

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOK MAKSATLI ÖLÇEKLENEBİLİR
İNSANSIZ SU ALTI ARACI DİZAYNI

Sait Selim DANIŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gemi İnşaatı Ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı Ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Gültekin AVCI

Haziran, 2025

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇOK MAKSATLI ÖLÇEKLENEBİLİR İNSANSIZ SU
ALTI ARACI**

Sait Selim DANIŞ tarafından hazırlanan tez çalışması 26.06.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr.Öğr.Üyesi Ahmet Gültekin AVCI
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri (Asil)

Dr.Öğr.Üyesi Ahmet Gültekin AVCI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Fahri ÇELİK
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Cihad DELEN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Ahmet Gültekin AVCI sorumluluğunda tarafımda hazırlanan “Çok Maksatlı Ölçeklenebilir İnsansız Su Altı Aracı Dizaynı” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim

Sait Selim DANIŞ

TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanmasında her türlü bilgi, destek ve rehberliği sağlayan tez danışmanım Dr. Öğretim Üyesi Ahmet Gültekin AVCI'ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Çalışma sürecimde, lisans eğitimlerimizde bize kattığı Bilgisayar Destekli Tasarım dersleri ve kodlama becerilerimizi geliştiren vizyonu ile ufukumuzu açan Dr. Öğr. Üyesi Serdar Turgut İNCE'ye; CFD analizlerinde yol gösteren ve sualtı akış simülasyonları ile hesaplamalarımnda bana destek olan arkadaşım Batuhan DİKENLER'e şükranlarımı iletiyorum.

Ayrıca, tersane ortamında bana sensör montajı, kablolama ve donatım prosedürleri hakkında kılavuzluk eden ve sanayi tecrübelerini paylaştıkları için Tersan Tersanesi Dizayn Donatım Teçhiz Sorumlusu Murat KOÇAK'a ile Dizayn Donatım Şefi Koray DÜDÜKÇÜ'ye teşekkür ederim.

Yıldız Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi ailesine, akademik ve teknik donanımımı pekiştirdiği için minnettarım.

Bu tez sürecinde maddi ve manevi anlamda yanımda olan aileme, sabırları ve inançları için müteşekkirim. Özellikle bu çalışmanın her aşamasında cesaret veren sevgili annem Nadiye DANIŞ ve sevgili babam Osman DANIŞ'a, anlayış ve sabrı için teşekkürlerimi sunarım.

Haziran, 2025

Sait Selim DANIŞ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv
1 GİRİŞ	1
1.1 Problem Tanımı.....	1
1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı.....	2
1.3 Literatür Araştırması.....	3
1.3.1 Otonom Su Altı Araçlarının Tarihsel Gelişimi.....	3
1.3.1.1 Dünya Çapında Tarihsel Gelişim.....	3
1.3.1.2 Türkiye'deki Tarihsel Gelişim.....	4
1.3.2 AUV'lerin Kullanım Alanları.....	4
1.3.3 AUV'lerde Kullanılan Sensörler.....	6
1.3.4 AUV'lerde Enerji Sistemleri ve Batarya Teknolojileri.....	7
1.3.5 AUV'lerde Deniz Altı Haberleşme ve Veri Aktarımı.....	8
1.3.6 AUV'lerde Yapısal Tasarım ve Dayanım Analizleri.....	9
1.3.7 AUV'lerde Akışkanlar Dinamiği ve Hidrodinamik Performans.....	10
1.3.8 Modülerlik Yaklaşımı.....	11
1.3.9 Ölçeklenebilirlik Yaklaşımı.....	11
1.4 AUV Tasarım Çalışmaları.....	11
1.4.1 Massachusetts Institute of Technology (MIT) – Orca AUV.....	12
1.4.2 University of Florida AUV.....	13
1.4.3 Cornell University AUV.....	13

1.4.4 University of West Florida – Nautilus AUV.....	14
2 ÇOK MAKSATLI AUV TASARIM GEREKSİNİMLERİ VE ENTEGRASYONU	16
2.1 Görev Analizi ve Gereksinim Tanımlanması.....	17
2.1.1 İşlevsel Analiz.....	17
2.1.1.2 Görevlerin Alt İşlevlere Ayrılması.....	23
2.1.2 Görev Modellenmesi.....	33
2.1.3 Senaryo Analizi.....	39
2.2 Sensör Modülü Tasarımı ve Konfigurasyonu.....	42
2.2.1 Hareket ve Konumlama Sensörleri.....	43
2.2.2 Navigasyon ve Konum Belirleme Sensörleri.....	43
2.2.3 Haberleşme ve Kontrol Sensörleri / Modülleri.....	44
2.2.4 Göreve Özgü Algılama Sensörleri.....	45
2.2.5 Görev- Sensör Eşleştirme Stratejisi.....	46
2.3 Batarya ve Enerji Yönetimi Sistem Tasarımı.....	49
2.3.1 Batarya Sistemlerinin AUV'lerdeki Rolü.....	50
2.3.2 Elektriksel Güç İhtiyacının Formülasyonu ve Görev Bazlı Enerji Hesabı.....	51
2.3.3 Batarya Kapasitesinin Belirlenmesi ve Hücrel Yapılandırma.....	53
2.4 Tahrik Sistemi ve Pervane Tasarımı.....	69
2.4.1 Tahrik Sisteminin Bileşenleri.....	69
2.4.2 Görev Tabanlı Elektriksel İtki ve Pervane Seçimi.....	73
3 ÖLÇEKLENEBİLİR AUV TASARIM GEREKSİNİMLERİ	79
3.1. Parametrik Tasarımın Önemi ve Temelleri.....	80
3.2. Gövde Segmentasyonu: Bölümler Arası Fonksiyonel Ayrım.....	81
3.3. Matematiksel Eğri Tanımlamaları ve Denklemler.....	82
3.4. Parametrelerin Tanımlanması ve Sınırlandırılması.....	83

3.4.1 Modüler Gövde Uzunlukları.....	84
3.4.2 Profil Katsayıları ve Hidrodinamik Parametreler.....	90
3.5 Python Tabanlı Modüler Gövde Tasarımı Analiz Sonuçları.....	97
3.6 CFD Analizi ve Python Optimizasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması....	103
3.6.1 Model Tanımlamaları ve Geometri Hazırlığı.....	103
3.6.2 CFD Çözüm Ayarları.....	105
3.6.3 CFD Sonuçları ve Optimizasyon İle Karşılaştırılması.....	107
4 SONUÇ	111
KAYNAKÇA	119
A Burun ve Kuyruk Optimizasyonu Python Kodları	121
B Hidrostatik ve Direnç Hesaplamaları Python Kodları	123
C Ölçeklenebilir Gövde Optimizasyonu ve Hesaplamaları ile ilgili Python Kodlaması	126
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	128

SİMGE LİSTESİ

E_{batt}	Batarya enerji kapasitesi
E_{tot}	Batarya enerji kapasitesi toplam
α	Burun–kuyruk oranı
n_n, n_t	Burun ve kuyruk şekil katsayıları
R_p	Form (basınç) direnci
C_d	Form sürüklenme katsayısı
d	Gövde Çapı
l_n, l_t	Ham burun ve kuyruk uzunlukları
l_m	Ham orta modül uzunluğu
S	Islak yüzey alanı
ν	Kinematik viskozite
x_{iill}	Kıç (stern) yarımının geometrik referans noktası
ξ	Normalize edilmiş burun parametresi
ζ	Normalize edilmiş kuyruk parametresi
A_{proj}	Önden görülen projeksiyon alanı
y_{nose}	Pruva kesitindeki yatay (yarım) en
Re	Reynold sayısı
V	Seyir Hızı
ρ	Su yoğunluğu (Density)
R_f	Sürtünme direnci (Frictional resistance)
C_f	Sürtünme katsayısı
L_1, L_2, L_3	Toplam modül uzunlukları
k, ω	Türbülans kinetik enerji ve türbülans oranı

KISALTMA LİSTESİ

ADC	Analog-to-Digital Converter
ADL	Activities of Daily Life
AUV	Autonomous Underwater Vehicle
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFX	CFD simülasyon yazılımı
DVL	Doppler Velocity Log (Doppler Hız Ölçer)
IMU	Inertial Measurement Unit (Ataletsel Ölçüm Birimi)
INS	Inertial Navigation System
ITTC	International Towing Tank Conference
LBL	Long Baseline (Uzun Mesafe Akustik Konumlama Sistemi)
RTK	Real-Time Kinematic
SST	Shear Stress Transport
USBL	Ultra Short Baseline (Kısa Mesafe Akustik Konumlama Sistemi)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 MIT'nin Orca AUV'si [18].....	12
Şekil 1.2 Florida Üniversitesi'nin Subjugator AUV'si [19].....	13
Şekil 1.3 Cornell Üniversitesi'nin AUV'si [20].	14
Şekil 1.4 West Florida Üniversitesi'nin Nautilus'u [21].	15
Şekil 2.1 Bluefin serisi askeri AUV ürün portföyü [22].....	19
Şekil 2.2 AUV'lerde konumlama ve navigasyon sisteminin bileşenleri	27
Şekil 2.3 AUV'lerde görüntü işleme tabanlı hedef tanıma süreci	27
Şekil 2.4 AUV tabanlı çevresel veri toplama süreci.....	28
Şekil 2.5 Çok katmanlı görev yönetimi mimarisi ile AUV sistem yapısı	32
Şekil 2.6 Görev-işlev-donanım eşleştirmesiyle sistem mimarisi	33
Şekil 2.7 Görev akış diyagramı ve zamanlama şeması	35
Şekil 2.8 XML tabanlı görev tanımı ve hiyerarşik görev yapısı	36
Şekil 2.9 Enerji yetmezliği senaryosu ve risk matrisine dayalı yaklaşım	41
Şekil 2.10 Görev-sensör eşleşme matrisi.....	48
Şekil 2.11 Askerî görev enerji dağılımı.....	64
Şekil 2.12 Endüstriyel görev enerji dağılımı	67
Şekil 2.13 Çevresel görev enerji dağılımı	69
Şekil 2.14 Görev-elektiriksel itki gereksinim eşleştirme matrisi	75
Şekil 2.15 Hydrocean TA19S pervane modülü	77
Şekil 3.1 Burun profilleri ($n_n = 1-5$).....	91
Şekil 3.2 Kuyruk profilleri ($n_t = 1-5$)	94
Şekil 3.3 L_1, L_2, L_3 Uzunluklarına ait AUV Tasarımları	103
Şekil 3.4 Hesaplamalı sonlu hacim alanı.....	104
Şekil 3.5 CFD ile elde edilen L_1 modelinin yüzey basınç dağılımı.....	107
Şekil 3.6 L_1 modelinin yüzey yakınındaki akış hızı dağılımı	108
Şekil 3.7 CFD ile elde edilen L_2 modelinin yüzey basınç dağılımı.....	109
Şekil 3.8 CFD ile elde edilen L_3 modelinin yüzey basınç dağılımı.....	109
Şekil 3.9 L_3 modelinin yüzey yakınındaki akış hızı dağılımı.....	110
Şekil 4.1 L_1, L_2 ve L_3 yan profil kesitleri.....	112

Şekil 4.2 l_m modülünün eklenme şeması	112
Şekil 4.3 L_1 , L_2 ve L_3 modellerinin renkli render görüntüleri.....	113
Şekil 4.4 Rhino'da L_1 , L_2 ve L_3 konfigürasyonlarının görünümü.	114
Şekil 4.5 L_1 AUV görüntüsü.....	115
Şekil 4.6 L_2 AUV görüntüsü.....	115
Şekil 4.7 L_2 AUV görüntüsü.....	116



TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Görev türlerine göre AUV operasyonel gereksinimleri.....	23
Tablo 2.2 Görev türlerine göre alt işlev gereksinimlerinin dağılımı.....	26
Tablo 2.3 Ortak donanım bileşenleri ve görevlerdeki rolleri.....	29
Tablo 2.4 Yazılım modülleri ve özelleştikleri görev türleri.....	30
Tablo 2.5 Çok maksatlı AUV’lerde kullanılan modelleme dilleri.....	38
Tablo 2.6 Görev sırasında karşılaşılabilecek senaryolar.....	40
Tablo 2.7 Risk senaryoları, parametreler ve önerilen müdahale.....	42
Tablo 2.8 Görev türlerine göre sensör dağılımı.....	47
Tablo 2.9 Askeri göreve dayalı alt modlar.....	63
Tablo 2.10 Endüstriyel göreve dayalı alt modlar.....	66
Tablo 2.11 Çevresel göreve dayalı alt modlar.....	68
Tablo 3.1 Modüler gövde uzunluklarının hesaplanması (Örnek veriler).....	89
Tablo 3.2 Modüler parça uzunlukları ve toplam gövde boyları.....	98
Tablo 3.3 L ₁ Islak yüzey alanları.....	99
Tablo 3.4 L ₂ Islak yüzey alanları.....	99
Tablo 3.5 L ₃ Islak yüzey alanları.....	100
Tablo 3.6 Hidrodinamik direnç bileşenleri ve ıslak yüzey alanı sonuçları.....	102

Çok Maksatlı Ölçeklenebilir İnsansız Su Altı Aracı

Dizaynı

Sait Selim DANIŞ

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Gültekin AVCI

Bu tez çalışması, çok amaçlı görev gereksinimlerine uygun modüler ve ölçeklenebilir bir Otonom Su Altı Aracı (AUV) tasarımı ve entegrasyonunu kapsamlı şekilde ele almaktadır. Çevresel izleme, deniz tabanı haritalama, askeri keşif ve kirlilik değerlendirmesi olmak üzere dört temsili görev senaryosu incelenerek sistem gereksinimleri tanımlanmış ve alt sistem seçimi yönlendirilmiştir. Her senaryo için çok spektral kameralar, çok parametrelili su kalitesi sensörleri ve sonar dizileri gibi uygun sensör grupları; batarya kapasiteleri, enerji bütçeleri ve DC motorlar ile değişken pervane konfigürasyonlarını içeren tahrik seçenekleri belirlenmiştir. Gövde, burun, ve kuyruk olmak üzere üç bölümde parametrik matematiksel eğrilerle modellenmiş; modüler montaj ara yüzleri ve basınca dayanım kısıtlamaları göz önünde bulundurularak optimize edilmiştir. Sensör entegrasyon çalışmaları, iç hacim ve yük kütlelerini, ampirik form direnci katsayıları ile Reynolds sayısına dayalı sürtünme direnci tahminleri arasındaki dengeyi sağlayacak şekilde yürütülmüştür. Batarya sistemi tasarımında, görev süresine ilişkin gereksinimler ampirik enerji tüketim modelleriyle karşılanmış ve alternatif batarya paketlerinin hidrodinamik etkileri sayısal olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen modüler AUV mimarisinin farklı

görevler arasında hızlı yeniden konfigürasyon imkânı sunarak sensör yükü, enerji deposu ve hidrodinamik performans arasında optimal bir denge sağladığını göstermektedir. Ölçeklenebilir gövde tasarımı ise hem enerji verimliliğini artırmakta hem de yeterli yük kapasitesi sunmaktadır. Genel olarak bu çalışma, görev analizinden sensör, batarya ve tahrik entegrasyonuna kadar uzanan bütünlük bir tasarım ve optimizasyon çerçevesi sunarak esnek, çok amaçlı AUV mühendisliğine katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Otonom su altı aracı (AUV), çok görevli otonom su altı aracı, sensör entegrasyonu ,çevresel izleme, sualtı.



ABSTRACT

Multi-purpose Scalable Unmanned Underwater Vehicle Design

Sait Selim DANIŞ

Department of Naval Architecture and Marine Engineering
MSc. Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Ahmet Gültekin AVCI

This thesis comprehensively addresses the design and integration of a modular, scalable Autonomous Underwater Vehicle (AUV) tailored to multi-mission requirements. Four representative mission scenarios—environmental monitoring, seabed mapping, military reconnaissance, and pollution assessment were analyzed to define system requirements and guide subsystem selection. For each scenario, appropriate sensor suites (e.g., multispectral cameras, multiparameter water-quality probes, sonar arrays), battery capacities, energy budgets, and propulsion options (brushless DC motors with variable propeller configurations) were specified. The hull was parametrically modeled in three sections (nose, mid-body, and tail) using mathematical curves and optimized for modular assembly interfaces and pressure-resistance constraints. Sensor integration studies balanced internal volume and payload mass against empirically derived form drag coefficients and Reynolds-number based friction drag estimates. Battery system design incorporated mission endurance requirements via empirical energy-consumption models, and the hydrodynamic effects of alternative battery packages were evaluated numerically. Results demonstrate that the proposed modular AUV architecture enables rapid reconfiguration across diverse missions, achieving an optimal trade off between

sensor payload, energy storage, and hydrodynamic performance. The scalable hull design affords both enhanced energy efficiency and adequate payload capacity. Overall, this work presents an integrated design and optimization framework from mission analysis through sensor, battery, and propulsion integration that advances flexible, multi-purpose AUV engineering.

Keywords: Autonomous underwater vehicle (AUV), multi-mission AUV, sensor integration, environmental monitoring, underwater.



1.1 Problem Tanımı

Su altı araştırmaları ve operasyonları, giderek artan karmaşıklık ve çeşitlilik nedeniyle gelişmiş teknolojilere ihtiyaç duymaktadır. Otonom Su Altı Araçları (AUV'ler), insan müdahalesi olmadan görev yapabilme yetenekleri ve farklı derinliklerde operasyonel esneklik sunmaları sayesinde bu alanda önemli bir rol oynamaktadır. Ancak mevcut AUV tasarımları genellikle belirli bir görev profiline uygun olarak geliştirildiğinden, farklı operasyonel ihtiyaçlara cevap verme konusunda sınırlı kalmaktadır.

Bu durum, her yeni görev için özel tasarlanmış AUV'lerin üretilmesini gerektirmekte ve bu da üretim, bakım ve operasyon maliyetlerini önemli lde artırmaktadır. Örneğın, bilimsel veri toplama amacıyla optimize edilen bir AUV, askeri ya da endüstriyel operasyonlar için yetersiz kalabilmektedir. Ayrıca, mevcut AUV'lerin sabit gövde yapıları ve kısıtlı taşıma kapasiteleri, görev gereksinimlerine uygun sensör ve ekipman entegrasyonunu zorlaştırmaktadır.

Mevcut literatürde, ölçeklenebilir ve modüler bir yapıya sahip, çok amaçlı AUV tasarımlarına yönelik çalışmalar oldukça sınırlıdır. Günümüzde kullanılan AUV'ler genellikle belirli görevler için özelleştirilmiş olup, modülerlik ve ölçeklenebilirlik prensipleri henüz tam anlamıyla bu sistemlere entegre edilememiştir. Bu eksiklik, teknolojinin farklı kullanım alanlarına hızlı adapte olmasını zorlaştırmakta ve çok yönlü kullanım imkanlarını kısıtlamaktadır.

Bu nedenle, gövde boyutu ve taşıma kapasitesi operasyonel gereksinimlere göre ölçeklenebilen, farklı sensör ve ekipmanları modüler bir şekilde entegre edebilen, düşük maliyetli ve geniş kullanım yelpazesine sahip bir AUV tasarımına ihtiyaç duyulmaktadır. Böyle bir sistem, ticari, bilimsel ve askeri operasyonlarda daha esnek ve sürdürülebilir zmler sunarak mevcut problemlere yenilikçi bir alternatif sağlayacaktır.

1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tezin temel amacı, mevcut otonom su altı araçlarının (AUV) esneklik, modülerlik ve çok görevli kullanım özelliklerindeki yetersizliklere çözüm sunacak bir tasarım geliştirmektir. Hedeflenen tasarım, birden fazla görev türüne uyum sağlayabilecek, maliyet etkin ve ölçeklenebilir bir yapı sunarak deniz altı operasyonlarının daha geniş bir yelpazede ve etkin bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamaktır.

Tezde geliştirilecek olan AUV tasarımı, kullanıcı ihtiyaçlarına göre gövde boyutunun artırılabilir veya azaltılabilir bir yapıda olmasının yanı sıra, farklı sensörlerin ve ekipmanların kolayca eklenip çıkarılmasını mümkün kılacaktır. Böylece, AUV'nin bilimsel araştırmalar, çevresel gözlem, endüstriyel operasyonlar ve askeri uygulamalar gibi çok yönlü görevlerde kullanılabilmesi hedeflenmektedir. Tasarımın modüler yapısı, bu aracı çeşitli operasyonel ihtiyaçlara hızlı ve etkin bir şekilde adapte edilebilen bir platform haline getirecektir.

Bu amaca ulaşabilmek için, mühendislik hesaplamaları, yapısal analizler, enerji verimliliği, sensör ve ekipman entegrasyonu, derinlik dayanımı gibi teknik unsurlar detaylı bir şekilde ele alınacaktır. Aynı zamanda, bu özelliklerin su altı haberleşme ve bilgi aktarımı ile entegre edilerek etkin bir şekilde çalışması sağlanacaktır.

Bu çalışma, AUV tasarımına yönelik kapsamlı ve disiplinler arası bir yaklaşım benimsemektedir. Çalışmanın kapsamı, tasarım ve mühendislik çalışmaları, teknolojik entegrasyon ve kullanıcı odaklı çok görevli operasyonlar olmak üzere üç ana başlıkta incelenmektedir. İlk olarak, modüler ve ölçeklenebilir bir gövde yapısının tasarlanması ve bu tasarımın operasyonel gereksinimlere göre optimize edilmesi hedeflenmektedir. Aynı zamanda, farklı sensörlerin, batarya sistemlerinin ve ekipmanların entegrasyonunun sağlanması, derinlik dayanımı ve yapısal analizlerin gerçekleştirilmesi bu çalışmanın mühendislik boyutunu oluşturmaktadır.

İkinci olarak, geliştirilecek olan AUV'nin çok maksatlı görevlerde kullanılabilmesi için sensörlerin, iletişim sistemlerinin ve veri işleme mekanizmalarının tasarımla uyumlu hale getirilmesi gerekmektedir. Su altı haberleşme sistemleri ve bilgi

aktarım mekanizmalarının tasarım sürecine dahil edilmesi, aracın operasyonel kabiliyetlerini artıracaktır.

Son olarak, farklı kullanıcı gruplarının (örneğin bilimsel araştırmacılar, endüstriyel operatörler ve askeri personel) ihtiyaçlarını karşılamak üzere tasarımın esnek ve uyarlanabilir hale getirilmesi amaçlanmaktadır. Çevresel gözlemden arama-kurtarma faaliyetlerine kadar geniş bir görev yelpazesi için test ve değerlendirme süreçleri uygulanacaktır.

Bu çalışma, hem mevcut AUV tasarımlarına yeni bir bakış açısı kazandırmayı hem de sektörün artan gereksinimlerine cevap veren yenilikçi bir çözüm sunmayı hedeflemektedir. Elde edilen sonuçlar, yalnızca akademik bilgiye katkıda bulunmakla kalmayacak, aynı zamanda gerçek dünya uygulamaları için de rehberlik sağlayacaktır. Tezin, AUV teknolojisinin daha erişilebilir, maliyet etkin ve çok yönlü bir yapıya kavuşmasına öncülük etmesi beklenmektedir.

1.3 Literatür Araştırması

1.3.1 Otonom Su Altı Araçlarının Tarihsel Gelişimi

Otonom su altı araçları (AUV'ler), sualtı keşfi, bilimsel araştırmalar, askeri ve ticari operasyonlar gibi birçok alanda önemli bir yer edinmiştir. Tarihsel olarak, bu araçların geliştirilmesi, denizcilik ve mühendislik teknolojilerindeki ilerlemelere paralel olarak evrim geçirmiştir. AUV'lerin gelişimi, otonom sistemler, enerji depolama, sensör teknolojileri ve deniz altı haberleşme alanlarındaki yeniliklerle şekillenmiştir.

