monitoring based on OneNET. The 2020 International Symposium on Electronic Information Technology and Communication Engineering, 1607 (1), 012062, 19-21 Haziran, Jinan, China
- Yang, X., Xie, X., Liu, D. L., Ji, F., ve Wang, L., 2015. Spatial Interpolation of Daily Rainfall Data for Local Climate Impact Assessment over Greater Sydney Region. *Advances in Meteorology*, 1, 563629.
- Yiheng, C. ve Dawei, H., 2018. Water quality monitoring in smart city: A pilot project. *Automation in Construction*, 89, 307-316.
- Zhang, B., Li, Y., Liang, Y., 2017. Impact of Packet Size on Performance of TCP traffic with Small Router buffers. MATEC Web of Conferences, s. 02023, 25 Ekim.
- Zhang, D., Chu, X., Liu, C., He, Z., Zhang, P., ve Wu, W., 2024. A review on motion prediction for intelligent ship navigation. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(1), 107.
- Zhartybayeva, M., Serik, N., Nurzhanova, A., Rakhimov, R., ve Tulegenova, S., 2024. Development of an integrated approach to the analysis and forecast of hydrographic and bathymetric data of water bodies and tailings ponds. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 127(10).
- Zhu, K., Deng, C., Zhang, F., Kang, H., Wen, Z., ve Guo, G., 2023. A multi-source fusion navigation system to overcome gps interruption of unmanned ground vehicles. *IEEE Access*, 11, 61070-61081.
- Zhu, X., Kong, S., Yan, K., ve Yue, Y., 2019. 4G-based Remote Manual Control for Unmanned Surface Vehicles. Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Science and Application Engineering (CSAE '19), s. 1-6, 22-24 Ekim, New York, NY, USA.

ÖZGEÇMİŞ

Hüseyin DURAN

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora	Akdeniz Üniversitesi
2021-2025	Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Anabilim Dalı, Antalya
Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2019-2021	Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Anabilim Dalı, Antalya
Ön Lisans	Anadolu Üniversitesi
2019-2021	Açıköğretim Fakültesi/Coğrafi Bilgi Sistemleri, Eskişehir
Lisans	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
2002-2007	Eğitim Fakültesi/Bilgisayar ve Öğretim Teknolojileri Öğretmenliği, Eskişehir

ESERLER

Diğer dergilerde yayınlanan makaleler

Duran, H., ve Sönmez, N.K. (2025). Unmanned Surface Vehicles Developed for Water Quality. Bilge International Journal of Science and Technology Research, 9(2). <https://doi.org/10.30516/bilgesci.1669169>.

Hakemli kongre/sempozyumların bildiri kitaplarında yer alan yayınlar

Duran H., Yücel F., (2022). Kablosuz Algılayıcı Ağı Yöntemi ile Deniz Suyu Parametrelerinin Konumsal Olarak İzlenmesi için Durum İzleme Sistemi, 5. Ulusal Deniz Bilimleri Konferansı, Trabzon, Türkiye, 02 Haziran 2022, ss.167

Duran H., Yücel F., (2021). Kablosuz Algılayıcı Ağları Yöntemi ile Su Parametrelerini İzleyen Veri Toplama Sistemleri, International Integrated Pollution Prevention and Control Symposium, Karabük, Türkiye, 1 - 03 Nisan 2021, ss.33-41, (Tam Metin Bildiri)