1.3.1.1 Dünya Çapında Tarihsel Gelişim

1950'lerde, denizcilik sektöründe ilk insansız su altı araçlarının askeri kullanım amaçlı olarak geliştirilmeye başlandığı; bu dönemde temel amacın denizaltı mayınlarının tespiti ve imhası olduğu belirtilmiştir. Aynı kaynakta, AUV'lerin sonraki evriminde ABD ve Avrupa ülkelerinin öncü olduğu; 1970'lerde otonomi seviyesini artıran algoritmalar ve sensör teknolojilerinin devreye girmesiyle modern AUV temellerinin atıldığı vurgulanmıştır [1].

1980'lerden itibaren enerji depolama sistemleri ve batarya teknolojilerindeki ilerlemelerin AUV'lerin operasyon süresi ve menzilini artırdığı; 2000'li yıllarda ise GPS tabanlı navigasyon, sonar ve lidar sistemleri gibi gelişmiş sensörlerin

entegrasyonu sayesinde AUV'lerin daha karmaşık görevleri başarıyla yerine getirebilir hale geldiği ifade edilmiştir [1].

AUV sistemlerinin genel tasarım ilkeleri ve çevresel algılama bileşenlerinin kullanımı üzerine yapılan bir çalışmada, bu sistemlerin çevresel farkındalık ve görev planlaması yeteneklerinin zamanla nasıl evrimleştiği detaylandırılmıştır. Aynı çalışmada, özellikle AUV tasarımlarında çevresel farkındalığı artırmaya yönelik sensör entegrasyonunun önemi vurgulanmaktadır [2].

1.3.1.2 Türkiye'deki Tarihsel Gelişim

Türkiye'de insansız su altı araçları (İSAA) ile ilgili çalışmalar, 2000'li yılların başlarından itibaren artış göstermiştir. Yapılan bir çalışmada, Türk savunma sanayiinin bu alana yönelik önemli yatırımlar gerçekleştirdiği ve AUV teknolojilerinin geliştirilmesine odaklandığı belirtilmiştir. Başlangıçta dışa bağımlı olarak yürütülen projelerin, 2010'lu yıllardan itibaren yerli üretim odaklı bir yaklaşıma evrildiği ifade edilmiştir. Bu süreçte TÜBİTAK destekli projeler ve üniversitelerde yürütülen araştırma faaliyetlerinin önemli rol oynadığı vurgulanmıştır. Yerli tasarımlar, özellikle askeri amaçlı mayın tespiti ve denizaltı gözetlemesi gibi uygulama alanlarında kullanılmaya başlanmıştır.[1]

1.3.2 AUV'lerin Kullanım Alanları

Bilimsel Araştırmalar: AUV'ler, deniz ekosistemlerinin incelenmesi, su altı topografyasının haritalanması ve çevresel değişimlerin izlenmesi gibi bilimsel çalışmalar için kritik öneme sahiptir.

Oşinografik Araştırmalar: AUV'ler, deniz sıcaklığı, tuzluluk, oksijen seviyeleri gibi parametrelerin ölçümünde kullanılır. Özellikle derin okyanuslardaki verilerin toplanması, insan erişiminin mümkün olmadığı yerlerde gerçekleştirilir.

Ekosistem Araştırmaları: Denizaltı ekosistemleri ve canlı türlerinin izlenmesi, AUV'ler sayesinde daha verimli hale gelir. Kamera ve sensörlerle, mercan resifleri ve derin deniz yaşamı detaylı şekilde belgelenebilir.

Buz Altı Araştırmaları: AUV'ler, kutup bölgelerinde buz altı yapılarının ve su kütlelerinin incelenmesi için ideal araçlardır. Özellikle küresel ısınmanın etkilerini anlamak için bu bölgelerde kullanılmaktadır.

Askeri Uygulamalar: AUV'ler, modern savunma sistemlerinin bir parçası olarak, düşük maliyetli ve etkili bir çözüm sunar. Askeri kullanımda öne çıkan alanlar şunlardır:

- **Mayın Tespiti ve İmhası:** AUV'ler, denizaltı mayınlarını tespit etmek ve güvenli bir şekilde etkisiz hale getirmek için yaygın olarak kullanılır.
- **İstihbarat ve Gözetim:** Düşman denizaltılarını veya gemilerini izlemek ve veri toplamak için kullanılır. Sessiz çalışabilme özelliği, bu görevlerde avantaj sağlar.
- **Denizaltı Savaşı:** AUV'ler, insansız denizaltı sistemlerinin bir parçası olarak, düşman gemilerine veya denizaltılarına karşı operasyonlarda kullanılabilir.

Endüstriyel ve Ticari Kullanımlar: AUV'ler, petrol ve doğalgaz arama, kablo döşeme ve denizaltı yapılarının denetimi gibi ticari uygulamalarda önemli bir rol oynar.

Denizaltı Yapılarının Denetimi: Petrol ve gaz platformlarının, boru hatlarının ve rüzgar türbinlerinin su altı yapılarının kontrolü AUV'ler sayesinde daha hızlı ve düşük maliyetli şekilde yapılabilir.

Kablo ve Boru Hatlarının İzlenmesi: Deniz altına döşenen fiber optik kablolar ve petrol boruları, AUV'lerle düzenli olarak kontrol edilir ve bakım planları optimize edilir.

Kaynak Keşfi ve Haritalama: Okyanus yatağındaki minerallerin, gaz hidratların ve diğer doğal kaynakların keşfinde kullanılır.

Çevresel İzleme: Çevresel olayların tespiti ve değerlendirilmesi için AUV'ler etkili bir çözüm sunar.

Kirlilik İzleme: AUV'ler, su kalitesinin izlenmesi, kirlilik kaynaklarının tespiti ve çevresel olayların değerlendirilmesi için kullanılır.

Deniz Taşımacılığı Güvenliği: Gemilerden sızan petrol veya kimyasal maddelerin yayılımını izlemek ve müdahale planlarını optimize etmek için AUV'ler görev yapar.

Arkeolojik ve Tarihi Çalışmalar: AUV'ler, batık gemiler ve su altı tarihi eserlerin keşfi ve korunmasında kullanılmaktadır.

Batık Gemilerin Araştırılması: AUV'ler, sonar ve kamera sistemleriyle batık gemilerin detaylı haritalarını oluşturur.

Tarihi Alanların Korunması: Su altındaki tarihi alanların belgelenmesi ve çevresel faktörlerden korunması için veri toplar.

Arama ve Kurtarma Operasyonları: AUV'ler, kaybolan deniz araçlarını veya uçak parçalarını bulmak gibi zorlu görevlerde etkin bir araçtır.

Uçak Enkazı Araştırmaları: Örneğin, AUV'ler Malezya Havayolları MH370 uçağının aranmasında önemli bir rol oynamıştır.

Deniz Kazaları: AUV'ler, deniz kazalarının nedenlerini araştırmak ve enkazı incelemek için kullanılabilir.

Eğitim ve Araştırma Geliştirme: AUV'ler, mühendislik ve teknoloji geliştirme projelerinde eğitim ve araştırma amaçlı kullanılmaktadır.

Akademik Araştırmalar: Üniversiteler ve araştırma kurumları, yeni sensörler, enerji sistemleri ve yazılımlar geliştirmek için AUV'leri kullanmaktadır.

Yarışmalar ve Teknoloji Gösterimleri: Uluslararası yarışmalarda AUV tasarımları sergilenmekte ve genç mühendislerin yaratıcılıklarını sergilemelerine olanak tanımaktadır.

1.3.3 AUV'lerde Kullanılan Sensörler

Otonom su altı araçlarında (AUV) kullanılan sensörler, çevresel farkındalık ve operasyonel yeteneklerin artırılmasında kritik rol oynamaktadır. Bu sensörler; navigasyon, konum kestirimi, veri toplama ve görev planlaması gibi temel fonksiyonları desteklemektedir. Sensörlerin doğru şekilde tasarlanması ve entegre edilmesi, aracın genel performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Yapılan bir çalışmada, modern AUV'lerde yaygın olarak kullanılan sensör türleri belirli kategorilere ayrılarak sınıflandırılmıştır [3].

- **Sonar Sensörleri:** Akustik dalgaları kullanarak sualtı nesnelere tespiti ve çevre haritalaması için kullanılır. Bilimsel araştırmalarda batimetrik haritalama ve nesne tespiti görevlerinde çok yaygın bir şekilde kullanılır. Özellikle derin deniz operasyonlarında sonar sensörlerinin önemi çok büyüktür.

- **Lidar Sensörleri:** Yüzey haritalaması ve hassas konum bilgisi sağlayan lidar sensörleri, genellikle sığ su operasyonlarında tercih edilmektedir. Yüksek çözünürlükte veri sağlamaları sayesinde nesnelerin ayrıntılı bir haritasını oluşturmada etkilidir.
- **Basınç ve Derinlik Sensörleri:** Hidrostatik basınçtan yola çıkarak aracın mevcut derinliğini hassas bir şekilde belirler. Bu sensörler, aracın derinlik stabilitesinin korunması ve dalış profillerinin optimize edilmesi için vazgeçilmezdir.
- **Inertial Measurement Unit (IMU):** İvme ölçerler ve jiroskoplardan oluşan IMU'lar, aracın yönelim ve ivme bilgilerini sağlar. Bu bilgiler, AUV'lerin navigasyon sistemlerinin hassasiyetini artırarak karmaşık rotalarda dahi stabil hareket etmelerini sağlar.
- **Manyetik Alan Sensörleri:** Sualtıdaki manyetik alan değişimlerini algılayarak manyetik anomalilerin tespiti için kullanılır. Savunma sanayii uygulamalarında, mayın tespiti gibi çok spesifik görevlerde önemlidir.
- **Kamera ve Optik Sensörler:** Sualtında görüntüleme ve video kayıt için kullanılır. Yüksek çözünürlükte görüntüler sağlayarak hem bilimsel araştırmalarda hem de ticari uygulamalarda kullanılır.

Sensörlerden elde edilen verilerin birleştirilmesi anlamına gelen sensör füzyonu, otonom su altı araçlarında konum kestiriminin doğruluğunu artıran önemli bir tekniktir. Genişletilmiş Kalman Filtresi (GKF) algoritması, farklı sensörlerden gelen verilerin bütünleştirilerek daha hassas konum kestirimi yapılmasını mümkün kılmaktadır. Özellikle derin su operasyonlarında bu algoritmanın etkin biçimde kullanılması, navigasyon doğruluğunu önemli ölçüde artırmaktadır [4].

1.3.4 AUV'lerde Enerji Sistemleri ve Batarya Teknolojileri

Otonom su altı araçlarının operasyonel etkinliği ve görev sürekliliği, enerji sistemlerinin performansına bağlıdır. Enerji depolama teknolojilerindeki gelişmeler, AUV'lerin uzun süreli görevler için uygun hale gelmesinde önemli bir rol oynamıştır. Bu bağlamda volan, lityum-iyon bataryalar ve hibrit enerji sistemleri gibi teknolojiler öne çıkmaktadır.

Volan ve lityum-iyon batarya sistemlerinin karşılaştırmalı olarak incelendiği bir çalışmada, bu iki enerji depolama teknolojisinin güç yoğunluğu, enerji yoğunluğu,

tepki süreleri ve maliyet açısından farklılıkları ele alınmıştır. Lityum-iyon bataryalar, yüksek enerji yoğunluğu ve uzun çevrim ömrü nedeniyle AUV uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Öte yandan, volan sistemleri yüksek güç taleplerine hızlı yanıt verebilme özellikleriyle öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, hibrit enerji depolama sistemleri, her iki teknolojinin avantajlarını birleştirerek farklı yük profillerine uyum sağlayabilen dengeli bir performans sunmaktadır [5].

Yakıt hücresi ve lityum-iyon batarya temelli hibrit bir güç sistemine yönelik yapılan başka bir çalışmada ise, söz konusu sistemin bir AUV üzerindeki uygulamaları değerlendirilmiştir. HOMER yazılımı kullanılarak yapılan enerji sistemi boyutlandırmasının yanı sıra, MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilen dinamik modelleme ile sistemin performansı analiz edilmiştir. 1 kW'lık bir yakıt hücresi ve 8 adet Li-ion bataryadan oluşan yapı ile 68 kWh'lık toplam enerji kapasitesine ulaşıldığı ve uzun süreli görevlerde sistemin etkinliğinin artırıldığı gösterilmiştir [6].

Enerji depolama teknolojilerinin temel prensipleri ve uygulama alanlarının ele alındığı bir çalışmada; kimyasal, elektrokimyasal, mekanik ve elektriksel enerji depolama yöntemleri avantaj ve dezavantajlarıyla birlikte sınıflandırılmıştır [7]. Lityum-iyon bataryaların AUV sistemlerinde yaygın olarak tercih edilmesinin başlıca nedenleri, bu teknolojilerin hafif yapısı, yüksek enerji yoğunluğu ve yüksek şarj verimliliğidir. Öte yandan, yakıt hücreleri, uzun süreli görevlerde enerji sürekliliği sağlama potansiyeli ile alternatif bir çözüm olarak değerlendirilmektedir [8].

1.3.5 AUV'lerde Deniz Altı Haberleşme ve Veri Aktarımı

Otonom su altı araçlarının (AUV) operasyonel başarısı, güvenilir bir deniz altı haberleşme sistemi ve etkin veri aktarımı altyapısına bağlıdır. Su altındaki iletişim, geleneksel radyo frekansı (RF) sinyallerinin su içinde sınırlı yayılımı nedeniyle akustik, optik ve elektromanyetik yöntemlere dayanır. Bu yöntemlerin her biri, farklı avantajlar ve zorluklar sunmaktadır.[9]

Otonom su altı araçlarında (AUV) kullanılan basınca dayanıklı gövdeler, derin sularda güvenli operasyonun sağlanmasında kritik bir rol oynamaktadır. Gövde tasarımının, hem yapısal dayanım hem de iç hacim verimliliği açısından optimize

edilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda yapılan bir çalışmada, kayar sertleştiricilerin kullanımıyla daha verimli bir basınçlı gövde tasarımının mümkün olduğu gösterilmiştir. Söz konusu yöntem, kaynaklı sertleştiricilerin neden olduğu artık gerilmeleri ortadan kaldırırken, üretim maliyetlerini azaltmakta ve iç hacmin daha etkin kullanılmasını sağlamaktadır. Ayrıca bu yaklaşımın, geleneksel halkalı sertleştirici sistemlerine kıyasla daha yüksek dayanım ve güvenilirlik sunduğu belirtilmiştir [9].

Basınca dayanıklı gövdelerin tasarımına yönelik yapılan bir çalışmada, teorik yaklaşımlar, Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) analizleri ve deneysel veriler doğrultusunda en iyi tasarım uygulamaları ele alınmıştır. Bu çerçevede, FEM analizlerinin gövde üzerindeki gerilme ve deformasyon dağılımlarını belirlemede etkili bir yöntem olarak öne çıktığı ifade edilmiştir [10].

1.3.6 AUV'lerde Yapısal Tasarım ve Dayanım Analizleri

Otonom su altı araçlarında (AUV) kullanılan basınca dayanıklı gövdeler, derinlikte güvenli operasyonun sağlanmasında kritik öneme sahiptir. Bu gövdelerin tasarımı, yapısal dayanımın yanı sıra iç hacim verimliliği bakımından da optimize edilmelidir. Bu doğrultuda, farklı tasarım yaklaşımları ve mühendislik analiz yöntemleri, yenilikçi çözümler geliştirmek amacıyla kullanılmaktadır [9].

Kayar sertleştirici konseptine dayanan bir çalışmada, bu yöntemin kaynaklı sertleştiricilerin neden olduğu artık gerilmeleri ortadan kaldırdığı, üretim maliyetlerini düşürdüğü ve iç hacmin daha etkin kullanımını sağladığı belirtilmiştir [9]. Ayrıca söz konusu tasarımın, geleneksel halkalı sertleştirici yapılarına kıyasla daha yüksek yapısal dayanım ve güvenilirlik sunduğu vurgulanmaktadır [9].

Basınca dayanıklı gövde tasarımına ilişkin başka bir çalışmada ise, teorik yöntemler, Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) analizleri ve deneysel veriler kullanılarak insansız su altı araçları için uygulanabilir en iyi tasarım stratejileri tartışılmıştır [10]. FEM analizlerinin, gövde üzerindeki gerilme ve deformasyon dağılımlarını belirlemede etkin bir araç olduğu gösterilmiştir [10]. Ayrıca bir yüksek lisans tezinde, yarışma amaçlı geliştirilen bir AUV'nin gövde tasarımı ve inşası ayrıntılı biçimde ele alınmış; bu kapsamda, hafif fakat dayanıklı malzeme seçimi ile yapısal karar süreçleri analiz edilmiştir [11].

AUV gövde tasarımında malzeme seçimi, üretim yöntemleri ve dayanım analizleri, aracın güvenilirliğini ve performansını artırmak için hayati önem taşımaktadır. Kayar sertleştiriciler gibi yenilikçi yöntemler, geleneksel tasarımlara kıyasla üretim sürecini optimize ederek daha yüksek verimlilik sunmaktadır [11].

1.3.7 AUV'lerde Akışkanlar Dinamiği ve Hidrodinamik Performans

Otonom su altı araçlarında (AUV) hidrodinamik performans, tasarım ve operasyonel etkinliği belirleyen kritik bir parametredir. Araç gövdesinin direnci, kaldırma kuvveti ve akış davranışlarının analizi, hem enerji verimliliği hem de manevra kabiliyeti açısından önem taşımaktadır. Bu bağlamda, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemleri, hidrodinamik katsayıların belirlenmesi ve optimizasyonunda önemli bir rol oynamaktadır.

AUV'lerin hidrodinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla yapılan bir çalışmada, düzlemsel hareket mekanizması testi, döner kol testi ve çekme testleri Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemiyle sayısal olarak modellenmiştir [12]. Bu testler, AUV'nin hidrodinamik katsayılarını elde etmek ve tasarım performansını artırmak için temel yöntemler sunmaktadır. Söz konusu modelleme, AUV'nin dinamik tepkilerini simüle ederek daha hassas mühendislik kararlarının alınmasına olanak sağlamaktadır.

Hidrodinamik gövde tasarımına yönelik yapılan başka bir çalışmada ise, HAD ile birlikte Cevap Yüzeyi Metodolojisi (RSM) kullanılarak AUV gövdesinin tasarım optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, direnç katsayılarının azaltılması ve enerji verimliliğinin artırılması açısından başarılı sonuçlar sunmuştur [13].

Bir diğer çalışmada, deneysel veriler ile HAD sonuçları karşılaştırılarak AUV sevk sistemi tasarımı değerlendirilmiş ve bu kapsamda HAD yöntemlerinin doğruluğu ve güvenilirliği ortaya konulmuştur [14]. Ayrıca, farklı derinlik ve hız koşullarında AUV gövdesine etki eden sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri HAD ile analiz edilmiş ve bu kuvvetlerin operasyonel senaryolara bağlı olarak nasıl değiştiği detaylı biçimde ortaya konmuştur [15].

Bu çalışmalar, HAD yöntemlerinin AUV'lerin hidrodinamik performansını iyileştirmede ve genel tasarım süreçlerini optimize etmede etkin bir mühendislik aracı olduğunu açıkça göstermektedir. akış davranışlarını anlamak ve performansını artırmak için etkili bir araçtır.

1.3.8 Modülerlik Yaklaşımı

Modülerlik, otonom su altı araçlarının (AUV) hem fiziksel yapısında hem de yazılımsal kontrol sistemlerinde önemli avantajlar sunmaktadır. Bir çalışmada, modülerlik kavramı kontrol mimarilerine entegre edilerek davranış ağaçları (Behaviour Trees – BT) temelli bir yaklaşım önerilmiştir [16]. Bu yöntem, kontrol sistemlerinin esnekliğini artırmakta ve farklı görev senaryolarına hızlı uyum sağlama imkânı sunmaktadır. Davranış ağaçlarının basit ve yeniden kullanılabilir yapısı sayesinde, AUV kontrol mimarilerinin daha modüler, ölçeklenebilir ve dayanıklı hâle geldiği gösterilmiştir [16].

Fiziksel modülerliğe odaklanan başka bir çalışmada ise, Morpheus adlı AUV'nin dinamik olarak şekil değiştirebilen yüzgeçlere sahip olması aracılığıyla, görev gereksinimlerine uygun hız ve manevra özelliklerinin elde edilebildiği ortaya konmuştur. Bu yenilikçi tasarım, görev tabanlı yüzgeç konfigürasyonları sayesinde hem performans hem de enerji verimliliği açısından önemli kazanımlar sağlamaktadır. Elde edilen bulgular, fiziksel modülerliğin AUV tasarımında sağladığı çok yönlülüğü ve operasyonel verimliliği desteklemektedir [17].

1.3.9 Ölçeklenebilirlik Yaklaşımı

Ölçeklenebilirlik, AUV sistemlerinin fiziksel ve operasyonel gereksinimlere uygun şekilde yeniden boyutlandırılabilmesini ifade etmektedir. Bu kapsamda yapılan bir çalışmada, insansız su altı araçlarının tasarımında ölçeklenebilirlik kavramı, hem Türkiye'de hem de uluslararası alandaki uygulamalardan örneklerle ele alınmıştır. Görev odaklı bir tasarım yaklaşımıyla, AUV'lerin gövde uzunluğu ve enerji depolama kapasitesinin operasyonel ihtiyaçlara göre artırılacağı gösterilmiştir. Örneğin, derin su operasyonları için daha uzun gövde ve geniş batarya kapasitesi tercih edilirken; sığ sularda faaliyet gösterecek araçlarda kompakt yapıların daha verimli sonuçlar sunduğu ifade edilmiştir [1].

1.4 AUV Tasarım Çalışmaları

Otonom su altı araçlarının (AUV) geliştirilmesine yönelik akademik ve kurumsal çalışmalar, farklı tasarım yaklaşımlarını ve mühendislik çözümlerini içermektedir. Bu çalışmalar, modülerlik, navigasyon sistemleri, enerji yönetimi ve görev esnekliği gibi kritik unsurları ele alarak, AUV teknolojisinin ilerlemesine önemli katkılarda bulunmuştur. Aşağıda, çeşitli üniversiteler ve araştırma kurumları

tarafından gerçekleştirilen AUV tasarım projeleri teknik detaylarıyla birlikte sunulmuştur.

1.4.1 Massachusetts Institute of Technology (MIT) – Orca AUV

Orca AUV, Massachusetts Institute of Technology (MIT) tarafından geliştirilen modüler bir prototip olup, iki PVC tüp üzerine monte edilmiş alüminyum bir çerçeveye sahiptir. Araçta yer alan bataryalar, ağırlık merkezini düşürmek ve denge momentini artırmak amacıyla alt tüp içerisine yerleştirilmiştir. Her iki tüp içerisinde, elektronik bileşenlerin konumlandığı kayar kartlar bulunmakta olup, bu kartlar PVC tüplerin uç kapaklarına bağlanan konektörlerle iletişim sağlamaktadır. Uç kapakta yer alan harici bağlantı noktaları sayesinde, tüpler içerisindeki kartlara erişim sırasında kabloların sökülmesine gerek kalmadan müdahale edilebilmektedir[18].

İtici sistem, yatay hareket için yanlara monte edilmiş iki motor ve derinlik kontrolü için kullanılan iki dikey motor içermektedir. Bu sistem, altı adet 12 V 3 Ah batarya tarafından beslenirken, diğer elektronik bileşenler dört adet 12 V batarya ile desteklenmektedir. Güç yönetimi amacıyla, yerleşik izleme sistemi her bir bataryanın voltaj ve akım değerlerini ölçmektedir. Navigasyon ve yön tayini için ise, iki jiroskop ve üç ivmeölçerden oluşan bir ataletsel ölçüm birimi (IMU), bir pusula modülü ve Doppler Hız Ölçer (DVL) entegre edilmiştir. Tüm sistemler, Linux işletim sistemi çalıştıran merkezi bir bilgisayar tarafından kontrol edilmektedir [18].

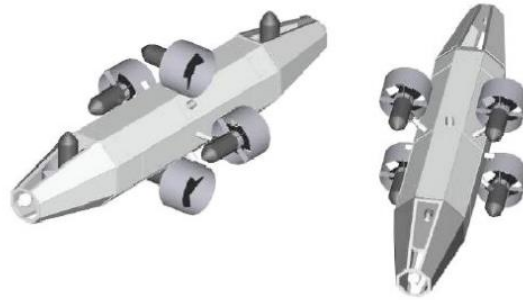


Şekil 1.1 MIT'nin Orca AUV'si [18].

1.4.2 University of Florida AUV

Florida Üniversitesi tarafından geliştirilen SubjuGator AUV, altı motorlu alüminyum bir gövdeye sahiptir ve bu motorlar, farklı görev gereksinimlerine uyum sağlamak amacıyla çeşitli konfigürasyonlarda düzenlenebilmektedir . Bu esnek yapı, aracın hareket kabiliyetini farklı görev senaryolarına uygun şekilde optimize etmeye olanak tanımaktadır. Gövde içerisinde bileşenlerin monte edilebilmesi için iki adet kayar raf bulunmaktadır. Gövdenin açılma noktasında yer alan elektrik bağlantıları, rafların kolayca çıkarılmasına imkan tanıyarak bakım ve sistem değişikliklerini pratik hale getirmektedir [19].

Aracın enerji ihtiyacı, beş adet 12V, 12Ah batarya tarafından karşılanmakta olup, bataryalar alt rafa yerleştirilerek aracın stabilitesi artırılmıştır. Sensör sistemi, eğim ölçer, dijital pusula ve basınç sensörünü içermektedir. Motorların kontrolü için bir mikrodenetleyici kullanılırken, üst seviye kontrol Linux tabanlı bir Pentium işlemcili bilgisayar tarafından sağlanmaktadır [19].



Şekil 1.2 Florida Üniversitesi'nin Subjugator AUV'si [19].

1.4.3 Cornell University AUV

Cornell Üniversitesi tarafından geliştirilen AUV, üst üste yerleştirilmiş iki gövdeden oluşan ve alüminyum bir dış iskeletle çevrelenmiş bir yapıya sahiptir. MIT'nin Orca AUV'sine benzer şekilde tasarlanan bu araç, elektronik bileşenlerin harici konektörlere bağlanmasını sağlayan kör montaj (blind-mount) arayüz sistemine sahiptir. Her iki gövdede bulunan elektronik bileşenler, kayar raflara monte edilerek yerleştirilmekte ve uç kapakla otomatik olarak bağlantı kurarak kablo sökme ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. Enerji ihtiyacı, üç adet 28 V, 9 Ah

batarya tarafından karşılanmakta olup stabiliteyi artırmak amacıyla alt gövdeye yerleştirilmiştir [20].

Araç, iki yatay ve iki dikey iticiye sahip olup x ve z eksenlerinde hareket etmesini ve pitch ile yaw kontrolünü sağlamaktadır. İşlem gücü, biri görüntü işleme için, diğeri ise motor kontrolü ve sonar sistemleri için kullanılan iki ayrı bilgisayar tarafından sağlanmaktadır [20].



Şekil 1.3 Cornell Üniversitesi'nin AUV'si [20].

1.4.4 University of West Florida – Nautilus AUV

West Florida Üniversitesi tarafından geliştirilen Nautilus AUV, yan yana hizalanmış iki PVC tüpten oluşan bir tasarıma sahiptir . Her tüp içerisinde, bakım ve kontrol işlemlerinin kolayca gerçekleştirilebilmesi için kayar raflara monte edilmiş elektronik bileşenler bulunmaktadır. Bu bileşenler, su geçirmez konektörler aracılığıyla harici cihazlara bağlanmaktadır. Tüplerin üst kısmında yer alan yüksek kaldırma kuvvetine sahip bir yüzerlik modülü, aracın su altında devrilme veya eğilme durumlarında kolayca dik konuma gelmesini sağlamaktadır [21].

Aracın hareket sistemi, her tüpün ucuna yerleştirilen iki motor ile uzunlamasına ve yanal hareket sağlarken, merkezi olarak konumlandırılmış daha büyük bir motor dikey hareketi kontrol etmektedir. Nautilus'un kontrolü için iki ayrı bilgisayar kullanılmaktadır; bunlardan biri motor kontrolünü, diğeri ise sensör yönetimini üstlenmektedir. Navigasyon sistemi, üç eksenli yönlendirme bilgisi sağlayan elektronik bir pusula ile desteklenirken, derinlik ölçümleri iki ayrı sensör tarafından

gerçekleştirilmektedir. Araç, iki adet 12V, 12Ah batarya tarafından beslenmekte olup, enerji yönetimi açısından verimli bir yapı sunmaktadır [21].



Şekil 1.4 West Florida Üniversitesi'nin Nautilus'u [21].

ÇOK MAKSATLI AUV TASARIM GEREKSİNİMLERİ VE ENTEGRASYONU

Modern görev senaryolarının çeşitliliği, otonom su altı araçlarının (AUV) yalnızca tekil ve sınırlı operasyonlar için değil; askeri keşif, deniz altı madenciliği, bilimsel veri toplama, çevresel izleme ve endüstriyel altyapı denetimi gibi çok farklı alanlarda etkin biçimde görev yapabilecek şekilde tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, çok amaçlı bir AUV tasarımı, yalnızca temel manevra ve seyri kabiliyetlerinin ötesine geçerek; yüksek görev esnekliği, modüler yapı ile yeniden yapılandırılabilirlik ve farklı görev tipleri arasında hızlı geçiş yapabilme yeteneği gibi kritik özellikleri bünyesinde barındırmalıdır.

Bu bölümde, söz konusu çok görevli kullanım yapısının gerektirdiği sistemsel değişkenler tanımlanacak; her bir değişkenin AUV performansı üzerindeki etkileri hem teorik hem de mühendislik bağlamında analiz edilecektir. Görev modüllerinin (örneğin örnek toplama sistemleri, sonar birimleri vb.) tasarımı, bu modüllerin platforma entegrasyonu ve sensör konfigürasyonlarının görev odaklı olarak nasıl şekillendirilmesi gerektiği ayrıntılı biçimde değerlendirilecektir. Ayrıca, batarya teknolojileri, enerji yönetimi stratejileri ve bu unsurların sistem bütünlüğü içerisindeki rolü ele alınacaktır.

Son olarak, çok görevli AUV'nin başarısı için kritik öneme sahip olan donanımsal ve yazılımsal entegrasyon süreçleri, modüler bileşenlerin sorunsuz biçimde birlikte çalışmasını mümkün kılacak şekilde incelenecektir. Nihai amaç, çok yönlü görev kabiliyetine sahip bir AUV platformunun; modüler, yeniden yapılandırılabilir ve mühendislik disiplini temel alınarak nasıl tasarlanması gerektiğini sistematik bir yaklaşımla ortaya koymaktır.

2.1 Görev Analizi ve Gereksinim Tanımlanması

Otonom Su Altı Araçları (AUV'ler), çok çeşitli deniz altı görevlerini insansız biçimde yerine getirebilme yetenekleriyle, askeri operasyonlardan bilimsel araştırmalara, endüstriyel denetimlerden çevresel izlemelere kadar birçok disiplinde stratejik bir rol üstlenmektedir. Bu geniş görev yelpazesi, sistem tasarımının yalnızca bir mühendislik problemi olmaktan çıkarak, aynı zamanda operasyonel gereksinimlerin bütüncül şekilde analiz edilmesini zorunlu kılan disiplinler arası bir planlama sürecine dönüşmesine neden olmuştur. Dolayısıyla, bir AUV'nin etkili ve güvenli biçimde görev yapabilmesi, yalnızca teknik kabiliyetleriyle değil; bu kabiliyetlerin, belirli görev türlerine ve çevresel değişkenlere uygun biçimde yapılandırılmasıyla mümkündür.

Bu bağlamda, görev analizi ve gereksinim tanımlaması; AUV'nin hangi görevleri, ne tür koşullar altında, hangi alt sistemler aracılığıyla yerine getireceğini sistematik biçimde ortaya koyan temel aşamadır. Süreç, öncelikle görevlerin tanımlanmasıyla başlar; her bir görev için operasyonel hedefler, çevresel sınırlamalar ve teknik ihtiyaçlar belirlenir. Ardından bu görevler işlevsel olarak alt birimlere ayrılır, her alt işlevin hangi donanım ve yazılım bileşenleri ile destekleneceği analiz edilir. Son aşamada ise görev–işlev–sistem bileşeni ilişkileri, modüler tasarımı destekleyecek şekilde görselleştirilir ve sistem mimarisi bu çerçevede optimize edilir.

Bu bölümde, çok maksatlı ve ölçeklenebilir bir AUV tasarımının gerçekleştirilmesine yönelik olarak görevlerin sistematik analizine odaklanılmıştır. Önce işlevsel analiz yapılarak görevlerin teknik kısımları gerçekleştirilmiş; ardından görev modellemesi, modelleme yaklaşımları, görev planlama araçları ve senaryo analizleri gibi yapı taşları aracılığıyla sistemin çevresel ve operasyonel değişkenlere karşı nasıl yapılandırılması gerektiği detaylandırılmıştır. Böylelikle, tasarlanan AUV'nin yalnızca teknik olarak işlevsel değil, aynı zamanda sahadaki belirsizlikleri yönetebilecek düzeyde çevik ve esnek bir yapıya sahip olması amaçlanmıştır.

2.1.1 İşlevsel Analiz

Otonom Su Altı Araçları (AUV'ler) için çok maksatlı görevlerin yerine getirilmesinde, sistem tasarımı yalnızca donanım bileşenlerinin belirlenmesinden ibaret değildir; aynı zamanda bu bileşenlerin hangi işlevleri ne şekilde yerine getireceğinin sistematik olarak analiz edilmesi gerekir. Bu bağlamda işlevsel analiz,

sistemin görevlerini alt işlevlere bölerek, gereksinimlerin yapıya dönüşümünde kritik bir adım olarak karşımıza çıkar. Bu yöntem, özellikle çok amaçlı AUV'lerin karmaşık görevler arasında geçiş yapabilme yeteneğini kazanmasında belirleyicidir. İşlevsel analiz süreci, aşağıdaki adımlarla gerçekleştirilir:

2.1.1.1 Görev Tanımlaması

Otonom Su Altı Araçları (AUV), denizaltı ortamlarında farklı sektörlerin ihtiyaçlarına hizmet eden çok sayıda operasyonel görevi yerine getirebilecek şekilde tasarlanır. Bu görevler; askeri savunma operasyonlarından endüstriyel altyapı denetimine, doğal kaynak aramalarından çevresel izlemeye ve bilimsel araştırmalara kadar geniş bir yelpazeyi kapsar. AUV'nin gerçekleştirmesi beklenen görevler arasında batimetrik haritalama, su numunesi toplama, su altı mayın taraması ve boru hattı incelemesi gibi kritik uygulamalar yer almaktadır.

Her bir görev, yalnızca amaca yönelik çıktılar üretmekle kalmaz; aynı zamanda operasyonun yürütüleceği çevresel koşullar (derinlik, görüş mesafesi, akıntı, sıcaklık gibi) ve teknik gereksinimler (konum doğruluğu, sensör tipi, enerji yönetimi, iletişim kısıtları) açısından da dikkatle tanımlanmalı ve sınırlandırılmalıdır. Görevlerin bu çok katmanlı yapısı, modüler ve ölçeklenebilir bir AUV tasarımını kaçınılmaz kılmakta; görev başarımı ile sistem mimarisi arasındaki ilişkiyi doğrudan etkilemektedir.

Bu aşamada, AUV'lerin gerçekleştirmesi beklenen başlıca görev türleri detaylı olarak ele alınacaktır. Her görev; hedefleri, operasyonel zorlukları, çevresel sınırlamaları ve teknik gereksinimleri bakımından ayrı ayrı incelenecek; görev bazlı modüler yapıların tasarım sürecine nasıl yön verdiği açıklanacaktır. Böylece AUV sistem mimarisinin görev odaklı bileşenlerle nasıl optimize edilebileceği ortaya konacaktır.

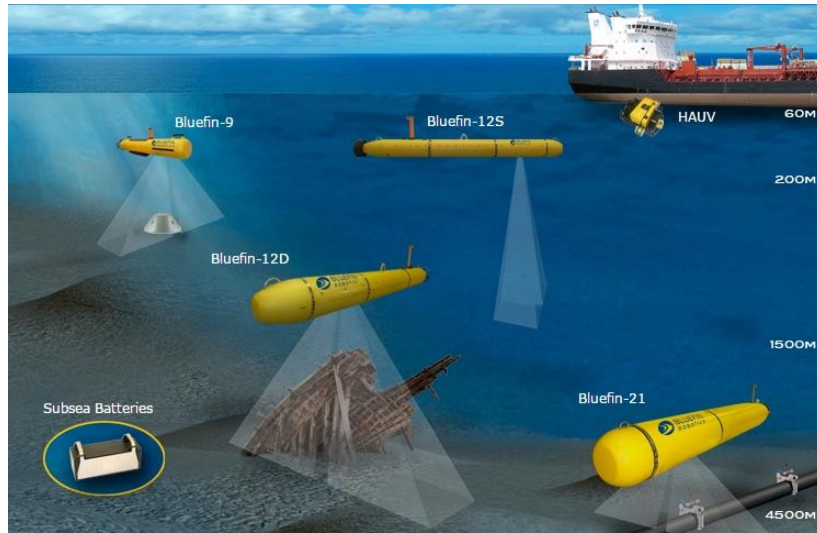
Askerî Görev: Su Altı Mayın Tespiti

Askerî operasyonlarda AUV'lerin kritik görevlerinden biri, su altına yerleştirilmiş patlayıcı maddelerin tespiti, konumlandırılması ve sınıflandırılmasıdır. Özellikle liman bölgeleri ve kıyı şeritleri gibi stratejik alanlarda, 0 ila 300 metre arasındaki derinliklerde yürütülen bu görev, tehdit unsurlarının önceden belirlenerek etkisiz hale getirilmesine olanak tanır. Görev kapsamında hedeflerin yalnızca algılanması değil, aynı zamanda görsel veya sonar verilerine dayanarak tanınması (target

recognition) ve durum farkındalığının artırılması da amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda, düşük görüş mesafesinin söz konusu olduğu zorlu ortamlarda dahi yüksek doğrulukla hedef ayırımı yapılabilmesi kritik önemdedir.

Operasyonel olarak bu tür görevler, yüksek çözünürlükte sonar ve görüntüleme sistemlerinin eşzamanlı kullanımını gerektirir. Özellikle düşman ortamlarında gerçek zamanlı karar alma mekanizmaları, veri işleme hızını ve yapay zekâ destekli sınıflandırma algoritmalarını ön plana çıkarır. Bununla birlikte, görevlerin sessiz modda gerçekleştirilmesi gerektiğinden, akustik ve elektromanyetik izlerin minimize edilmesi zorunludur. Bu durum, aracın stealth kapasitesini belirleyen önemli bir kriterdir.

Çevresel etmenler açısından görev; bulanıklık, yüksek gürültü seviyesi ve elektromanyetik girişim gibi unsurlarla sınırlandırılmaktadır. Dalga etkileri ve yerel akıntılar, AUV'nin stabilitesini ve sensör kalibrasyonunu zorlaştırırken; elektromanyetik etkileşimler, iletişim protokollerinde veri kaybına yol açabilmektedir. Tüm bu etkenler dikkate alındığında, bu görev türü için optimize edilmiş özel donanım ve yazılım modüllerinin entegrasyonu kaçınılmazdır.



Şekil 2.1 Bluefin serisi askeri AUV ürün portföyü [22].

Endüstriyel Görev: Boru Hattı İncelemesi ve Sızdırmazlık Denetimi

Endüstriyel uygulamalarda, özellikle petrol ve doğalgaz sektörlerinde AUV'lerin en yaygın kullanım alanlarından biri, deniz tabanına döşenmiş boru hatlarının durum izleme ve sızdırmazlık denetimidir. Bu görev kapsamında, boru hattının yapısal bütünlüğü yüksek doğrulukla incelenmekte; çatlaklar, deformasyonlar, mikro sızıntılar ve bağlantı noktalarındaki zayıflıklar tespit edilmektedir. Ayrıca, su altı ortamında zamanla oluşan biyolojik tortular (biofouling) ve korozyon etkileri gibi unsurların boru hattı üzerindeki birikimi de analiz edilerek bakım planlaması için veri sağlanmaktadır.

Bu tür görevlerin başarıyla yürütülebilmesi, uzun süreli operasyonlar için yüksek enerji verimliliği gerektirir. AUV, deniz tabanında boru hattı boyunca milimetrik düzeyde doğrulukla konumlanmalı ve sürekli olarak hat takibi yapabilmelidir. Bu hassas görevlerde, yüksek çözünürlüklü görüntüleme sistemleri, sonar, LIDAR ve sızıntı algılayıcılarının eş zamanlı çalışmasıyla çok katmanlı veri toplanması zorunludur. Sensör entegrasyonu ve bu sensörlerin senkronize şekilde veri üretimi, görev başarısını doğrudan etkileyen faktörlerdendir.

Bununla birlikte, görev çevresi çevresel koşullar açısından bazı önemli kısıtlamalar barındırır. Boru hattının bulunduğu bölgelerdeki yüksek biyolojik yoğunluk, görüş mesafesini düşürerek optik sistemlerin performansını sınırlar. Ayrıca, deniz altındaki akıntılar aracın yönelme ve konumlama doğruluğunu olumsuz etkileyebilir; bu da özellikle uzun hatlar boyunca kararlı hareket etmeyi zorlaştırır. Manyetik alan anomalileri ise manyetometre gibi elektromanyetik temelli sensörlerde ölçüm hatalarına neden olabilir. Bu zorluklar, görev planlamasında çevresel modellemelerle öngörülmeli ve AUV sistem tasarımı bu değişkenlere göre optimize edilmelidir.

Doğal Kaynak Keşfi ve Batimetrik Haritalama

AUV'lerin doğal kaynak araştırmalarındaki görevlerinden biri, deniz tabanının detaylı şekilde haritalanması ve ekonomik değeri yüksek minerallerin tespit edilmesidir. Bu görev kapsamında, deniz tabanının topografik yapısı yüksek çözünürlükte çıkarılarak batimetrik haritalar oluşturulur. Aynı zamanda, mangan nodülleri, kobalt yatakları ve nadir toprak elementleri gibi stratejik hammaddelerin varlığı tespit edilerek jeolojik yapılar (örneğin fay hatları, çökeller) karakterize

edilir. Bu sayede, deniz altı madenciliği ve jeolojik modelleme için bilimsel temelli bir veri altyapısı oluşturulur.

Bu tür görevlerin icrası, çoğunlukla 1000 metreyi aşan derinliklerde gerçekleştirilmekte olup, sistemin yüksek basınca dayanıklı yapıda olması gereklidir. Görev süresince multibeam sonar sistemleri, spektral analiz cihazları ve manyetometreler eş zamanlı çalışarak büyük hacimli veri üretimi gerçekleştirir. Bu veri akışının sağlıklı biçimde yönetilebilmesi, yüksek hassasiyetli konumlandırma gerektirir. Bu amaçla Doppler Velocity Log (DVL) ve Ataletsel Navigasyon Sistemi (INS) gibi alt sistemlerin entegre çalışması kritik önemdedir.

Derin deniz koşulları görev üzerinde çeşitli kısıtlamalar yaratır. Artan hidrostatik basınç ve sıcaklık değişimleri, donanım bileşenleri üzerinde malzeme dayanımı açısından stres oluşturarak sistem güvenliğini tehdit edebilir. Ayrıca elektromanyetik iletişimin derinlikte sınırlı olması nedeniyle veri aktarımında gecikmeler yaşanabilir. Düşük ışık koşulları ve yüksek tuzluluk, optik sensörlerin ve görüntüleme sistemlerinin performansını sınırlandırarak veri kalitesini etkileyebilir.

Çevresel İzleme Görevleri

AUV'ler çevresel izleme görevlerinde, deniz ekosisteminin sağlık durumunu değerlendirmek amacıyla sıcaklık, tuzluluk, çözünmüş oksijen, pH gibi temel parametreleri çoklu derinlik seviyelerinde ölçmektedir. Ayrıca, ağır metaller ve mikroplastikler gibi kimyasal kirleticilerin varlığı analiz edilerek çevresel değişimlerin erken aşamada tespit edilmesi sağlanır. Bu veriler, uzun dönemli ekosistem gözlemlerinin yanı sıra çevresel risk değerlendirme çalışmalarına temel oluşturur.

Görevin icrası, hem yatay hem de dikey düzlemde yüksek hassasiyetli veri toplama sistemlerini gerekli kılar. Özellikle farklı derinlik seviyelerinde ardışık veri alımı yapılabilmesi için dikey profil tarama kapasitesi şarttır. Zaman serili görev senaryolarında, aynı konumdan farklı zaman dilimlerinde veri alınması gerekir; bu durum görev planlamasında zaman eşlemesi ve pozisyon kontrolü gerektirir. Elektrokimyasal temelli sensörlerin uzun görevlerde stabil kalabilmesi için periyodik kalibrasyon ve sistemsel kontrol önem taşır.

Çevresel etkenler, sensör doğruluğu ve görev sürekliliği açısından bazı sınırlamalar getirir. Tortulu ve bulanık su ortamlarında sensör uçlarında biriken partiküller, ölçüm kalitesini düşürebilir. Akıntı kaynaklı pozisyon kaymaları, zaman serili verilerin tekrarlanabilirliğini zorlaştırır. Ayrıca, uzun süreli deniz altı operasyonlarında biofouling olarak bilinen biyolojik birikim, sensör performansını zamanla düşürerek veri doğruluğunu zayıflatabilir.

Su Numunesi Toplama (Bilimsel & Ticari Görev)

AUV'lerin bilimsel ve ticari görevlerinden biri, belirlenen derinlik seviyelerinden fiziksel su numunelerinin toplanarak laboratuvar ortamında analiz edilmesidir. Bu tür görevler, saha verisiyle birlikte fiziksel örneklerin birlikte sunulmasını sağlayarak çevresel ve kimyasal analizlerin daha hassas yapılmasına imkân tanır. Numunelerin toplandığı derinlik, konum ve zaman damgası kesin biçimde belgelenmelidir; böylece analiz sonuçlarının mekânsal-temporal bütünlüğü korunmuş olur.

Görevin başarısı, örnekleme sisteminin mekanik ve yazılımsal kontrolüyle doğrudan ilişkilidir. Niskin şişeleri veya benzeri mekanik sistemlerin robotik olarak yönetilmesi; açma-kapama zamanlamasının, derinliğin ve aracın pozisyonunun hassas şekilde kontrol edilmesini gerektirir. Örneklerin kontaminasyondan korunması ve analiz ortamına taşınana kadar uygun sıcaklık koşullarında muhafaza edilmesi de bir diğer önemli gerekliliktir. Görev, genellikle başka operasyonlarla eşzamanlı yürütüldüğünden, görev planlamasında modülerlik ve görev zamanlaması koordinasyonu gerekir.

Çevresel faktörler bu görevde de önemli riskler doğurur. Derinlik arttıkça örnekleme şişelerinin maruz kaldığı basınç artar ve bu da sistem dayanımını zorlar. Örneklerin toplanması sırasında aracın yönelmesindeki ani sapmalar veya ivmelenme, numunenin kimyasal bütünlüğünü bozabilir. Ayrıca sıcaklık dalgalanmaları, hassas kimyasal bileşiklerin yapısını değiştirerek analiz kalitesini düşürebilir. Bu nedenlerle örnekleme görevlerinin dikkatli mühendislik planlaması ve çevresel koşullarla uyumlu donanım seçimiyle desteklenmesi gerekmektedir.

Tablo 2.1 Görev türlerine göre AUV operasyonel gereksinimleri

Görev Türü	Derinlik (m)	Veri Yoğunluğu	Enerji Gereksinimi	Özel Donanım Gereksinimi
Askeri Görev	0-300	Çok Yüksek	Orta	Yüksek çöz. sonar, kamera
Endüstriyel Boru Hattı İncelemesi	0-500	Yüksek	Yüksek	Görüntüleme, akustik sensör
Kaynak Keşfi ve Haritalama	0-4000	Çok Yüksek	Çok Yüksek	Multibeam sonar, magnetometre
Çevresel İzleme	0-200	Orta	Orta	CTD, optik sensörler
Su Örnekleme ve Taşıma	0-1000	Düşük	Orta	Mekanik örnekleme modülü

2.1.1.2 Görevlerin Alt İşlevlere Ayrılması

Otonom Su Altı Araçlarının (AUV) çok maksatlı görevleri yerine getirebilmesi, her görevin bileşenlerine ayrılarak işlevsel açıdan analiz edilmesini gerektirir. Bu yaklaşım, görevlerin gerçekleştirilmesi için gerekli olan temel alt işlevlerin sistematik biçimde tanımlanmasını ve bu işlevlerin donanım ile yazılım bileşenleriyle uyumlu şekilde entegre edilmesini sağlar. Alt işlevlerin belirlenmesi, yalnızca operasyonel başarıyı artırmakla kalmaz, aynı zamanda sistemin esnekliğini, modülerliğini ve yeniden yapılandırılabilirliğini de mümkün kılar. Çok amaçlı AUV sistemlerinde, görevler arasında geçiş yapılabilmesi ve çeşitli operasyonel senaryolara adapte olunabilmesi için bu alt işlevlerin açık biçimde tanımlanması kritik önemdedir.

Askerî Görev: Su Altı Mayın Taraması ve Hedef Tanıma Gerekli Alt İşlevler ve Açıklamaları

- **Navigasyon:** Görev sahasına ulaşım, rota planlaması ve hassas konum sabitleme işlemleri gerçekleştirilir. Düşman unsurlardan gizlenmek amacıyla sessiz modda seyir yapılır.
- **Hedef Tanıma:** Sonar ve optik görüntü verileri kullanılarak AI tabanlı sınıflandırma algoritmalarıyla potansiyel tehditler (mayın, patlayıcı) ayrıştırılır.
- **Veri Toplama:** Akustik izler ve manyetik alan anomalileri gibi çevresel veriler toplanarak dijital biçimde analiz edilir.
- **Görüntüleme:** Yüksek çözünürlüklü sonar sistemleri ve düşük ışık koşullarına duyarlı kameralar kullanılarak görsel teyit sağlanır.
- **Yüzeyleme:** Geri bildirim, konum güncellemesi ve acil durum veri aktarımı amacıyla belirli aralıklarla yüzeye çıkış gerçekleştirilir.

Endüstriyel Görev: Boru Hattı İncelemesi ve Sızdırmazlık Tespiti Gerekli Alt İşlevler ve Açıklamaları

- **Navigasyon:** Boru hattı güzergâhı üzerinde hassas hareket için yol haritalaması yapılır. GNSS destekli yüzey konumu ve INS temelli iç yönelim sistemi entegre çalışır.
- **Veri Toplama:** Basınç, sıcaklık, titreşim ve sızıntı göstergesi verileri gerçek zamanlı olarak toplanır ve kaydedilir.
- **Görüntüleme:** Yüksek çözünürlüklü kameralar aracılığıyla boru hattı yüzeyi görüntülenir; deformasyon, biofouling ve yapısal bozulmalar analiz edilir.
- **Hedef Tanıma:** Termal ya da akustik farklılıklara dayalı sızıntı izleri tanımlanır ve sınıflandırılır.
- **Yüzeyleme:** Görev sonrası kritik verilerin aktarılması veya enerji ikmali amacıyla yüzeye çıkış sağlanır.

Kaynak Keşfi ve Haritalama Görevi Gerekli Alt İşlevler ve Açıklamaları

- **Navigasyon:** Sistematik grid tarama rotaları oluşturularak AUV'nin belirlenen alan üzerinde sabit hız ve yön ile ilerlemesi sağlanır.
- **Veri Toplama:** Batimetrik veriler, manyetik alan ölçümleri ve deniz tabanı morfolojisine ilişkin topografik bilgiler toplanır.
- **Görüntüleme:** Multibeam sonar sistemleri ve spektral analiz sensörleri kullanılarak zemin taraması yapılır, mineral oluşumları tespit edilir.
- **Yüzeyleme:** Toplanan verilerin güvenli biçimde aktarılması ve yeniden konumlandırma işlemleri için görev aralarında yüzeye çıkılır.

Çevresel İzleme Görevi: Su Kalitesi Analizi Gerekli Alt İşlevler ve Açıklamaları

- **Navigasyon:** Dikey profil verisi alınacak örnekleme noktalarına ulaşmak amacıyla üç boyutlu rota planlaması yapılır.
- **Veri Toplama:** Tuzluluk, sıcaklık, çözünmüş oksijen gibi temel çevresel parametreler zaman serili ölçümlerle toplanır.
- **Numune Alma (Opsiyonel):** Kimyasal analiz ihtiyacı duyulan senaryolarda, fiziksel su örnekleri alınır ve izlenir.
- **Yüzeyleme:** Periyodik olarak veri aktarımı yapılması ve pozisyon güncellenmesi amacıyla yüzeye çıkış sağlanır.

Bilimsel/Ticari Ek Görev: Su Örneği Toplama ve Taşıma Gerekli Alt İşlevler ve Açıklamaları

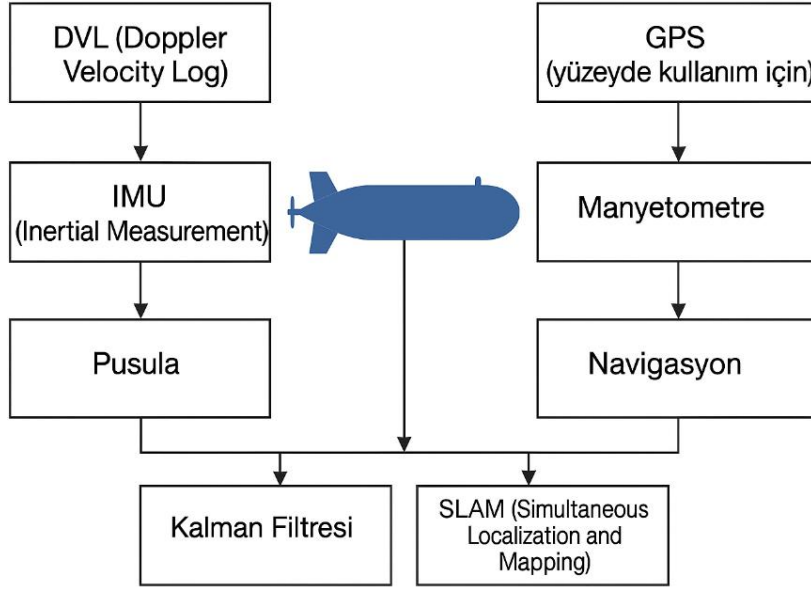
- **Navigasyon:** Numune alınacak lokasyonlara hassas ve milimetrik düzeyde yönelme sağlanır.
- **Numune Alma:** Robotik kollar veya Niskin tipi şişeler yardımıyla çok noktalı fiziksel su örnekleme işlemleri gerçekleştirilir.
- **Veri Toplama:** Örnekleme esnasındaki ortam verileri (örnek derinliği, sıcaklığı, konumu ve zaman damgası) eş zamanlı olarak kaydedilir.
- **Yüzeyleme:** Toplanan numunelerin bozulmadan taşınması ve analiz laboratuvarlarına ulaştırılması için yüzeye çıkış gerçekleştirilir.

Tablo 2.2 Görev türlerine göre alt işlev gereksinimlerinin dağılımı

Alt İşlev	Askeri Görev	Endüstriyel Görev	Haritalama	Çevresel İzleme	Su Örneği
Navigasyon	✓	✓	✓	✓	✓
Hedef Tanıma	✓	✓	✗	✗	✗
Veri Toplama	✓	✓	✓	✓	✓
Görüntüleme	✓	✓	✓	✗	✗
Numune Alma	✗	✗	✗	◆ (opsiyonel)	✓
Yüzeyleme	✓	✓	✓	✓	✓

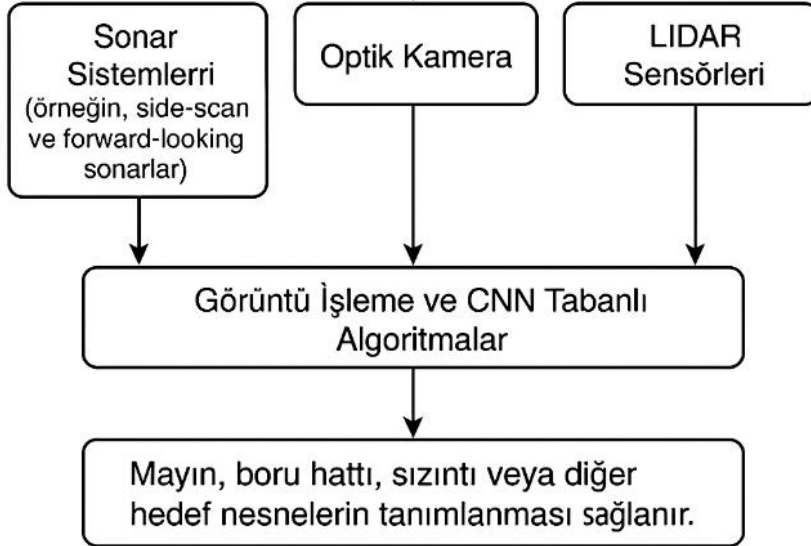
2.1.1.3 Alt İşlevlerin Sistem Bileşenleriyle Eşleştirilmesi:

AUV sistemlerinde görev başarımı, işlevsel düzeyde ayrıştırılmış alt sistemlerin doğru şekilde tasarlanmasına bağlıdır. Bu çerçevede, konum ve yönelim takibini sağlayan navigasyon işlevi, neredeyse tüm görev türlerinde temel bir bileşen olarak yer alır. Bu işlev, DVL (Doppler Velocity Log), IMU (Inertial Measurement Unit), GPS (yüzeyde kullanım için), pusula ve manyetometre gibi sensörlerle donanımsal olarak desteklenir. Yazılım tarafında ise Kalman filtresi ve SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) algoritmaları gibi yöntemler kullanılarak hassas konumlama gerçekleştirilir. Bu yapı, AUV'nin çevresel farkındalığını ve görev sahasında yön bulma kabiliyetini artırır.



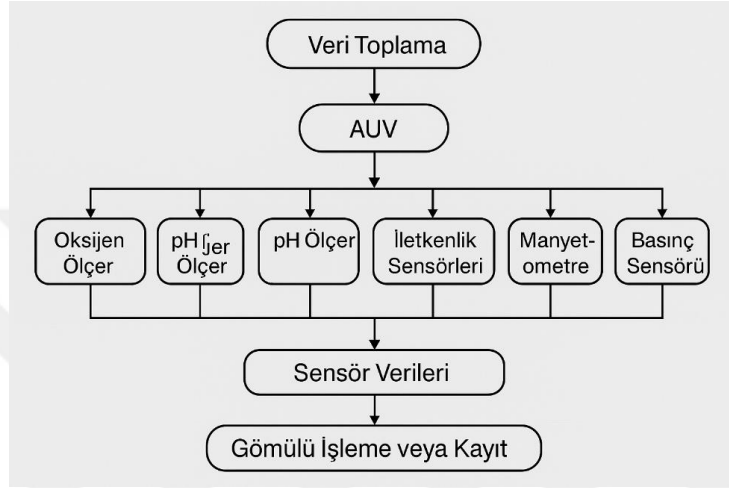
Şekil 2.2 AUV'lerde konumlama ve navigasyon sisteminin bileşenleri

Bir diğer önemli işlev hedef tanıma olup, askeri ve endüstriyel görevlerde öne çıkar. AUV, çevredeki nesnelere sonar sistemleri (örneğin, side-scan ve forward-looking sonarlar), optik kameralar ve sığ sularda LIDAR sensörleri aracılığıyla algılar. Elde edilen veriler, görüntü işleme yazılımları ve genellikle konvolüsyonel sinir ağları (CNN) gibi derin öğrenme tabanlı sınıflandırma algoritmaları ile analiz edilerek, mayın, boru hattı, sızıntı veya diğer hedef nesnelere tanımlanması sağlanır.



Şekil 2.3 AUV'lerde görüntü işleme tabanlı hedef tanıma süreci

Veri toplama işlevi ise AUV'nin çevresel, fiziksel ve manyetik değişkenleri ölçerek dijital veriye dönüştürmesini içerir. Bu kapsamda CTD sensörleri, oksijen ve pH ölçerler, iletkenlik sensörleri, manyetometreler ve basınç sensörleri gibi çeşitli donanımlar görev alır. Sensör verileri, zaman serisi halinde toplanarak gömülü işlemcilerde ön işleme tabi tutulur veya doğrudan kayıt altına alınır. Görev türüne bağlı olarak sensör seçimi değişkenlik gösterebilir, ancak bu işlev neredeyse tüm AUV görevlerinin ortak bir parçasıdır.



Şekil 2.4 AUV tabanlı çevresel veri toplama süreci

Görüntüleme, çevresel yapıların detaylı biçimde incelenmesini sağlayan bir başka kritik işlevdir. Yüksek çözünürlüklü kameralar, multibeam sonar sistemleri ve spektral analiz sensörleri aracılığıyla elde edilen veriler, görsel veri birleştirme algoritmaları ve üç boyutlu haritalama yazılımları ile işlenir. Özellikle boru hattı denetimi ve batimetrik haritalama gibi görevlerde bu işlev büyük önem taşır.

Görev tamamlandığında veya acil durumlar ortaya çıktığında AUV'nin yüze çıkması gerekebilir. Bu nedenle yüzeleme işlevi, sistem güvenliği ve görev sonrası veri aktarımı açısından zorunludur. Donanım bileşenleri arasında balast pompası (aktif yüzeleme için) ve açılır anten modülü yer alır. Yazılım düzeyinde ise yüzeleme komutlarını yürüten kontrol modülleri ile RF veya akustik haberleşmeye geçişi yöneten yazılım sistemleri görev yapar.

Son olarak, çevresel ve bilimsel araştırma görevlerinde devreye giren numune alma işlevi, AUV'nin fiziksel örnekleri doğrudan ortamdaki toplamasını sağlar. Bu işlevin donanımsal bileşenleri arasında robotik kol sistemleri, Niskin şişeleri, servo motorlar ve su örnekleme vanaları yer alır. Yazılım tarafında ise numune alma

süreçlerini yöneten özel kontrol algoritmaları ve aktüatör sürücü yazılımları kullanılarak örneklerin güvenli ve hassas biçimde alınması sağlanır. Mekanik açıdan karmaşık yapısıyla bu işlev, yalnızca belirli görev senaryolarında aktive edilir.

Bu işlevlerin her biri, belirli görev türlerine özgü donanım ve yazılım bileşenleri ile desteklenmekle birlikte, sistemin genel çalışma kararlılığı ve çok maksatlı görevlerde etkinlik kazanabilmesi için bazı bileşenlerin görevden bağımsız olarak sürekli aktif kalması gerekmektedir. Bu bileşenler, AUV'nin seyrüsefer, enerji yönetimi, karar alma, veri aktarımı ve emniyetli yüzeyleme gibi temel fonksiyonlarını sürdürülebilir kılacak altyapıyı oluşturur. Donanım ve yazılım bileşenlerinden oluşan bu ortak altyapı, aracın tüm görev türlerinde güvenli, etkili ve otonom biçimde çalışmasını sağlar.

Aşağıda, bu çerçevede görevden bağımsız çalışan ortak sistem bileşenleri ve bunların görevlerde üstlendikleri roller aşağıdaki tablolarda ayrı ayrı sunulmuştur:

Tablo 2.3 Ortak donanım bileşenleri ve görevlerdeki rolleri

Ortak Sistem Bileşeni	Görevlerdeki Rolü
DVL + IMU + Pusula	Her görevde AUV'nin pozisyonunu ve hızını takip eder. Navigasyon altyapısının temelini oluşturur.
Batarya Yönetim Sistemi (BMS)	Tüm sistemlere enerji sağlar. Görev süresi optimizasyonu ve batarya sağlığı takibi yapar.
Gömülü Kontrol Bilgisayarı	Tüm görevlerde kontrol döngüsünü yönetir. Otonom karar alma, sensör veri işleme ve hareket komutları bu modül üzerinden yürütülür.
Haberleşme Modülü (Akustik + RF)	Görev başlatma, durdurma ve veri aktarımı için kullanılır. Derin sularda akustik, yüzeyde RF (WiFi/Satcom) devreye girer.
Yüzeyleme Mekanizması	Görev tamamlandığında veya acil durumda AUV'nin yüzeye çıkmasını sağlar. Tüm görevlerde emniyet gerekçesiyle zorunludur.

Tablo 2.4 Yazılım modülleri ve özelleştikleri görev türleri

Yazılım Modülü	Özelleştiği Görevler
Navigasyon ve Yönelim	Tüm görevlerde (SLAM, DVL-GPS füzyonu)
Görüntü İşleme – AI	Askerî ve endüstriyel görevlerde
Haritalama ve Veri Füzyonu	Kaynak keşfi ve çevresel izleme
Aktüatör Kontrol Modülü	Numune alma görevlerinde aktif
Enerji Yönetim Yazılımı	Tüm görevlerde, batarya optimizasyonu için

2.1.1.4 Fonksiyonel Blok Diyagramlarının Oluşturulması

AUV'nin genel görev yapısını temsil edecek şekilde, görev–alt işlev ilişkileri bir blok diyagram formunda görselleştirilir. Bu diyagramlar, sadece sistemin yapısal ve fonksiyonel analizini görsel olarak ortaya koymakla kalmaz, aynı zamanda mühendislik, donanım geliştirme, kontrol sistemleri, yazılım geliştirme ve test ekipleri arasında ortak bir teknik dil ve referans çerçevesi işlevi görür. Modüler ve çok maksatlı bir AUV'nin tasarım sürecinde, görevlerin sahip olduğu özgün gereksinimler nedeniyle bu tür diyagramlar, görev senaryosu başına uyarlanabilir bir yapıda olmalıdır.

Her görev, AUV üzerinde birden fazla alt işlevi tetikler ve bu alt işlevler, donanım (hardware) ve yazılım (software) modülleri ile eşleşerek görev başarımına katkı sağlar. Örneğin, askerî görevler genellikle hedef tanıma, navigasyon, görüntü işleme ve veri iletimi gibi işlevleri kapsar. Bu görevde; sonar ve optik sensörler, konvolüsyonel sinir ağı (CNN) destekli sınıflandırıcılar ve RF/akustik haberleşme modülleri kritik rol oynar.

Endüstriyel görevler, örneğin *boru hattı incelemesi*, farklı sensör kümelerini ve kontrol algoritmalarını ön plana çıkarır. Bu tür görevlerde, yüksek çözünürlüklü multibeam sonar sistemleri, INS destekli hassas navigasyon, veri kaydı ve haritalama işlevleri blok diyagramın temel bileşenleri arasında yer alır.

Çevresel izleme görevleri, su kalitesi parametrelerinin ölçümü (pH, iletkenlik, sıcaklık, çözünmüş oksijen vb.), veri toplama, numune alma, gömülü işlem,

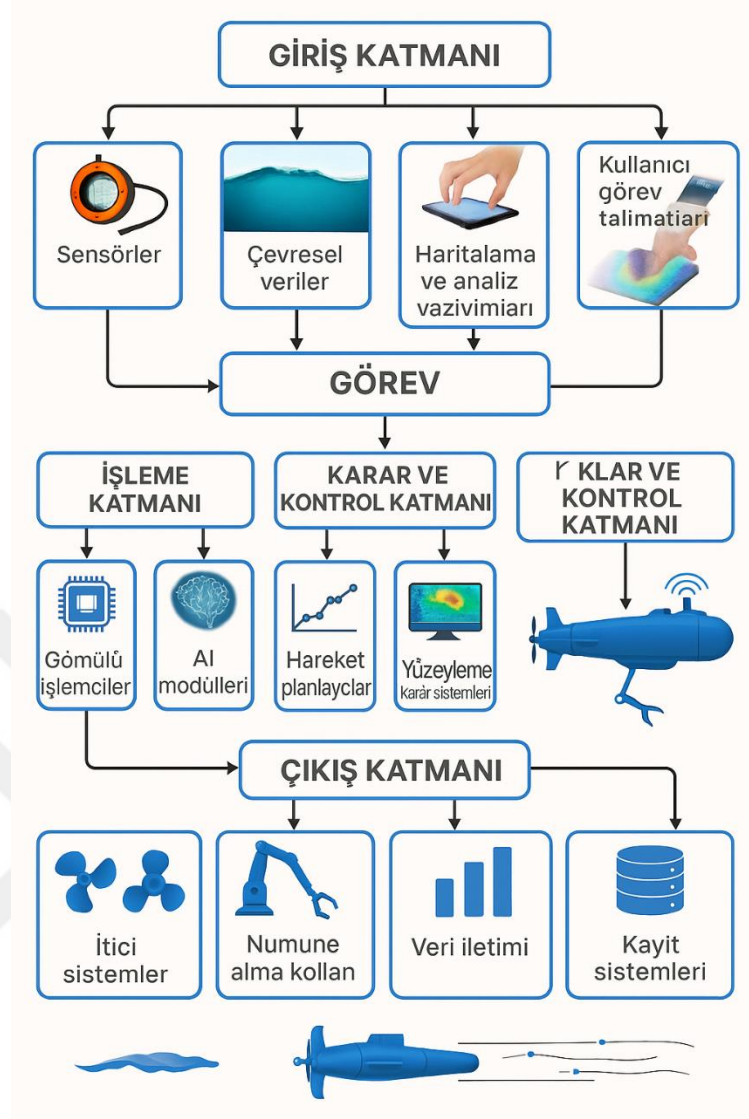
yüzeyleme ve veri aktarımı gibi işlevlerle temsil edilir. Bu görevlerde blok diyagram, sensör arayüzlerinden başlar; analog–dijital dönüşüm, veritabanı kaydı, enerji yönetimi ve iletişim modülleri ile devam eder.

Kaynak keşfi ve batimetrik haritalama görevleri, genellikle multibeam sonarlar, spektral analiz sistemleri, GPS destekli SLAM modülleri ve 3D haritalama yazılımları ile gerçekleştirilir. Blok diyagramlarda; haritalama, navigasyon, görüntü birleştirme ve otomatik rota planlama gibi alt sistemler birbirine veri akışı ile bağlanır.

Bilimsel araştırma görevlerinde, örneğin deniz canlılarının habitat takibi veya jeolojik örnekleme, numune alma, robotik kol kontrolü, otomatik derinlik ayarı, görüntü işleme ve zaman damgalı veri kayıt sistemleri gibi daha özel işlevler ön plana çıkar.

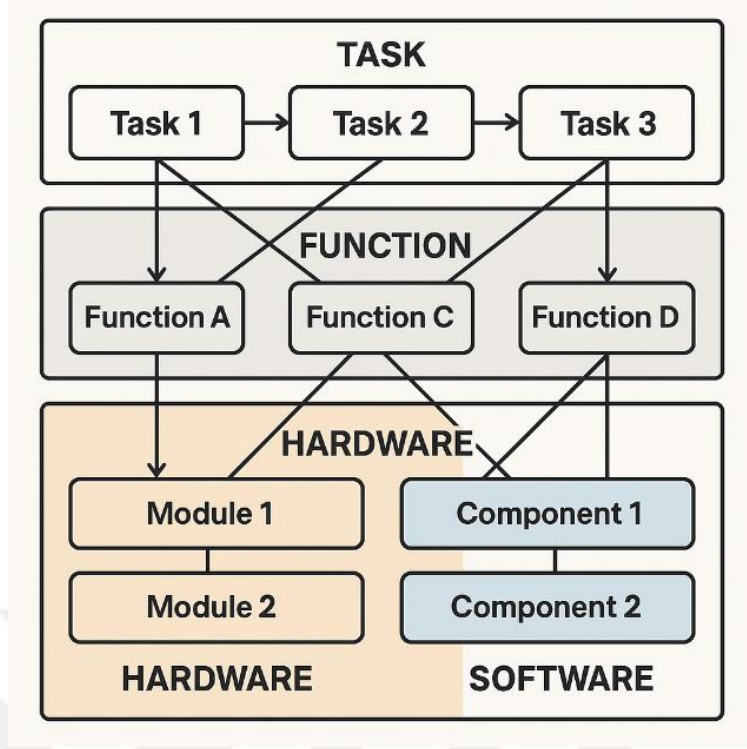
Bu görevlerin her biri için geliştirilecek **blok diyagramlar**, genel olarak aşağıdaki yapılandırmayı içerir:

- Giriş Katmanı (Input Layer): Sensörler, çevresel veriler, kullanıcı görev talimatları
- İşleme Katmanı (Processing Layer): Gömülü işlemciler, AI modülleri, haritalama ve analiz yazılımları
- Karar ve Kontrol Katmanı (Control Layer): Kontrol algoritmaları, hareket planlayıcılar, yüzeyleme karar sistemleri
- Çıkış Katmanı (Output Layer): İtici sistemler, numune alma kolları, veri iletimi, kayıt sistemleri



Şekil 2.5 Çok katmanlı görev yönetimi mimarisi ile AUV sistem yapısı

Çok maksatlı bir AUV sisteminin görev–alt işlev–donanım/yazılım bileşenleri arasındaki ilişkileri katmanlı bir yapıda ortaya koymaktadır. En üstte yer alan "**Görev Katmanı**", aracın farklı operasyonel senaryolarını temsil ederken; orta katmandaki "**İşlev Katmanı**", bu görevlerin gerçekleştirilmesi için gereken temel alt işlevleri göstermektedir. En altta ise donanım ve yazılım bileşenlerinden oluşan "**Uygulama Katmanı**" yer almakta olup, her işlevin hangi fiziksel veya yazılımsal modüller aracılığıyla yürütüldüğü görselleştirilmektedir. Katmanlar arası bağlantılar, görevlerin hangi işlevlere ve bu işlevlerin hangi bileşenlerle yerine getirildiğini açık biçimde göstermekte; böylece sistem entegrasyonunun mantıksal kurgusu netleşmektedir.



Şekil 2.6 Görev–işlev–donanım eşleştirmesiyle sistem mimarisi

Bu katmanlar, görev bazlı özelleşerek her blok diyagramda farklı kombinasyonlarla yer alır. Böylece görev–alt işlev–donanım/yazılım eşleştirmeleri açık biçimde ortaya konur. Bu yapılandırma sayesinde; sistem tasarım sürecinde hem mühendislik ekipleri hem de yazılım geliştiriciler için ortak bir referans çerçevesi oluşturulmakta, görevler arası geçişlerde hangi modüllerin ortak, hangilerinin göreve özgü olduğu kolayca belirlenebilmektedir. Sonuç olarak, yazılım–donanım senkronizasyonu sistematik ve tutarlı bir biçimde sağlanmaktadır.

2.1.2 Görev Modellenmesi

Görev modelleme (mission modeling), otonom su altı araçlarının (AUVs – Autonomous Underwater Vehicles) karmaşık görevleri çevresel belirsizlikler altında başarıyla gerçekleştirebilmesi için yapılandırılmış karar süreçlerini temsil eder. Görev modellemesi, bir AUV'nin ne zaman, nasıl ve hangi koşullar altında hareket edeceğini belirleyen mantıksal yapının çekirdeğidir. Zaman kısıtlamaları, deniz ortamındaki değişken koşullar (akıntı, sıcaklık, görüş mesafesi), görev tipi (örneğin haritalama, veri toplama, gözetim) ve aracın fiziksel-yazılımsal kapasitesi (enerji, sensör yetenekleri, işlem gücü) gibi değişkenlerin modellenmesi sayesinde, sistemler daha güvenli ve etkili çalışabilir hâle gelir.

Görev modeli oluşturma süreci; sistem mimarisi tasarımı, görev planlama yazılımlarının geliştirilmesi ve enerji yönetimi stratejileri açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle çok maksatlı görevlerde, farklı görev modüllerinin zamanlaması ve kaynak yönetimi, görev modellemesiyle entegre edilmeden etkin bir şekilde yönetilemez. Bu bağlamda, zaman ve mekânda değişkenlik gösteren okyanus ortamlarında görevlerin başarıyla yürütülebilmesi için geliştirilen hiyerarşik görev planlama çerçevesi, önemli bir çözüm sunmaktadır [23].

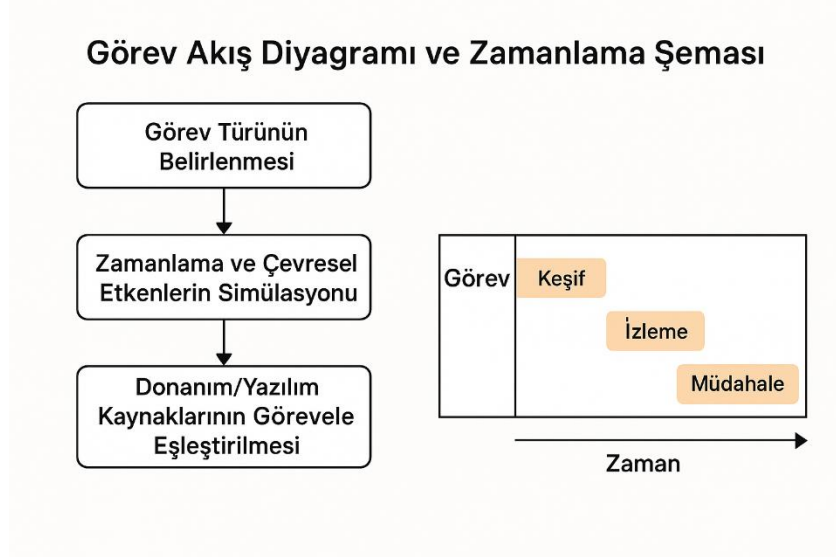
2.1.2.1 Görev Modelleme Süreci

Görev modelleme süreci, çok maksatlı ve ölçeklenebilir bir Otonom Su Altı Aracı (AUV) tasarımı bağlamında, görevlerin sistematik biçimde yapılandırılmasını sağlayan temel aşamalardan oluşur.

İlk aşamada, görev türü tanımlanır; bu kapsamda keşif (survey), izleme (monitoring) ve müdahale (intervention) gibi operasyonel hedeflere yönelik farklı görev sınıflandırmaları yapılır. Bu görev türleri, aracın otonom kabiliyetlerine yön veren temel parametreleri belirler.

İkinci aşamada, görevlerin gerçekçi koşullarda değerlendirilmesi için zamanlama ve çevresel değişkenlerin simülasyonu gerçekleştirilir. Akıntı vektörleri, sıcaklık profilleri ve batimetrik veriler gibi çevresel parametreler kullanılarak operasyonel senaryolar modellenir ve görev koşullarına uygunluk test edilir.

Üçüncü aşamada ise görev gereksinimleri ile donanım/yazılım kaynakları arasında doğrudan bir eşleştirme yapılır. Bu bağlamda, kullanılacak sensör tipleri, işlem birimleri, veri toplama modülleri ve güç yönetimi sistemleri görev yapısına entegre edilir; böylece sistem mimarisi görev odaklı olarak optimize edilir. Görev modelleme süreci, bu çok katmanlı yaklaşımı sayesinde, AUV'nin esnekliğini ve operasyonel başarımını doğrudan etkileyen kritik bir tasarım bileşenidir.



Şekil 2.7 Görev akış diyagramı ve zamanlama şeması

2.1.2.2 Modelleme Yaklaşımları

AUV görev modellemesinde kullanılan başlıca yaklaşımlar, görevlerin tetiklenme mekanizmalarına ve çevresel koşullara uyum kabiliyetlerine göre sınıflandırılmaktadır.

Zaman temelli modelleme, görevlerin önceden belirlenmiş sabit zaman dilimlerinde başlatıldığı, yüksek deterministikliğe sahip yapılardır. Bu yöntem, çevresel değişkenliğin düşük olduğu operasyonel senaryolarda yüksek verimlilik sağlar; ancak değişken ortamlara adaptasyon kabiliyeti sınırlıdır.

Olay temelli modelleme ise görevlerin dışsal uyarıcılara, örneğin sensör verisine veya sistem durumundaki değişikliklere bağlı olarak başlatıldığı, daha esnek ve uyarlanabilir bir yapıdır.

Bir diğer yaklaşım olan **davranış tabanlı mimariler**, görevleri alt davranışlara bölerek, bu birimlerin kombinasyonu ile karmaşık görevlerin yerine getirilmesini sağlar. Bu yaklaşımda her davranış, belirli bir hedefi veya çevresel yanıtı temsil eder. Rajan ve arkadaşlarının geliştirdiği T-REX mimarisi, çok katmanlı yapısıyla AUV kontrolünde görev planlamayı nasıl gerçekleştirebileceğine dair önemli bir örnek sunmaktadır [24].

Olasılıksal planlama yöntemleri ise çevresel belirsizliklerin baskın olduğu görev senaryolarında kullanılmaktadır. Bu bağlamda, Markov Karar Süreçleri Decision ve kısmi gözlemlenebilir MDP gibi yöntemler sayesinde AUV'ler, belirsiz

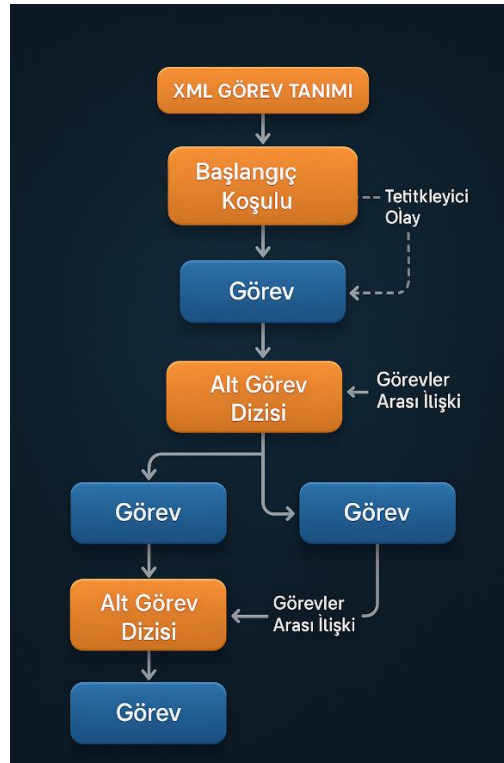
girdilere karşı optimum kararlar alabilmektedir. Her bir modelleme yöntemi, AUV'nin görev türüne, çevresel karmaşıklığa ve sistem kısıtlarına göre farklı avantajlar sunmakta olup, çok maksatlı görev yapısına sahip sistemlerde çoğu zaman bu yaklaşımların hibrit biçimde entegrasyonu tercih edilebilmektedir.

2.1.2.3 Çok Maksatlı AUV'lerde Kullanılan Modelleme Dilleri ve Araçları

Çok maksatlı AUV sistemlerinin geliştirilmesinde, görev planlama, sistem davranışlarının modellenmesi, zamanlama ve kontrol algoritmalarının yapılandırılması gibi karmaşık süreçlerin yönetilmesi için çeşitli modelleme dilleri ve yazılım araçları kullanılmaktadır. Bu araçlar, hem görev mantığının tutarlı bir şekilde tanımlanmasını sağlar hem de otonom sistemin güvenilirliğini artıran simülasyon ve doğrulama süreçlerine katkıda bulunur.

Mission Definition Language (MDL)

MDL, özellikle görev tanımlama ve senaryo üretimi süreçlerinde kullanılan XML tabanlı bir dildir. Görevlerin başlangıç ve bitiş koşulları, alt görev dizileri, tetikleyici olaylar ve görevler arası ilişkiler bu dil ile yapılandırılabilir. Çok maksatlı AUV'lerde, MDL kullanımı sayesinde görevler modüler olarak tanımlanabilir ve sistemler arası görev paylaşımı yapılabilir.



Şekil 2.8 XML tabanlı görev tanımlama ve hiyerarşik görev yapısı

PDDL (Planning Domain Definition Language)

PDDL (Planning Domain Definition Language), yapay zekâ temelli planlama ve otomatik görev üretimi süreçlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. AUV görev planlamasında PDDL, yüksek düzeyde soyutlanmış görevlerin mantıksal yapısını tanımlamaya olanak vererek, görev senaryolarının otomatik olarak oluşturulmasını ve geçerlilik kontrollerinin kolaylaşmasını sağlar.

Simulink/Stateflow

Simulink, dinamik sistemlerin blok diyagramlarla modellenmesini sağlar. Stateflow ise bu modellemeye durum makineleri ve geçiş diyagramları ekleyerek daha gelişmiş kontrol yapılarının tanımlanmasına olanak tanır. Özellikle AUV'nin görev yürütme mantığı, hata durumları, yeniden başlatma senaryoları gibi durumlar bu araçlar kullanılarak modellenebilir ve MATLAB entegrasyonu ile analiz edilebilir.

ROS (Robot Operating System)

ROS, AUV'ler de dâhil olmak üzere birçok otonom sistemin kontrol ve haberleşme altyapısını destekleyen açık kaynaklı bir çerçevedir. Görev modelleme sürecinde, ROS üzerinde çalışan düğümler (nodes) görev planlayıcıları, sensör işleyicileri ve karar vericiler arasında veri alışverişi sağlar. ROS, PDDL gibi planlama sistemleriyle de entegre edilerek görevlerin dinamik olarak modellenmesini mümkün kılar.

T-REX (Teleo-Reactive Executive)

T-REX, özellikle davranış tabanlı görev yürütme için geliştirilmiş, görevleri zamansal bağlamda yöneten bir yürütücü sistemdir. Bu yapı, görev modellemesini yüksek soyutlama seviyelerinde ele alır. Her görev, belirli zaman pencere ve tetikleyicilerle birlikte tanımlanır ve sistem bu görevleri yerleşik planlama ve gözlem bileşenleriyle dinamik olarak işler. [24]

MOOS-IvP (Mission Oriented Operating Suite – Interval Programming)

MOOS-IvP, deniz sistemleri için tasarlanmış bir görev yönetim ve kontrol çerçevesidir. Görevlerin hedef fonksiyonlarına göre ağırlıklandırılması ve seçim

yapılması mantığına dayanır. Özellikle çoklu görevlerin önceliklendirilmesinde ve davranışların çatışmasız biçimde yönetilmesinde avantaj sağlar.

Tablo 2.5 Çok maksatlı AUV’lerde kullanılan modelleme dilleri

Modelleme Dili / Araç	Kullanım Amacı	Avantajları	Zorlukları
MDL (Mission Definition Language)	Görev tanımı ve senaryo yapılandırması	XML tabanlı, modüler görev yapılandırması	Sınırlı işlem mantığı, dış entegrasyon gereksinimi
PDDL (Planning Domain Definition Language)	AI tabanlı görev planlama ve mantık modelleme	Mantıksal soyutlama ve AI entegrasyonu	Yüksek öğrenme eğrisi, karmaşık yapılandırma
Simulink / Stateflow	Durum makineleri ve kontrol diagramları	Görsel modelleme, MATLAB ile entegrasyon	Gerçek zamanlılıkta sınırlamalar olabilir
ROS (Robot Operating System)	Modüler kontrol ve sensör/veri iletişimi	Açık kaynak, modüler mimari, geniş topluluk	Karmaşık yapılandırma, donanım uyumu gerekebilir
T-REX (Teleo-Reactive Executive)	Zamana bağlı davranış yürütme ve planlama	Durumsal farkındalık, zamansal görev yönetimi	Özelleştirme gerektirir, yüksek entegrasyon karmaşıklığı
MOOS-IvP	Davranış tabanlı görev önceliklendirme	Çatışmasız davranış kontrolü, deniz sistemlerine özgü	Özel amaçlı, genel kullanıma uygun olmayabilir

Tablo 2.5’e göre MDL, XML yapısıyla prototiplemede hız sağlarken sınırlı mantık işleme nedeniyle dinamik senaryolarda ek entegrasyon gerektirir. PDDL, karmaşık görev zincirlerini mantıksal soyutlamayla tanımlasa da dik öğrenme eğrisi ve güncelleme kısıtlarına sahiptir. Simulink/Stateflow, MATLAB entegrasyonu ile süreci hızlandırırsa da gömülü sistemlerde performans sınırlarıyla karşılaşır. ROS,

modüler açık kaynak yapısıyla esneklik sunar; ancak donanım uyumluluğu ve ölçeklenebilirlik için karmaşık konfigürasyonlar gerektirir. T-REX, zamansal görev yönetimiyle farkındalık sağlarken entegrasyon zorluğu yaratır. MOOS-IvP ise deniz sistemlerine özgü kontrol sunarken genel uygulamalarda uyum sorunları yaşatabilir.

2.1.3 Senaryo Analizi

Otonom su altı araçlarında görev planlaması sürecinde senaryo analizi, farklı çevresel ve operasyonel koşullar altında sistemin performansını önceden değerlendirmek, muhtemel başarısızlıkları en aza indirmek ve tasarıma geri bildirim sağlamak amacıyla kullanılan sistematik bir yaklaşımdır. Bu yöntemde, deniz ortamındaki belirsizlikler göz önünde bulundurularak, görev öncesi simülasyonlar, risk değerlendirmeleri ve olasılıksal karar mekanizmaları ile çeşitli operasyonel senaryolar tanımlanır. Örneğin bir görevde batarya kapasitesinin beklenmedik şekilde %15 azalması gibi durumlar ele alınarak, aracın geri dönüş algoritması yeniden çalıştırılır ve görevin başarı oranı ile veri toplama verimliliği incelenir. Bu sayede hem enerji tüketimi optimize edilir hem de kritik veri kayıplarının önüne geçilir.

Çevresel parametrelerin zamana bağlı değişimi ise dinamik risk analizi yöntemleriyle modellenir; akıntı, sıcaklık, tuzluluk ve görüş mesafesi gibi değişkenler, senaryo tanımları içinde güncel tutulur ve AUV'nin görev süresince adaptif davranış sergilemesine olanak tanır. Bunun yanında, belirsizliğin yoğun olduğu ortamlarda bulanık mantık temelli modeller, risk değerlendirmesi için alternatif bir çözüm sunar. Bu modeller, örneğin kutup bölgelerinde görev yapan AUV'lerin maruz kalabileceği karmaşık durumları, net sınırlarla değil de olasılık temelli kurallarla ele alarak daha esnek senaryo analizleri yapılmasını sağlar. Böylelikle, gerçek zamanlı karar verme süreçleri güçlendirilir ve görev güvenilirliği artırılır.

Tablo 2.6 Görev sırasında karşılaşılabilecek senaryolar

Senaryo	Parametre	Risk Skoru	Öneri
Derin akıntı değişimi	Akıntı hızı > 2 m/s	Yüksek	Rotanın 5° saptırılması
Sensör arızası	Oksijen sensörü arızalı	Orta	Görevin erken sonlandırılması
Deniz buzulu ile karşılaşma	Görüş mesafesi < 2 m	Yüksek	Görevin iptali ve yeni planlama

Senaryo analizleri yalnızca çevresel değişkenlerle sınırlı kalmamakta, aynı zamanda insan kaynaklı hataların etkilerini de içerecek şekilde genişletilmektedir. Bu kapsamda yapılan bir sistem dinamiği temelli analiz çalışmasında, deneyimsiz operatörlerin konuşlandırma sürecinde yapabilecekleri hataların görev başarısını %30'a kadar azaltabileceği gösterilmiştir [25].

Sonuç olarak, AUV sistemleri için senaryo temelli analiz yöntemleri, hem görev öncesi planlamada hem de sistem mimarisi tasarımında kritik rol oynamaktadır. Belirli koşullar altında sistemin nasıl davranacağına ilişkin elde edilen öngörüler, görev başarısını artırmakta ve operasyonel güvenliği pekiştirmektedir.

2.1.3.1 Uygulama Örneği: Senaryo A – Enerji Yetmezliği Durumu

Senaryo analizlerinin AUV görev planlamasına katkısını somut biçimde ortaya koymak amacıyla, tipik bir görev kurgusu üzerinde uygulama yapılmıştır. Bu bağlamda oluşturulan örnek senaryoda, AUV sisteminin başlangıçta 8 saatlik bir veri toplama görevi için yapılandırıldığı, ancak sistemin görev öncesi testleri sonucunda batarya veriminin nominal değerinden %15 daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

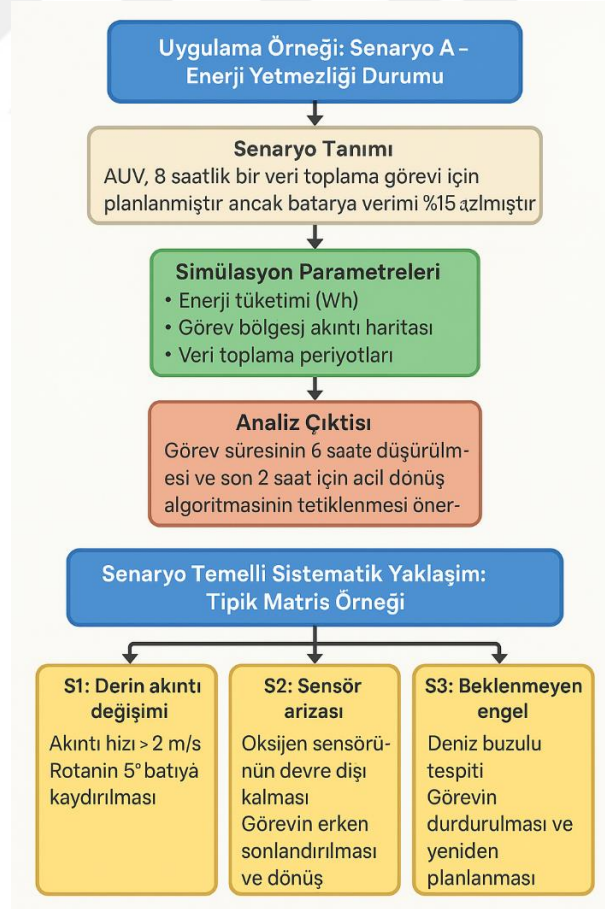
Bu senaryo kapsamında gerçekleştirilen simülasyonlarda dikkate alınan başlıca parametreler şunlardır:

- Toplam enerji tüketim tahmini (Wh),
- Görev alanına ait akıntı haritası,
- Sensör veri toplama periyotları.

Analiz sonuçlarına göre, sistemin mevcut enerji kapasitesi ile görevin tüm süresinin tamamlanmasının risk oluşturacağı belirlenmiştir. Bu nedenle görev süresinin 6 saate düşürülmesi ve kalan 2 saatlik dilim için acil dönüş algoritmasının devreye alınması önerilmiştir. Yapılan görev yeniden planlaması sayesinde, görev başarı oranı korunmuş; veri kaybı ise %10 seviyesinde tutulmuştur. Aynı zamanda enerji tüketimi optimize edilmiş ve AUV'nin görev sırasında beklenmedik kapanma veya enerji tükenmesi gibi durumlarla karşılaşma olasılığı ortadan kaldırılmıştır.

2.1.3.2 Senaryo Temelli Sistemik Yaklaşım: Tipik Matris Örneği

Senaryo analizleri kapsamında AUV sisteminin maruz kalabileceği çeşitli durumlar ve bu durumlara ilişkin öneriler, yapılandırılmış bir risk değerlendirme matrisinde aşağıdaki şekilde sunulmaktadır:



Şekil 2.9 Enerji yetmezliği senaryosu ve risk matrisine dayalı yaklaşım

Tablo 2.7 Risk senaryoları, parametreler ve önerilen müdahale

Senaryo	Parametre	Risk Skoru	Öneri
S1: Derin akıntı değişimi	Akıntı hızı > 2 m/s	Yüksek	Rotanın 5° batıya kaydırılması
S2: Sensör arızası	Oksijen sensörünün devre dışı kalması	Orta	Görevin erken sonlandırılması ve dönüş
S3: Beklenmeyen engel	Deniz buzulu tespiti	Yüksek	Görevin durdurulması ve yeniden planlanması

Bu senaryo analizi görseli, çok maksatlı bir Otonom Su Altı Aracı (AUV) için operasyonel belirsizliklere karşı geliştirilen görev planlama stratejilerinin nasıl sistematik şekilde ele alındığını ortaya koymaktadır. Senaryo A örneği üzerinden enerji kısıtı gibi öngörülebilir bir riskin, görev süresinin yeniden yapılandırılması ve acil durum algoritmalarının devreye alınması yoluyla nasıl yönetilebileceği gösterilmiştir. Ardından sunulan matris yapısı, farklı senaryolara ait risk parametrelerinin ve önerilen tepkisel stratejilerin açık biçimde sınıflandırılmasını sağlamaktadır.

2.2 Sensör Modülü Tasarımı ve Konfigurasyonu

Otonom su altı araçlarının (AUV) çok maksatlı görevleri yerine getirebilmesi, yalnızca genel hareket kabiliyetlerine değil; çevre koşullarını doğru biçimde algılayıp, pozisyonunu kesin olarak tayin edebilmesine ve görev sırasında elde ettiği verileri etkin biçimde yorumlayabilmesine bağlıdır. Bu nedenle, AUV üzerinde kullanılacak sensör modülünün tasarımı; görev çeşitliliğine uyum sağlayabilen, fiziksel olarak değiştirilebilir ya da genişletilebilir, veri işleme ve aktarım açısından da esnek bir yapıya sahip olmalıdır. Söz konusu tasarımın başarısı; modülerlik, görev-temelli konfigürasyon kabiliyeti, sistem bütünlüğü ve ölçüm güvenilirliği gibi mühendislik parametreleri ile doğrudan ilişkilidir. Bu bölümde, çok maksatlı ve ölçeklenebilir bir AUV için geliştirilecek sensör modülünün hem fiziksel yerleşimi hem de görev türlerine göre yapılandırılması detaylı biçimde incelenecek, kullanılan sensörlerin teknik özellikleri ve sistemle olan ilişkileri açıklanacaktır.

2.2.1 Hareket ve Konumlama Sensörleri

AUV'lerin otonom hareket kabiliyeti, hassas navigasyon sistemlerine entegre edilmiş gelişmiş hareket ve konum sensörleriyle sağlanır. Bu kapsamda, IMU, DVL ve basınç/derinlik sensörleri; aracın üç boyutlu uzayda konumunu, hızını ve yönelimini yüksek doğrulukla belirlemede temel rol oynar.

2.2.1.1 IMU (Inertial Measurement Unit)

IMU, AUV'nin açısal hız, ivme ve yönelim gibi hareket bilgilerini ölçerek konumlama algoritmalarında temel veriyi sağlar. Tipik olarak 3 eksenli jiroskop, 3 eksenli ivmeölçer ve bazen 3 eksenli manyetometreden oluşur. Yüksek hassasiyetli IMU'lar $\pm 0.01^\circ/\text{s}$ jiroskop hassasiyetine ve 1000 Hz örnekleme frekansına sahip olabilir. Özellikle navigasyon sistemlerinde INS (Inertial Navigation System) bileşeni olarak DVL ile birlikte kullanıldığında, GPS sinyalinin alınmadığı derin su koşullarında dahi hassas konum takibi sağlar.

2.2.1.2 Doppler Velocity Log (DVL)

DVL, deniz tabanına gönderdiği akustik sinyallerin yansıma süresini ölçerek aracın yere göre hızını hesaplar. Bu sensörler genellikle 300 kHz–1200 kHz aralığında çalışır ve ± 0.5 cm/s hassasiyetle hız ölçülebilir. AUV'nin drift kompanzasyonu ve rota düzeltmeleri için kritik bir destek sağlar. INS ile entegre kullanımı, navigasyon doğruluğunu önemli ölçüde artırır.

2.2.1.3 Basınç ve Derinlik Sensörü

Bu sensörler, aracın su içindeki dikey pozisyonunu belirlemek için kullanılır. Derinlik ölçümü genellikle ± 0.1 m çözünürlükte ve 1000 m'ye kadar ölçüm kapasitesine sahiptir. Basınca duyarlı transdüserlerin çıkış verileri, AUV'nin kontrol algoritmalarında derinlik sabitleme ve batimetrik görevlerde kullanılır.

2.2.2 Navigasyon ve Konum Belirleme Sensörleri

Navigasyon sistemlerinin doğruluğunu artırmak ve uzun süreli görevlerde yönelim hatalarını minimize etmek amacıyla, GPS ve manyetometre gibi konum destek sensörleri kullanılır. Bu sensörler, AUV'nin yüzeye çıktığında konumunu güncellemesini ve yön tayinini güvenilir biçimde gerçekleştirmesini sağlayarak genel navigasyon altyapısını tamamlar.

2.2.2.1 Küresel Konumlama Sistemi (GPS)

AUV yüzeye çıktığında mutlak konum bilgisini güncellemek için GPS kullanılır. Tipik GNSS/GPS alıcıları, 2.5 m RMS pozisyon doğruluğu ve 1 Hz veri çıkış oranına sahiptir. Bu sensör, özellikle yüzeye periyodik çıkışlarla navigasyon hatalarının azaltılmasında kullanılır. GPS, DVL ve IMU ile birlikte Kalman filtreleme gibi yöntemlerle füzyonlanarak tam bir navigasyon çözümü oluşturur.

2.2.2.2 Manyetometre

Manyetometre, yön belirlemede yardımcı olur ve özellikle IMU sistemlerinin yönelim hatalarının düzeltilmesinde rol oynar. Ayrıca bazı görev türlerinde deniz altındaki metalik anomali tespiti amacıyla da kullanılabilir. Hassasiyeti $\pm 0.5^\circ$ olan dijital manyetometreler, düşük güç tüketimiyle uzun süreli görevler için idealdir.

2.2.3 Haberleşme ve Kontrol Sensörleri / Modülleri

Su altı görevlerinde güvenli iletişim, veri yönetimi ve sistem denetimi için haberleşme altyapısı ve gömülü kontrol sistemleri hayati önem taşır. Akustik modemler, RF modüller ve gömülü işlemcilerden oluşan bu altyapı; AUV'nin çevresiyle etkileşimini, görev sırasında alınan kararları ve acil durumlara verilen tepkileri kesintisiz şekilde yönetmesini sağlar.

2.2.3.1 Akustik Modem

Su altında elektromanyetik sinyallerin yayılımı sınırlı olduğu için AUV'lerde yaygın olarak akustik modemler tercih edilir. Bu modemler 9–40 kHz frekans aralığında çalışabilir ve 500–1000 m menzile kadar düşük bant genişliği (tipik 5–20 kbps) ile veri iletimi sağlar. Görev sırasında üst sistemle komut alma, telemetri gönderme ve acil durum senaryolarında müdahale için kritik bir bileşendir.

2.2.3.2 RF Modül (Yüzey Haberleşmesi için)

Yüzeye çıkıldığında Wi-Fi, RF veya LoRa tabanlı haberleşme sistemleri kullanılarak verilerin hızlı şekilde aktarılması sağlanabilir. RF modüller genellikle yalnızca yüzeyde çalışır ve kısa menzilli (50–100 m) yüksek hızlı bağlantılar sunar.

2.2.3.3 Gömülü Sistem (Kontrol Beyni)

Gömülü sistem, tüm sensörlerden gelen verileri toplayıp işleyen ve AUV'nin kontrolünü sağlayan merkezi işlem birimidir. Genellikle ARM tabanlı işlemciler ya

da FPGA destekli kontrolcüler içerir. Gerçek zamanlı işletim sistemi (RTOS) üzerinde çalışan bu sistem, ROS, MOOS-IvP veya custom middleware ile yapılandırılabilir.

2.2.3.4 BMS ve Fail-Safe Kontrol

Battery Management System (BMS), batarya hücrelerini izleyerek aşırı akım, sıcaklık ve voltaj dalgalanmalarını kontrol eder. Fail-safe sistem, kritik arızalarda acil yüzeye çıkış, enerji kesme veya hareketin durdurulması gibi önlemleri otomatik devreye sokar. Bu sistemler genellikle sensör verilerine dayalı tetikleyicilerle çalışır.

2.2.4 Göreve Özgü Algılama Sensörleri

AUV'lerin görev çeşitliliğini destekleyebilmesi, çevresel koşullara ve hedef analizine uygun özel algılama sensörlerinin entegrasyonu ile mümkün olur. CTD sensörlerinden çok huzmeli sonar sistemlerine kadar farklı sensör tipleri; bilimsel veri toplama, hedef tespiti, görüntüleme ve haritalama gibi görevlerde yüksek hassasiyetli ölçümler sağlayarak aracın çok maksatlı kullanımını mümkün kılar.

2.2.4.1 CDT (Conductivity, Depth, Temperature) Sensörü

CTD sensörleri, okyanografik görevlerde deniz suyunun iletkenlik (tuzlulukla ilişkili), sıcaklık ve derinlik verilerini toplar. $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ sıcaklık hassasiyeti ve 0.1 PSU çözünürlüğü ile bu sensörler, su kütlesi analizi ve termohalin yapıların haritalanmasında kullanılır.

2.2.4.2 Akustik Hedef Tanıma Sonarı

Bu sonar sistemi, belirli akustik izleri (örneğin mayın, denizaltı, boru hattı) tanımlayarak hedef sınıflandırması yapar. Frekans aralığı tipik olarak 100–300 kHz arasındadır. Yüksek frekans sayesinde çözünürlük artar, ancak menzil azalır. AI tabanlı sınıflandırma algoritmalarıyla entegre edilebilir.

2.2.4.3 Kamera Sistemleri (RGB ve Düşük Işık)

Yüksek çözünürlüklü su altı kameraları (genellikle 1080p – 4K) görsel veri toplama, yüzey tanıma, yapay zeka destekli obje sınıflandırma görevlerinde kullanılır. Düşük ışık ve LED aydınlatmalı versiyonları, derin sularda bile net görüntü alınmasını sağlar.

2.2.4.4 Multibeam Sonar

Multibeam echosounder sistemleri, AUV'lerin batimetrik haritalama görevlerinde kullanılır. 300 kHz–700 kHz aralığında çalışan bu sistemler, aynı anda geniş bir tarama açısıyla çoklu ışın göndererek 3B deniz tabanı haritası çıkarabilir. Yüksek çözünürlük ve geniş kapsama alanı sunar.

2.2.5 Görev- Sensör Eşleştirme Stratejisi

Çok maksatlı bir AUV'nin görev başarımı, yalnızca sahip olduğu sensörlerin kalitesiyle değil, bu sensörlerin belirli görev profillerine uygun şekilde yapılandırılması ve yönetilmesiyle sağlanabilir. Bu nedenle görev-sensör eşleştirmesi, sistem tasarımının en kritik safhalarından biridir. Sensörlerin tüm görevlerde ortak şekilde kullanılması enerji verimliliği açısından sürdürülebilir değildir. Bunun yerine görev bazlı sensör kümeleri oluşturulmalı ve bu kümeler hem donanım seviyesinde hem de yazılım üzerinden dinamik olarak yönetilmelidir.

Her görevin; çevresel algılama, konumlama, iletişim, veri toplama ve güvenlik gibi alt işlevsel ihtiyaçları farklıdır. Örneğin batimetrik haritalama için multibeam sonar ve CDT sensörleri kritik öneme sahipken, askeri görevlerde hedef tanıma sonarı ve düşük ışık kamerası öne çıkar. Bu görevler sırasında IMU, DVL ve basınç sensörü gibi çekirdek sensörler sabit olarak kullanılırken, çevresel algılayıcılar görev tipine bağlı olarak aktif ya da pasif hale getirilir.

Görev-sensör eşleştirmesi aşağıdaki temel ilkeler çerçevesinde yapılandırılır:

- **Ortak Sensör Kümesi (Çekirdek Yapı):** IMU, DVL, basınç/derinlik sensörü ve gömülü sistem gibi sensörler, her görevde temel işlevleri yerine getirir ve sistemin çalışabilmesi için zorunludur.
- **Göreve Özgü Sensörler (Modüler Yapı):** CDT, multibeam sonar, hedef tanıma sonarı, manyetometre ve kamera gibi sensörler, yalnızca ilgili görevde aktif hale gelir. Donanım olarak sistemde bulunabilir ancak yazılımsal olarak devreye alınır.
- **Enerji–Veri Yönetimi Dengesi:** Her görevde aktif sensör sayısı, enerji tüketimi ve veri işleme kapasitesi göz önünde bulundurularak sınırlanır. Örneğin yalnızca sonar verisi ile karar alınabilecek bir görevde kamera devre dışı bırakılır.

- **Dinamik Konfigürasyon (Görev Planı Tabanlı):** Görev tanımı sistemde XML tabanlı bir görev tanım dili (ör. MDL – Mission Definition Language) ile yüklenir. Görev planı sensörleri önceden tanımlar ve yürütme sürecinde hangi sensörlerin ne zaman çalışacağı sistematik biçimde belirlenir.

Tablo 2.8 Görev türlerine göre sensör dağılımı

Görev Türü	Çekirdek Sensörler	Göreve Özgü Sensörler	İletişim Yöntemi
Askerî	IMU, DVL, Basınç	Hedef Tanıma Sonar, Kamera, Manyetometre	Akustik Modem
Okyanografik	IMU, DVL, Basınç	CDT, Multibeam Sonar	RF (Yüzeğe çıkış sonrası)
Endüstriyel	IMU, DVL, Basınç	Kamera, Multibeam, Manyetometre	Akustik Modem
Çevresel	IMU, DVL, Basınç	CDT, Kamera	RF (Yüzeğe çıkış sonrası)

Askerî görevlerde, özellikle su altı mayın taraması ve hedef tanıma operasyonlarında görev sensörleri olarak akustik hedef tanıma sonarları, düşük ışık koşullarında çalışabilen kameralar ve manyetometreler kullanılır. Bu sensörler, potansiyel tehditlerin hem akustik hem manyetik hem de görsel verilerle sınıflandırılmasını mümkün kılar. Askerî hassasiyetler doğrultusunda, bu görevlerde sessiz çalışma modu ön plandadır; bu nedenle düşük çıkış gücüne sahip sonarlar tercih edilir. İletişim çoğunlukla akustik modemler aracılığıyla sağlanır ve yalnızca kritik durumlarda, kısıtlı boyutta telemetri paketleri gönderilir. Böylece düşman tespiti gibi durumlara karşı sinyal izi minimum düzeyde tutulur.

Okyanografik görevler ise daha çok çevresel verilerin yüksek hassasiyetle toplanmasını amaçlar. Bu görevlerde, CTD sensörleri (iletkenlik, sıcaklık, derinlik) ile birlikte multibeam sonar sistemleri kullanılarak termohalin yapıların haritalanması gerçekleştirilir. Bu görevlerde enerji tüketimi ve veri güvenliği kritik olduğu için veri kaydı genellikle yerel belleğe yapılır; görev tamamlandıktan sonra

araç yüzeye çıkar ve RF haberleşme veya GPS tabanlı veri aktarımı yoluyla veriler ana istasyona ulaştırılır. Ayrıca, zaman bazlı örnekleme yapılır ve veri bütünlüğü sensör içi algoritmalarla sürekli olarak denetlenir.

Endüstriyel görevlerde, özellikle boru hattı izleme operasyonlarında görev sensörleri arasında yüksek çözünürlüklü kameralar, multibeam sonarlar ve manyetometreler yer alır. Bu sensörler, boru hattının hem dış yapısını hem de çevresel etkilerini görüntülemek ve olası bozulmaları tespit etmek amacıyla senkronize çalışır. Modern sistemlerde, görüntü verileri yapay zeka destekli analiz algoritmaları ile işlenerek çatlak, deformasyon veya sızıntı gibi durumlar otomatik olarak sınıflandırılır. Anlık olay tespiti durumunda, bu bilgiler akustik modemler aracılığıyla anında operatöre iletilir, böylece hızlı müdahale mümkün olur.

Son olarak, çevresel görevler kapsamında AUV'ler, deniz kirliliği tespiti ve habitat izleme gibi faaliyetlerde görev alır. Bu tür görevlerde kamera sistemleri ile birlikte CTD sensörleri çevresel veri toplamak için kullanılır. Görüntü verileri, özellikle mikroplastik yoğunluk haritalamasında önemli rol oynar. Bu veriler yerel bellekte saklanır ve araç yüzeye çıktığında RF haberleşmesi üzerinden veri aktarımı gerçekleştirilir. Bu görevlerde genellikle sürekli veri aktarımı yapılmaz; enerji verimliliği ön plandadır ve veri bütünlüğü güvenli şekilde korunur.

Aşağıda sunulan "Görev-Sensör Eşleşme Matrisi", çok maksatlı bir AUV (Otonom Su Altı Aracı) tasarımında farklı görev türlerinin hangi sensörlerle donatılması gerektiğini özetlemektedir. Her görev türü için 6 temel sensör (IMU, DVL, Basınç Sensörü, CTD Sensörü, Multibeam Sonar ve Kamera/Diğer) ile eşleşme durumu ikili biçimde (1: gerekli, 0: gerekmez) belirtilmiştir:

Görev Türleri	IMU	DVL	Basınç Sensörü	CTD Sensörü	Multibeam Sonar	Kamera / Diğer
Askerî Görev	1	1	1	0	0	0
Okyanografik Görev	1	1	1	1	1	0
Endüstriyel Görev	1	1	1	0	1	1
Çevresel Görev	1	1	1	1	0	1

Şekil 2.10 Görev-sensör eşleşme matrisi

Askerî Görevlerde görüldüğü üzere IMU, DVL ve Basınç Sensörü görev için temel gerekliliktir (hepsi 1). Ancak CTD Sensörü, Multibeam Sonar ve Kamera/Diğer ekipman bu görev tipi için kullanılmamaktadır (hepsi 0). Bu, askeri görevlerin daha çok konumlandırma, seyir ve derinlik sabitleme gibi hassas navigasyon özelliklerine ihtiyaç duyduğunu gösterir.

Okyanografik görevlere gelindiğinde tüm navigasyon sensörlerinin yanı sıra (IMU, DVL, Basınç Sensörü), çevresel veri ölçüm sensörleri olan CTD Sensörü ve Multibeam Sonar da bu görevde zorunludur (hepsi 1). Sadece Kamera/Diğer sensör opsiyonel tutulmuştur (0). Bu, okyanografik görevlerin bilimsel ölçümler, deniz tabanı haritalama ve çevresel analiz odaklı olduğunu ortaya koyar.

Endüstriyel görevlerin gerekliliklerinde IMU, DVL ve Basınç Sensörü yine zorunludur (1). Multibeam Sonar ve Kamera/Diğer sensörler de bu görevlerde kullanılır (1). Ancak CTD Sensörü bu tür görevlerde yer almaz (0). Bu yapı, endüstriyel görevlerin (ör. boru hattı izleme) daha çok fiziksel yapıların görsel ve yapısal analiziyle ilgili olduğunu yansıtır.

Çevresel görevler navigasyon için gerekli üç sensöre ek olarak (IMU, DVL, Basınç Sensörü), CTD Sensörü ve Kamera/Diğer de gereklidir (1). Ancak Multibeam Sonar bu görevlerde yer almaz (0). Bu, çevresel analizlerde sıcaklık, tuzluluk ve görsel verilerin daha ön planda olduğunu gösterir.

2.3 Batarya ve Enerji Yönetimi Sistem Tasarımı

Elektrik tahrikli çok maksatlı otonom su altı araçları (AUV'ler), hem askeri hem de sivil uygulamalarda karmaşık görevleri enerji bağımsız bir biçimde icra edebilen, yüksek düzeyde özelleştirilebilir platformlardır. Bu araçların başarımı büyük ölçüde, görev profiline uygun şekilde tasarlanmış enerji altyapısına bağlıdır. Özellikle batarya sistemleri, AUV'lerin görev süresi, harekât menzili, yük taşıma kapasitesi ve genel sistem güvenliği üzerinde doğrudan belirleyici role sahiptir. Bu nedenle, batarya kapasitesinin görev bazlı enerji ihtiyacına göre doğru hesaplanması ve buna entegre bir enerji yönetim sisteminin geliştirilmesi, AUV tasarımının kritik mühendislik aşamalarından biridir.

Günümüzde AUV sistemlerinde tercih edilen Li-ion bataryalar, yüksek enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü ve modüler yapıları sayesinde öne çıkmaktadır. Ancak farklı görev senaryolarında güç tüketiminin zamanla değişkenlik göstermesi,

batarya sisteminin yalnızca nominal kapasiteye değil, aynı zamanda dinamik yük koşullarına ve termal sınırlamalara göre boyutlandırılmasını gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda, görev senaryolarına bağlı güç tüketim eğrilerinin modellenmesi, zaman-integralli enerji ihtiyacı hesaplamaları ve hücre bazlı yapılandırmalarla batarya dizisinin tasarlanması, sistem düzeyinde hem süreklilik hem de güvenlik açısından optimizasyon gerektirir.

Bu bölümde, elektrik tahrikli bir AUV için en uzun görev senaryosunu esas alarak batarya kapasitesinin (Wh, Ah) görev bazlı hesaplanmasını, Li-ion hücre karakteristiklerine göre seri-paralel yapılandırılmasını ve bütünleşik bir enerji yönetim sistemi (EMS) tasarımını kapsamaktadır. Literatürde önerilen sistem mimarileri ve hücre parametreleri doğrultusunda yapılan sayısal analizler ile elde edilen sonuçlar, sistem güvenliği, görev başarımı ve enerji verimliliği açısından değerlendirilmiştir.

2.3.1 Batarya Sistemlerinin AUV'lerdeki Rolü

Otonom su altı araçlarında (AUV), batarya sistemleri yalnızca bir enerji kaynağı değil; aynı zamanda aracın görev süresini, hareket kabiliyetini, yük taşıma kapasitesini ve genel operasyonel güvenliğini doğrudan etkileyen birincil belirleyici unsurdur. Elektrik tahrikli AUV'ler, görev boyunca tahrik sistemleri, kontrol-elektronik birimleri, sensör kümeleri ve haberleşme modülleri gibi birçok alt sistemi sürekli olarak beslemek zorundadır. Bu nedenle, batarya sistemleri hem anlık güç taleplerini karşılayacak çıkış kapasitesine hem de uzun süreli görev profillerine uyum sağlayacak enerji yoğunluğuna sahip olmalıdır.

Modern AUV uygulamalarında yaygın olarak tercih edilen enerji teknolojisi, lityum-iyon (Li-ion) bataryalardır. Li-ion hücreler, 150–250 Wh/kg arası özgül enerji değerleri ile geleneksel kurşun-asit, nikel-kadmiyum veya gümüş-çinko temelli batarya sistemlerine kıyasla daha uzun görev sürelerine olanak tanır [26]. Ayrıca, daha kompakt hacimlerde daha fazla enerji depolayabilmeleri, derin deniz uygulamaları için hacim-kütle optimizasyonunu mümkün kılar.

Ancak batarya sisteminin etkinliği sadece hücre tipiyle değil; aynı zamanda bu hücrelerin uygun seri-paralel topolojide yapılandırılması, görev senaryosuna göre yük profiliyle eşleştirilmesi ve termal güvenliğin sağlanmasıyla da ilişkilidir. Özellikle uzun süreli görevlerde enerji tüketimindeki dalgalanmalar, bataryaların

derin deşarj riskine girmesine neden olabilir. Bu durum, hem hücre ömrünü kısaltır hem de sistem güvenliğini riske atar. Bu nedenle, batarya sistemleri genellikle bir **Enerji Yönetim Sistemi (EMS)** ile entegre edilerek, şarj-deşarj dengesi, hücre sıcaklığı, voltaj eşitleme ve arıza önleme fonksiyonları ile sürekli izlenir.

Bunun yanında, bazı AUV sistemleri, görev süresini artırmak amacıyla hibrit güç sistemleri (örneğin yakıt hücresi + batarya kombinasyonu) kullanmayı tercih etmektedir. Ancak hibrit sistemlerin hacimsel karmaşıklığı ve kontrol algoritmalarının hassasiyeti, batarya odaklı tasarımları hâlâ tercih edilir kılmaktadır.

Sonuç olarak, batarya sistemleri AUV mimarisinin yalnızca bir bileşeni değil, tüm görev zincirinin sürdürülebilirliğini sağlayan stratejik bir alt sistemdir. Bu nedenle hem hücresel düzeyde hem de sistem düzeyinde dikkatli tasarlanması gerekir.

2.3.2 Elektriksel Güç İhtiyacının Formülasyonu ve Görev Bazlı Enerji Hesabı

Elektrik tahrikli bir AUV'nin görev sırasında tükettiği enerji, aracın hidrodinamik sürüklenmeye karşı koyarak hareket etmesi, yönlendirme ve kontrol mekanizmalarını çalıştırması, sensör ve haberleşme sistemlerini işletmesi gibi birçok alt sistemin güç gereksinimlerinin toplamından oluşur. Bu güç ihtiyacı zamanla değişkenlik gösterebileceği için, görev bazlı enerji hesaplamalarında zamana bağlı bir güç fonksiyonu tanımlanarak entegral alınması gereklidir:

$$E_{total} = \int_0^T P(t) dt \quad (2.1)$$

Burada:

- E_{total} : toplam enerji ihtiyacı [Wh veya J]
- $P(t)$: zamana bağlı anlık toplam güç tüketimi [W]
- T : görev süresi [h veya s]

2.3.2.1 Tahrik Sistemi Güç İhtiyacı

AUV'nin su altında hareket ederken karşılaştığı başlıca direnç kuvveti, sürüklenme (drag) kuvvetidir. Bu kuvvet aşağıdaki gibi modellenir:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A \cdot v^2 \quad (2.2)$$

Burada:

- F_D : sürüklenmekuvveti[N]
- ρ : ortamıyoğunluğu[kg/m³]
- C_D : dirençkatsayısı(boyutavegövdeşeklinebağlı)
- A : aracınfrontal(projeksiyon)alanı[m²]
- v : seyirhızı[m/s]

Bu kuvvete karşı yapılması gereken mekanik iş, hareket yönündeki kuvvetle hızın çarpımı ile bulunur:

$$P_{mech} = F_D \cdot v \quad (2.3)$$

Elektriksel güce dönüştürülmesi gereken enerji, tahrik sisteminin verimliliği (η) dikkate alınarak aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$P_{elec} = \frac{P_{mech}}{\eta} \quad (2.4)$$

2.3.2.2 Yardımcı Sistemlerin Güç Tüketimi

AUV içerisinde çalışan diğer sistemlerin (navigasyon, haberleşme, sensörler, kontrol birimi vb.) güç tüketimi genellikle zamandan bağımsız olarak sabittir ve toplam yardımcı güç şu şekilde gösterilir:

$$P_{AUV} = \sum_{i=1}^n P_i \quad (2.5)$$

Burada:

- n : toplam alt sistem sayısı
- P_i : i 'inci alt sistemin güç tüketimi [W]

2.3.2.3 Toplam Güç ve Enerji Hesabı

Toplam anlık güç tüketimi, tahrik ve yardımcı sistemlerin toplamıdır:

$$P_{total}(t) = P_{elec}(t) + P_{AUV} \quad (2.6)$$

Bu ifade süreye bağlı ise toplam enerji yine integral yolu ile hesaplanır:

$$E_{total} = \int_0^T (P_{elec}(t) + P_{AUV}) dt \quad (2.7)$$

Eğer görev boyunca güç sabit ise :

$$E_{total} = P_{total} \cdot T \quad (2.8)$$

Şeklinde hesaplanır. Bu enerji, batarya sisteminin kapasitesinin belirlenmesinde temel girdi olacaktır ve bir sonraki bölümde bu enerji değeri üzerinden batarya kapasitesi Ah ve Wh cinsinden nasıl hesaplanacağı ve hücre bazında yapılandırma formülleri anlatılacaktır.

2.3.3 Batarya Kapasitesinin Belirlenmesi ve Hücresel Yapılandırma

Görev süresi boyunca ihtiyaç duyulan toplam enerji E_{total} , batarya sisteminin sağlayabileceği enerji ile karşılanmalıdır. Batarya kapasitesi bu nedenle, görev süresi, güç ihtiyacı ve hücre özelliklerine bağlı olarak hem enerji (Wh) hem de kapasite (Ah) cinsinden hesaplanır.

2.3.3.1 Toplam Batarya Enerjisi (Wh)

Bir batarya paketi, sistem voltajı V_{sys} altında, toplam kapasitesi C_{pack} kadar elektrik yükü sağlayabilir. Bu durumda paketin sağlayabileceği toplam enerji:

$$E_{pack} = V_{sys} \cdot C_{pack} [Wh] \quad (2.9)$$

Bu enerji miktarı, AUV'nin tüm görev süresince harcayacağı enerjiden küçük olamaz.

$$E_{pack} \geq E_{total} \quad (2.10)$$

Bu eşitsizlikten hareketle, batarya kapasitesine yönelik minimum gereksinim doğrudan hesaplanabilir.

$$C_{pack} \geq \frac{E_{total}}{V_{sys}} \quad (2.11)$$

Bu ifade, görev süresi ve ortalama güç tüketimi belli olan bir sistemde, hücre seçimi yapılmadan önce sistem mühendisliği düzeyinde ilk kapasite kararını verir. Tasarımın bu aşamasında yapılan hata, ya görev süresinin eksik kalmasına ya da gereksiz ağırlık ve hacim yüküne neden olabilir.

2.3.3.2 Hücre Parametrelerine Göre Seri-Paralel Yapılandırma

AUV sistemlerinde kullanılan Li-ion hücrelerin her biri belirli bir gerilim (V_{cell} ve kapasite C_{cell}) ile tanımlanır. Bu hücreler, sistem gerilimini sağlamak için seri, kapasiteyi artırmak için paralel bağlanır. Gerekli seri hücre sayısı (çıkış voltajı için):

$$N_s = \frac{V_{sys}}{V_{cell}} \quad (2.12)$$

Bu ifade, batarya paketi çıkışının motor ve güç elektroniği sisteminin gerilim gereksinimini karşılayacak düzeyde olması gerektiğini varsayar. Burada sistem voltajı sabit tutulmalı, hücre sayısı ona göre ayarlanmalıdır. Voltaj esnekliği olan uygulamalarda ise bu ters yönde çözümlenebilir. Gerekli paralel hücre sayısı (toplam kapasite için):

$$N_p = \frac{C_{pack}}{C_{cell}} \quad (2.13)$$

Toplam hücre sayısı, sistemin hem çıkış voltajını hem de istenen enerji miktarını sağlayacak şekilde belirlenir:

$$N_{total} = N_s \cdot N_p \quad (2.14)$$

Bu yapı, batarya sisteminin fiziksel büyüklüğü, ağırlığı ve ısı yayılımını da doğrudan etkiler. Özellikle paralel yapı büyüdükçe, akım dengesizliği ve hücre içi sıcaklık farkları oluşabilir; bu nedenle hücre eşleme ve sıcaklık sensörlemesi hayati önem taşır.

2.3.3.3 Hücresel Enerji Eşdeğeri ve Doğrulama

AUV batarya sisteminde kullanılan hücrelerin sağladığı toplam enerjinin, aracın görev boyunca ihtiyaç duyduğu enerji miktarını karşılayıp karşılamadığının doğrulanması amaçlanmaktadır. Hesaplamalar, tek bir batarya hücresinin kapasitesinden yola çıkarak tüm hücrelerin sistem düzeyindeki enerji katkısını analiz eder. Enerji gereksiniminin altında kalan bir sistem konfigürasyonu, görevin tamamlanamamasına veya sistemin aniden kapanmasına neden olabilir. Bu nedenle, hücresel düzeyde yapılan hesaplama görev planlamasının güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir.

İlk olarak, tek bir hücrenin sağlayabileceği enerji miktarı, aşağıdaki formül ile tanımlanır:

$$E_{cell} = V_{cell} \cdot C_{cell} [Wh] \quad (2.15)$$

Ardından, sistemde yer alan tüm hücrelerin oluşturduğu toplam kullanılabilir enerji aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$E_{available} = N_{total} \cdot E_{cell} = N_s \cdot N_p \cdot V_{cell} \cdot C_{cell} \quad (2.16)$$

Burada:

Bu değer sistem düzeyinde hesaplanan görev enerjisini karşılamalıdır.

$$E_{available} \geq E_{total} \quad (2.17)$$

Bu koşul sağlanmadığı sürece, batarya paketi sistem açısından yetersizdir. Yetersiz hücre sayısı ya görev süresinin kesilmesine ya da düşük deşarj gerilimi nedeniyle sistem kapanmasına neden olabilir.

2.3.3.4 Güvenlik Marjı ve Kullanılabilir Enerji

Bataryalar hiçbir zaman tam kapasiteyle kullanılmaz; hem güvenlik (aşırı deşarj koruması) hem de hücre ömrü optimizasyonu amacıyla kullanılabilir kapasite, nominal kapasitenin altında tutulur. Bu durum, kullanılabilir kapasiteyi bir güvenlik faktörü ($\alpha > 1$) ile tanımlar:

$$C_{usable} = \frac{C_{pack}}{\alpha} \Rightarrow E_{usable} = V_{sys} \cdot C_{usable} \Rightarrow E_{usable} \geq E_{total} \quad (2.18)$$

Bu güvenlik marjı tasarımda %10–30 arasında seçilebilir; termal koşulların zorlu olduğu görevlerde ise bu marj daha da artırılır. Ayrıca, nominal değerler üretici laboratuvar koşullarında ölçüldüğünden, gerçek uygulamalarda her zaman pay bırakmak zorunludur.

2.3.3.5 Enerji Yönetim Sistemi (EMS) Tasarımı

Görev odaklı AUV sistemlerinde batarya kapasitesinin doğru hesaplanması kadar, bu enerjinin güvenli, dengeli ve verimli biçimde kullanılması da operasyon başarısı açısından kritiktir. Bu bağlamda Enerji Yönetim Sistemi (EMS), batarya paketi ile güç tüketen alt sistemler arasındaki enerji akışını yöneten, gerçek zamanlı kararlar alabilen ve sistem bütünlüğünü izleyen çok katmanlı bir kontrol altyapısıdır. EMS, aşağıdaki dört ana fonksiyonu eşzamanlı olarak yerine getirmelidir:

- **Şarj/Deşarj İzleme ve Kontrol**

EMS, batarya gerilimini (V), akımını (I) ve sıcaklığını (T) sürekli izleyerek şarj ve deşarj süreçlerinin güvenli sınırlar içinde kalmasını sağlar. Aşırı akım, aşırı gerilim veya aşırı sıcaklık durumlarında şarj/deşarj işlemini kesintiye uğratar:

$$V_{min} \leq V(t) \leq V_{max} \quad (2.19)$$

$$I(t) \leq I_{max} \quad (2.20)$$

$$T(t) \leq T_{max} \quad (2.21)$$

pozisyonları sağlandığı sürece şarj devam eder. Bu koşullardan biri ihlal edilirse EMS tarafından sistem kapatılır veya yükten izole edilir.

- **Hücre Dengeleme (Cell Balancing)**

Seri bağlı hücrelerde zamanla voltaj farkları oluşur. Bu dengesizlik, paketin erken kapasite kaybına ve aşırı gerilimli hücrelere neden olabilir. EMS, aktif veya pasif dengeleme yöntemleriyle hücreler arasındaki voltajı eşitler:

$$\Delta V_i = V_{max} - V_i \leq \delta tol \quad (2.22)$$

Burada δtol , dengeleme tolerans aralığıdır (örneğin 0.01 V).

- **Yük Önceliklendirme ve Enerji Paylaştırma**

AUV görevleri boyunca tüm alt sistemlerin aynı anda çalışması gerekmez. EMS, görev profiline bağlı olarak yükleri önceliklendirerek enerji tahsisini optimize eder.

Örneğin; seyir sırasında tahrik sistemine öncelik verilirken, veri toplama anında sensörlere güç aktarımı maksimize edilir.

Bu durum, zaman fonksiyonu olarak tanımlanan yük önceliği matrisiyle kontrol edilir:

$$P_i(t) = f_{\text{mission}}(t) \cdot \lambda_i \quad (2.23)$$

Bu denklemde:

- $P_i(t)$: i'nci sistemin zamana bağlı güç tüketimi
- $f_{\text{mission}}(t)$: görev fonksiyonu
- λ_i : i'nci sistemin görevle ilişkili katsayısı

Bu yaklaşım sayesinde, sistem genelinde enerji kullanımı görev ihtiyaçlarına göre dinamik olarak dağıtılır. Böylece hem enerji verimliliği artar hem de görev süresi boyunca kritik alt sistemlerin çalışması güvence altına alınır.

- **Kalan Enerji ve Görev Süresi Tahmini**

EMS, anlık güç tüketimini entegre ederek kalan enerji miktarını ve tahmini görev süresini hesaplar. Bu işlem, batarya kapasitesinin daha verimli kullanılmasını sağlar:

$$E_{\text{remaining}}(t) = E_{\text{pack}} - \int_0^t P(\tau) d \quad (2.24)$$

$$T_{\text{remain}} = \frac{E_{\text{remaining}}(t)}{P_{\text{avg}}} \quad (2.25)$$

Bir sistemin kalan enerji miktarı, başlangıçta bataryada bulunan toplam enerjiden o ana kadar harcanan enerji çıkarılarak hesaplanır. Harcanan enerji ise zaman boyunca sistemin güç tüketimi dikkate alınarak belirlenir. Bu sayede, mevcut kalan enerji değeri elde edilir. Elde edilen bu kalan enerji, sistemin ortalama güç tüketimine bölünerek sistemin ne kadar süre daha çalışabileceği, yani kalan görev süresi tahmin edilir. Bu tahmin, AUV'nin görev sonlandırma kararlarını veya eve dönüş modunu tetikleyen algoritmalarda temel girdidir.

2.3.3.5 Temel Görevlere Özgü Güç Fonksiyonları

Çok maksatlı AUV sistemleri genellikle farklı görev modlarına sahiptir. Her bir görev modunun enerji tüketim karakteristiği farklıdır; dolayısıyla her biri ayrı ayrı değerlendirilmelidir. Aşağıda, temel dört görev moduna ilişkin güç tüketimi ve buna bağlı enerji ihtiyacı modelleri verilmiştir. Sonrasında bunlar toplam enerji bütçesi içinde birleştirilecektir.

AUV görev planlamasında enerji yönetiminin doğru yapılabilmesi için toplam görev süresi T , aracın farklı işlevsel modlarda geçirdiği zaman dilimlerine ayrılarak analiz edilmelidir. Bu kapsamda görev süresi dört temel alt moda bölünür:

- T_1 : Seyir
- T_2 : Durağan Gözlem
- T_3 : Yüksek Güçlü manevra
- T_4 : Veri İşleme ve iletim

Toplam görev süresi:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \quad (2.26)$$

Her modun kendine ait güç profili $P_i(t)$ ve süresi vardır.

2.3.5.1 Seyir Hızı:

Sabit hızla ilerleyen AUV'nin harcadığı enerji, hidrodinamik sürüklenmeye karşı yapılan işe dayalıdır. Güç fonksiyonu:

$$P_1(t) = \frac{1}{2\eta} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A \cdot v(t)^3 \quad (2.27)$$

Bu denklem, bir aracın (örneğin bir AUV'nin) tahrik sistemine ait anlık güç tüketimini tanımlar. Denklemde:

- $P_1(t)$: zamana bağlı değişken tahrik güç ihtiyacı
- η : Tahrik sisteminin verimi (0-1 arasında bir katsayı)
- ρ : Ortamın yoğunluğu (örneğin su için)
- C_D : Sürüklenme katsayısı
- A : Aracın önden görülen alanı (frontal alan)
- $v(t)$: Zamanla değişen hız

Bu formül, sürüklenme kuvvetine karşı gerekli gücü verimle ilişkilendirir ve hızın küpüyle doğru orantılı olduğunu gösterir. Bu nedenle hızdaki küçük bir artış, enerji ihtiyacını büyük ölçüde artırır.

2.3.5.2 Durağan Gözlem Enerjisi:

Gömülü sistemler içerisinde yer alan sensörler ve kontrol birimi, genel güç tüketiminin önemli ama genellikle sabit kalan bir bölümünü oluşturur. Bu bileşenlerin enerji talepleri, sistem çalıştığı sürece süreklilik gösterir ve zamanla önemli bir değişim göstermez. Bu nedenle, bu alt sistemlerin güç tüketimi sabit kabul edilerek, görev süresi boyunca enerji yönetiminde kararlı bir yük olarak değerlendirilir.

$$P_2(t) = \sum_{j=1}^n P_{j,sensor} + P_{controller} \Rightarrow P_2(t) = \text{const} \quad (2.28)$$

Bu denklem, bir sistemdeki ikinci alt yükün (örneğin bir gömülü sistemde sensörler ve kontrol birimi) toplam güç tüketimini ifade eder.

- $P_2(t)$: Sensör ve kontrolcünün toplam anlık güç tüketimi
- $P_{j,sensor}$: j 'inci sensörün güç tüketimi
- $P_{controller}$: Ana kontrol biriminin sabit güç tüketimi
- n : Toplam sensör sayısı

Bu bileşenlerin güç tüketimi zamanla değişmediği için sistem tasarımında sabit bir yük olarak dikkate alınabilir. Bu sayede enerji yönetimi daha öngörülebilir hale gelir ve görev planlaması sadeleşir.

2.3.5.3 Manevra Enerjisi

AUV'nin görev sırasında ani yön değişiklikleri, derinlik geçişleri ya da kaçınma manevraları gerçekleştirilmesi, klasik sabit seyirden farklı olarak momentum transferine dayalı, ani ve yoğun güç gerektiren bir çalışma modudur. Bu tür manevralar sırasında tahrik sistemi, hem translasyonel hareketi (itki) hem de rotasyonel momenti (stabilizasyon) üretmek zorundadır.

Bu durumda AUV'nin toplam güç gereksinimi, iki temel alt sistemin eş zamanlı çalışmasına bağlı olarak modellenir:

$$P_3(t) = P_{\text{thrust}}(t) + P_{\text{stabilizer}}(t) \quad (2.29)$$

$P_{\text{thrust}}(t)$: Ani hızlanma veya yavaşlama sırasında ana tahrik motorlarının zamanla değişen güç talebidir. Bu bileşen, genellikle itki sisteminin kısa süreli yüksek akım çekişiyle karakterizedir.

$P_{\text{stabilizer}}(t)$: AUV'nin yönelmesini (yaw, pitch, roll) kontrol eden kanatçıklar, mikro iticiler veya kontrol jiroskoplarının harcadığı gücü ifade eder. Özellikle deniz akıntısı veya asimetrik yük altında bu güç bileşeni kritik hale gelir.

Bu iki güç bileşeni eş zamanlı ve değişken olduğundan, toplam güç zamana bağlı, sürekli değişken bir fonksiyondur. Bu nedenle enerji, sabit güç \times süre yaklaşımıyla değil, integral yöntemiyle hesaplanmalıdır:

$$E_3 = \int_0^{T_3} P_3(t) dt = \int_0^{T_3} [P_{\text{thrust}}(t) + P_{\text{stabilizer}}(t)] dt \quad (2.30)$$

Bu ifade, yüksek ivmeli modun AUV üzerindeki enerji yükünü zamana göre akışkan biçimde değerlendirmemize olanak tanır.

2.3.5.4 Veri İşleme ve İletim Enerjisi:

Otonom Sualtı Aracı (AUV) görevleri sırasında yalnızca hareket etmekle kalmaz, aynı zamanda çevresel verileri toplar, işler, depolar ve bu verileri kıyı istasyonuna veya başka bir platforma iletir. Bu işlevleri gerçekleştiren alt sistemler; işlem birimi (CPU), haberleşme modülü (verici, P_{tx}) ve veri depolama biriminden P_{storage} oluşur.

Bu nedenle, veri işleme ve iletim alt sistemine ait toplam anlık güç tüketimi sabit kabul edilerek şu şekilde ifade edilir:

$$P_4(t) = P_{\text{cpu}} + P_{\text{tx}} + P_{\text{storage}} \Rightarrow P_4(t) \quad (2.31)$$

Bu sabit güç tüketimine karşılık gelen enerji ihtiyacı ise, bu işlevlerin gerçekleştirildiği zaman aralığı T_4 ile çarpılarak hesaplanır:

$$E_4 = P_4 \cdot T_4 \quad (2.32)$$

Bu yaklaşım, sistem düzeyinde enerji tahsisini planlarken veri işleme ve iletişim gibi sabit yüklerin öngörülebilirliğini sağlar ve görev süresi boyunca toplam enerji tüketimi üzerinde doğrudan etkili olur.

2.3.5.5 Toplam Görev Enerjisi

AUV benzeri enerji kısıtlı sistemlerde, her görev modu farklı alt sistemleri çalıştırdığı için farklı miktarda enerji tüketir. Bu nedenle, görev süresince toplam enerji ihtiyacının doğru şekilde hesaplanması, hem batarya kapasitesinin belirlenmesi hem de görev planlamasının yapılması açısından kritik öneme sahiptir. Toplam görev enerjisi, her bir görev moduna karşılık gelen enerji bileşenlerinin cebirsel toplamı şeklinde ifade edilebilir:

$$E_{\text{total}} = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 \quad (2.33)$$

Alternatif olarak, bu bileşenler zamana bağlı güç fonksiyonları cinsinden açık biçimde yazılabilir. Buna göre, değişken güç tüketimine sahip modlar için integral, sabit güç tüketimine sahip modlar içinse basit çarpım kullanılarak toplam enerji şu şekilde ifade edilir:

$$E_{\text{total}} = \int_0^{T_1} P_1(t) dt + P_2 \cdot T_2 + \int_0^{T_3} P_3(t) dt + P_4 \cdot T_4 \quad (2.34)$$

Bu ifade, görev öncesi enerji bütçesi oluşturmak, batarya kapasitesini belirlemek ve görev kararlarının (başlatma, iptal, kesme) enerji temelinde modellenmesi için doğrudan kullanılabilir. Ayrıca, görev modlarına ait $P_i(t)$ fonksiyonları gerçek zamanlı görev profilleriyle eşleştirilerek sayısal (nümerik) yöntemlerle simülasyon ortamında çözümlenebilir. Bu da sistem davranışının zamana bağlı olarak analiz edilmesine olanak sağlar.

2.3.3.6 Operasyonel Bazlı Senaryolardaki Batarya Kapasite Hesapları

Bu bölümde, çok maksatlı bir AUV'nin farklı görev türleri kapsamında gerçekleştireceği operasyonlara bağlı olarak batarya kapasite gereksinimleri nicel olarak analiz edilecektir. Hesaplamalar, bir önceki alt başlıkta sunulan temel güç-zaman ilişkili formüller temel alınarak yapılacaktır. Analiz, dört ana alt görev modu (seyir, durağan gözlem, manevra ve veri işleme/iletişim) üzerinden yürütülecek ve her bir operasyonel senaryo bu modlar üzerinden yapılandırılacaktır.

Değerlendirilen operasyonel senaryolar arasında;

- **Askerî operasyonlar** kapsamında su altı mayınlarının tespiti,
- **Endüstriyel uygulamalar** kapsamında boru hattı izleme faaliyetleri ve

- **Okyanografik görevler** kapsamında su kalitesi izleme operasyonları yer almaktadır.

Her görev türü için alt görev modlarının süre ve güç tüketim profilleri ayrı ayrı analiz edilerek, operasyonel toplam enerji gereksinimi E_{total} hesaplanacaktır. Ardından, bu enerji ihtiyacını karşılayacak batarya sistemi yapılandırması (hücre sayısı, dizilim şekli ve toplam kapasite) detaylandırılacaktır. Hesaplamalarda, her operasyon için belirli bir güvenlik marjı (%20-30) da dikkate alınarak nihai batarya kapasitesi belirlenecektir.

Bu yaklaşım, çok görevli AUV sistemleri için hem görev verimliliğini hem de enerji sürekliliğini sağlayacak entegre bir batarya tasarımının temelini oluşturacaktır. Tüm hesaplamalar, mühendislik prensiplerine dayalı bilimsel formüllerle desteklenerek sistematik biçimde sunulacaktır.

Aşağıda her görev için alt modlara göre **varsayımsal ama literatüre dayalı** süreler ve güç değerleri verilmiştir. Tüm görevlerde 8 saatlik toplam görev süresi varsayılmıştır.

2.3.3.6.1 Askerî Görev İçin Alt Mod Bazlı Enerji Tüketim Analizi

Askerî operasyonlar kapsamında yürütülen bir AUV görevi – örneğin su altı mayınlarının tespiti ve tanımlanması – yüksek hassasiyet, uzun menzil seyri ve yoğun veri işleme gereksinimleri barındıran çok aşamalı bir yapıya sahiptir. Bu görevler, sistemin çeşitli modlarda farklı güç profillerine maruz kalmasına neden olur. Bu nedenle, enerji tüketimini yalnızca toplam görev süresi üzerinden değil; her bir alt modun süre ve ortalama güç ihtiyacına göre ayrı ayrı analiz etmek gereklidir.

Alt Görev Modlarının Tanımı ve Enerji Denklemi

Toplam görev süresi T , aşağıdaki dört alt fonksiyonel moda ayrılır:

- **T_1 – Seyir (Cruising):** AUV'nin görev bölgesine ulaşması veya görev sahası içerisinde belirli bir rotayı takip etmesi sırasında çalışır. Bu modda ortalama güç tüketimi genellikle sabit itki (thruster) gücü ve yönlendirme kontrol sistemlerinin enerji gereksinimiyle sınırlıdır.
- **T_2 – Durağan Gözlem (Station Keeping):** Belirli bir noktada sabit kalarak sonar, kamera ve diğer sensörler aracılığıyla çevresel veri toplama

görevlerinin yerine getirildiği moddur. Bu fazda güç tüketimi daha düşük olmakla birlikte süre daha uzundur.

- **T₃ – Manevra (Dynamic Actuation):** Araç, hedefe yönelme, engelden kaçınma veya pozisyon düzeltme gibi yüksek ani itki gerektiren işlemleri yürütür. Ortalama güç bu fazda en yüksektir.
- **T₄ – Veri İşleme ve İletim (Sensing & Communication):** Toplanan sensör verilerinin işlenmesi, ön analiz yapılması ve bu verilerin yüzeysel gemisine veya merkezi sisteme aktarılması süreçlerini kapsar. Enerji ihtiyacı, bilişsel yük ve veri hacmine bağlıdır.

Toplam enerji tüketimi şu şekilde ifade edilir:

$$E_{\text{total}} = \sum_{i=1}^4 P_i \cdot T_i \quad (2.35)$$

Örnek bir askeri görevde AUV'nin alt modlara göre çalışma süresi ve ortalama güç değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir:

Tablo 2.9 Askeri göreve dayalı alt modlar

Alt Mod (T _i)	Süre (saat)	Ortalama Güç (W)	Açıklama
T ₁ – Seyir	2 h	150 W	Sessiz modda düşük hızlı, hedefe yönelik seyir
T ₂ – Gözlem	3 h	90 W	Mayın tespiti sırasında sonar ve kamera sistemleri aktif
T ₃ – Manevra	2 h	180 W	Hedef yaklaşma ve kaçınma manevraları
T ₄ – Veri İşleme	1 h	50 W	Görüntü sınıflandırma ve iletişim modülü çalışması

Her modun enerji tüketimi ayrı ayrı hesaplanarak aşağıda verilmiştir:

$$E_{T_1} = 2 \cdot 150 = 300 \text{ Wh}$$

$$E_{T_2} = 3 \cdot 90 = 270 \text{ Wh}$$

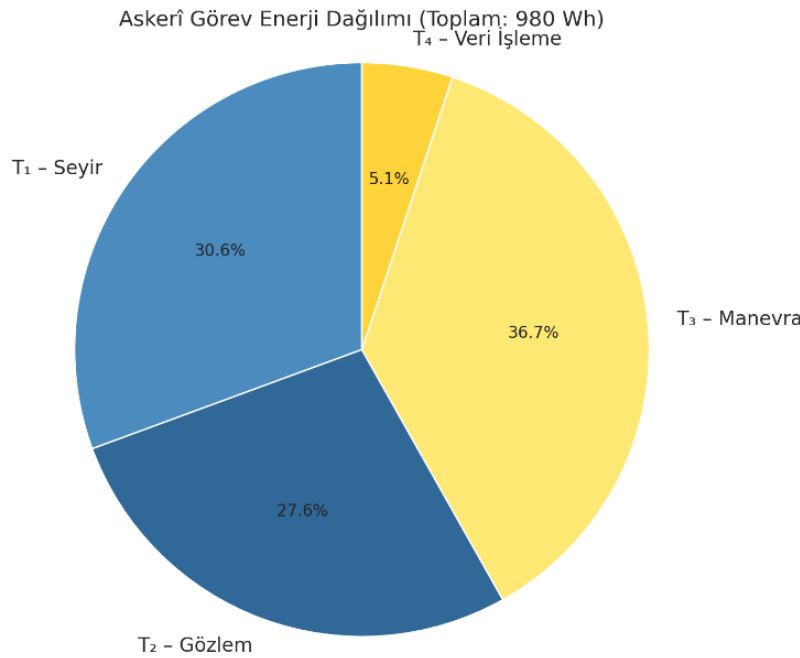
$$E_{T_3} = 2 \cdot 180 = 360 \text{ Wh}$$

$$E_{T_4} = 1 \cdot 50 = 50 \text{ Wh}$$

Buna göre toplam görev enerji ihtiyacı:

$$E_{\text{askeri}} = E_{T_1} + E_{T_2} + E_{T_3} + E_{T_4} = 300 + 270 + 360 + 50 = \boxed{980 \text{ Wh}}$$

Bu görev için toplam 980 Wh enerji gereksinimi, sistemin 8 saatlik görev süresi boyunca kesintisiz çalışabilmesi adına kritik bir girdidir. Bu enerji, yalnızca batarya seçiminde değil; aynı zamanda batarya yerleşimi, termal yönetimi ve batarya yönetim sistemi (BMS) yazılım konfigürasyonlarının belirlenmesinde de temel kriter olarak alınmalıdır. Yüksek güçlü manevra fazının (%37) enerji tüketimindeki dominant rolü, itici sistem tasarımında özel önem gerektirir. Aynı zamanda uzun süreli gözlem modlarının düşük güçle ancak uzun süre çalıştığı unutulmamalıdır.



Şekil 2.11 Askerî görev enerji dağılımı

Ancak bu enerji miktarı, modern askeri operasyonlar için yetersiz kalmaktadır. Literatüre ve sahada kullanılan sistemlere göre, bir askeri AUV görevi için gereken enerji miktarı genellikle 2500-3000 Wh arasındadır. Bu nedenle, batarya sistemi

yukarıdaki enerjiye göre değil, bu hedefe uygun olacak şekilde optimize edilmelidir.

Batarya Kapasitesinin Belirlenmesi

oplam enerji ihtiyacı 3000 Wh olacak şekilde, sistem voltajı $V_{\text{sys}} = 28.8$ V kabul edilirse, genellikle batarya kapasitesi:

$$C_{\text{pack}} \geq \frac{3000}{28.8} = 104.17 \text{ Ah}$$

Seri-Paralel Yapılandırma ve Toplam Enerji Doğrulaması ile Kullanılan Li-on hücre parametreleri:

$$V_{\text{cell}} = 3.6 \text{ V}$$

$$C_{\text{cell}} = 2.5 \text{ Ah} \Rightarrow E_{\text{cell}} = 9 \text{ Wh}$$

$$N_s = \frac{28.8}{3.6} = 8$$

$$N_p = \frac{104.17}{2.5} = 41.67 \Rightarrow \boxed{42}$$

$$N_{\text{total}} = 8 \cdot 42 = 336 \text{ hücre}$$

Buna göre toplam sağlanabilecek enerji:

$$E_{\text{available}} = 336 \cdot 9 = 3024 \text{ Wh} \geq E_{\text{total}}$$

Güvenlik faktörü $\alpha = 1.2$ alınır ise:

$$\alpha = 1.2 \Rightarrow C_{\text{usable}} = \frac{105}{1.2} = 87.5 \text{ Ah}$$

$$E_{\text{usable}} = 87.5 \cdot 28.8 = 2520 \text{ Wh}$$

Şeklinde hesaplanabilir. Bu değer, sistem operasyonel sürekliliği için yeterlidir.

Modern askeri senaryolarda, AUV sisteminin enerji tasarımı yalnızca teorik görev senaryolarına göre değil, sahada karşılaşılan ani durumlar ve beklenmedik enerji talepleri göz önünde bulundurularak yapılandırılmalıdır. Bu nedenle, 8S42P konfigürasyonuna sahip, 336 hücreli ve 3024 Wh enerji sağlayan batarya sistemi; güvenlik, verimlilik ve operasyonel süreklilik açısından en uygun tasarım olarak öne çıkmaktadır.

2.3.3.6.2 Endüstriyel Görev İçin Alt Mod Bazlı Enerji Tüketim Analizi

Endüstriyel görevlerde, örneğin deniz altı boru hatlarının bütünlüğünü kontrol etmeye yönelik görev senaryolarında, AUV'nin hem uzun menzilli seyir yeteneğine hem de hassas konumlandırmaya sahip olması beklenir. Bu tür görevler, görece daha uzun seyir süreleri ve karmaşık manevra profilleri içerdiğinden, enerji tüketim modeli bu koşullara göre oluşturulmalıdır.

Alt Görev Modlarının Tanımı ve Enerji Denklemi

Alt modlar yine sabittir ve seyir, gözlem, manevra ve veri işleme aşamalarını içerir. Enerji tüketimi şu denklemle tanımlanır:

$$E_{\text{total}} = \sum_{i=1}^4 P_i \cdot T_i$$

Bu senaryoda AUV'nin alt modlara göre çalışma süresi ve ortalama güç değerleri aşağıdaki tablodaki gibidir:

Tablo 2.10 Endüstriyel göreve dayalı alt modlar

Alt Mod (T _i)	Süre (saat)	Ortalama Güç (W)	Enerji (Wh)	Açıklama
T ₁ – Seyir	2.5	170	425	Boru hattı güzergâhını takip
T ₂ – Gözlem	2.5	110	275	Termal ve akustik veri toplama
T ₃ – Manevra	2	200	400	Pozisyon düzeltme ve yönlendirme
T ₄ – Veri İşleme	1	60	60	Anomali tespiti ve kayıt/log

Her modun enerji tüketimi ayrı ayrı hesaplanarak aşağıda verilmiştir:

$$E_{T_1} = 2.5 \cdot 170 = 425 \text{ Wh}$$

$$E_{T_2} = 2.5 \cdot 110 = 275 \text{ Wh}$$

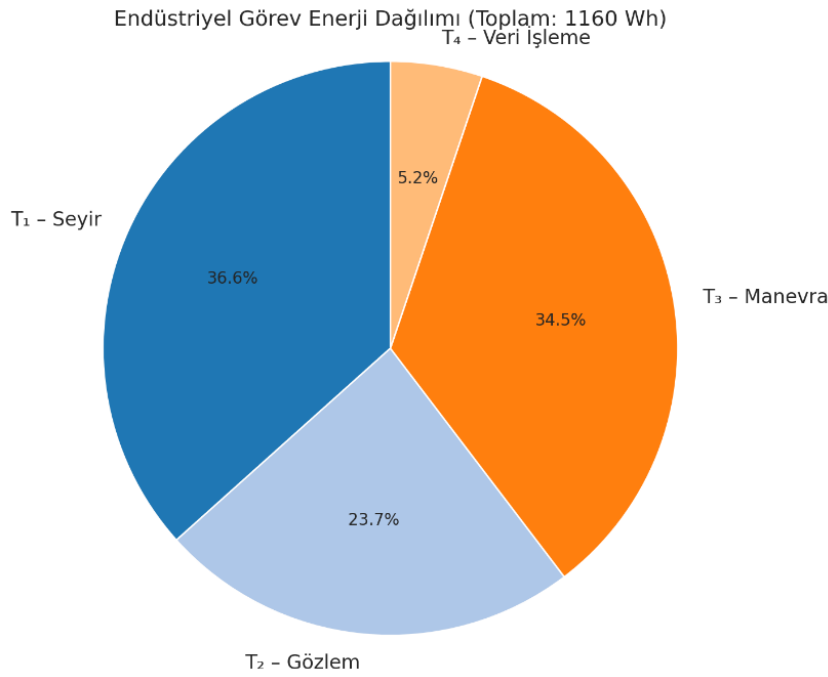
$$E_{T_3} = 2 \cdot 200 = 400 \text{ Wh}$$

$$E_{T_4} = 1 \cdot 60 = 60 \text{ Wh}$$

Toplam görev enerji ihtiyacı:

$$E_{\text{endüstriyel}} = 425 + 275 + 400 + 60 = \boxed{1160 \text{ Wh}}$$

Endüstriyel görevlerde enerji dağılımının görece dengeli olduğu, ancak **seyir ve manevra modlarının toplam tüketimin yaklaşık %71'ini oluşturduğu** görülmektedir. Bu da, boru hattı izleme görevlerinde AUV'nin konum stabilitesi ve rota optimizasyonunun enerji verimliliği açısından ne kadar kritik olduğunu ortaya koyar. Özellikle uzun doğrultuda seyir eden AUV'ler için batarya kapasitesi kadar enerji yoğunluğu (Wh/kg) da belirleyici olur.



Şekil 2.12 Endüstriyel görev enerji dağılımı

2.3.3.6.3 Çevresel Görev İçin Alt Mod Bazlı Enerji Tüketim Analizi

Çevresel görevler, özellikle deniz suyu kalitesinin izlenmesi, biyolojik örnekleme veya kirlilik tespiti gibi uygulamalarda AUV'nin daha çok durağan gözlem yapmasına ve düşük güçlü seyirle belirli noktalara ulaşmasına dayanır. Bu nedenle, enerji tüketimi daha düşük ortalama güçlerde fakat daha uzun süreli gözlem fazlarında yoğunlaşır.

Alt Görev Modlarının Tanımı ve Enerji Denklemi

Alt modlar yine sabittir ve seyir, gözlem, manevra ve veri işleme aşamalarını içerir.

Enerji tüketimi şu denklemle tanımlanır:

$$E_{\text{total}} = \sum_{i=1}^4 P_i \cdot T_i$$

Bu senaryoda AUV'nin alt modlara göre çalışma süresi ve ortalama güç değerleri aşağıdaki tablodaki gibidir:

Tablo 2.11 Çevresel göreve dayalı alt modlar

Alt Mod (T _i)	Süre (saat)	Ortalama Güç (W)	Enerji (Wh)	Açıklama
T ₁ – Seyir	1.5	130	195	Profil seyri, veri noktaları arası geçiş
T ₂ – Gözlem	3.5	80	280	CTD sensör ile su sıcaklığı, tuzluluk ve derinlik ölçümü
T ₃ – Manevra	1	160	160	Numune alma sırasında hassas pozisyonlama
T ₄ – Veri İşleme	2	50	100	Çevresel veri işleme ve paketleme

$$E_{T_1} = 1.5 \cdot 130 = 195 \text{ Wh}$$

$$E_{T_2} = 3.5 \cdot 80 = 280 \text{ Wh}$$

$$E_{T_3} = 1 \cdot 160 = 160 \text{ Wh}$$

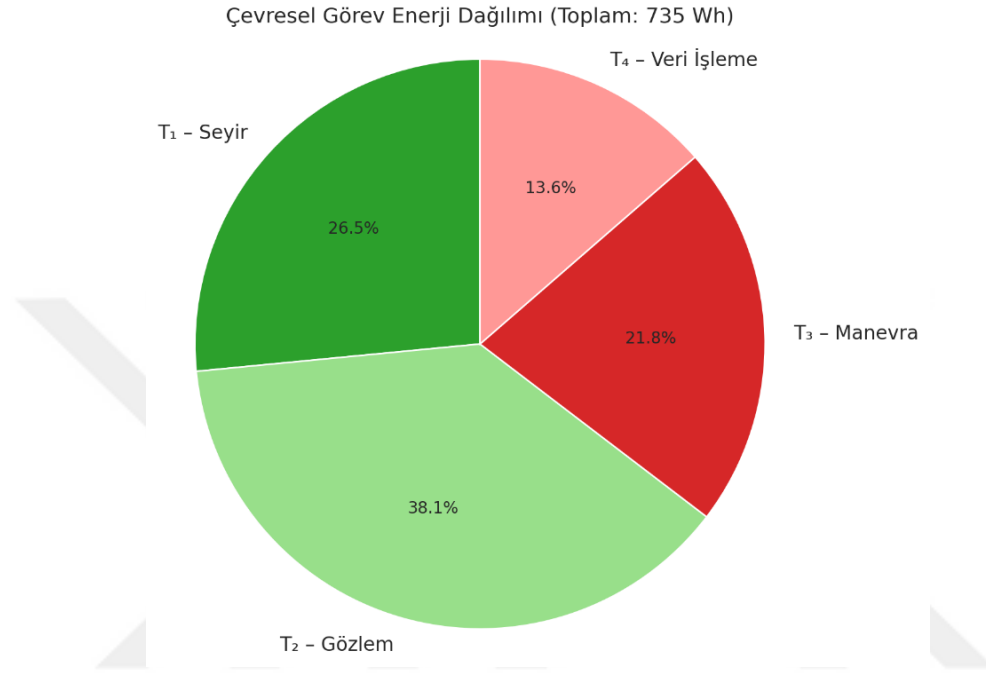
$$E_{T_4} = 2 \cdot 50 = 100 \text{ Wh}$$

Toplam görev enerji ihtiyacı:

$$E_{\text{çevresel}} = 195 + 280 + 160 + 100 = \boxed{735 \text{ Wh}}$$

Bu görev tipinde enerji tüketimi büyük oranda gözlem (T₂) ve seyir (T₁) fazlarında yoğunlaşmakta, yani toplam enerjinin yaklaşık %65'ten fazlası düşük güçlü, uzun süreli işlemlere harcanmaktadır. Bu, çevresel görevlerde batarya seçiminde yüksek

kapasiteden çok düşük deşarj oranı (C-rate) ve enerji yoğunluğu (Wh/kg) faktörlerinin daha belirleyici olduğunu göstermektedir. Ayrıca, veri işleme süresinin de bu görevlerde uzaması (2 saat) sistem belleği ve işlemci tasarımında enerji optimizasyonunun önemini artırır.



Şekil 2.13 Çevresel görev enerji dağılımı

2.4 Tahrik Sistemi ve Pervane Tasarımı

Otonom Su Altı Araçları (AUV'ler), sualtı ortamında itme kuvveti üretmek için yüksek verimli, güvenilir ve kompakt bir tahrik sistemi mimarisine ihtiyaç duyar. Bu sistem, görev süresince aracın hız, yön ve manevra kontrolünü sağlayan temel yapıyı oluşturur. Tahrik sistemi tasarımı, yalnızca hareket kabiliyetine değil; aynı zamanda güç yönetimi, termal denge, hidrodinamik sürtünme ve sessiz çalışma gibi kritik mühendislik parametrelerine de doğrudan etki eder.

2.4.1 Tahrik Sisteminin Bileşenleri

AUV'lerin su altındaki hareketliliğini sağlayan tahrik sistemleri, bir bütün olarak hem itme kuvveti üretmek hem de aracın yönlendirilmesini sağlamak üzere yapılandırılmış çok katmanlı bir mühendislik yapısıdır. Bu sistemler, elektriksel enerji ile çalışan motorlardan başlayarak, mekanik güç iletimi, pervane yapısı, hız kontrol ünitesi ve yönlendirme elemanlarına kadar uzanan entegre bir bileşenler

zincirini içerir. Tahrik sistemi yalnızca bir hareket sağlayıcı değil; aynı zamanda aracın görev menziline, manevra kabiliyetini, enerji verimliliğini ve hatta akustik görünürlüğüne doğrudan etkileyen kritik bir fonksiyonel modüldür.

Tasarım sürecinde, deniz ortamının yüksek basınç ve korozyon koşulları, düşük hızda yüksek verimli itki ihtiyacı ve batarya kısıtlılığı gibi etmenler göz önünde bulundurulmaktadır. Bu nedenle her bir bileşen, hem yapısal hem de fonksiyonel açıdan özenle seçilmeli ve tüm sistem, görev profiline uygun şekilde entegre edilmelidir. Bu bölümde, AUV tahrik sistemini oluşturan temel bileşenler elektrik motoru, elektronik hız kontrol birimi (ESC), güç iletim hattı ve pervane mühendislik prensipleri çerçevesinde detaylı biçimde ele alınacaktır.

2.4.1.1 Elektriksel İtki Üretimi

Elektriksel itki sistemleri, modern AUV'lerin en yaygın tahrik çözümünü oluşturmakta olup, batarya kaynaklı doğru akımın kontrollü biçimde mekanik dönme hareketine çevrilmesi prensibine dayanır. Bu bağlamda, fırçasız doğru akım motorları (BLDC – *Brushless DC Motors*) tahrik sistemlerinin temel bileşeni olarak öne çıkar. BLDC motorlar, su altı uygulamalarında tercih edilme nedenlerini; yüksek enerji verimliliği, düşük akustik imza, kompakt yapı, uzun çalışma ömrü ve bakım gerektirmeyen tasarım özellikleri ile açıklar.

Elektriksel itki üretim süreci aşağıdaki fiziksel dönüşüm zinciri ile karakterize edilir:

- **Elektrik Enerjisi → Elektromanyetik Moment:** Bataryadan çekilen doğru akım, motorun stator sargıları boyunca dağıtılır. Bu sargılarda oluşan döner manyetik alan, rotor üzerindeki sabit mıknatıslar ile etkileşerek elektromanyetik moment üretir.
- **Elektromanyetik Moment → Mil Dönüşü:** Motor miline aktarılan bu moment, pervane sistemine mekanik tork olarak iletilir. Bu noktada motor performansı aşağıdaki bağıntıyla tanımlanabilir:

$$P_{\text{mech}} = T \cdot \omega \quad (2.36)$$

- **Hız ve Yön Kontrolü:** Motor devri ve yönü, mikrodenetleyici veya gömülü kontrol sisteminden gelen PWM (Pulse Width Modulation) sinyalleri ile çalışan bir Elektronik Hız Kontrol Cihazı (ESC) aracılığıyla sağlanır. ESC,

sürücü sinyallerini motor sargılarına aktarıırken gerilim ve akım dengesini gerçek zamanlı olarak düzenler.

Motor Seçim Kriterleri

Bir AUV'ye entegre edilecek elektrik motorunun seçimi, görev profiline ve itki gereksinimine uygun olacak şekilde aşağıdaki mühendislik kriterlerine göre yapılmalıdır:

- **Nominal gerilim ve akım değerleri:** Batarya sistemi ile uyumlu olmalıdır (örneğin 24–48 V aralığı).
- **Tork-İvme karakteristiği:** Düşük hızda yüksek tork üretebilmelidir.
- **Devir aralığı (RPM):** İstenen seyir hızını sağlayacak doğrultuda optimize edilmelidir (örneğin 1000–3000 RPM).
- **Yalıtım ve koruma sınıfı:** Su altı ortamına dayanıklı olacak şekilde genellikle IP68 koruma sınıfı tercih edilmelidir.
- **Maksimum verim (η_{motor}):** %85'in üzerinde sistem verimliliği hedeflenmelidir.

Bu kriterler doğrultusunda yapılan doğru motor seçimi, AUV'nin enerji bütçesi, görev süresi ve güvenilirliği üzerinde doğrudan etkili olmaktadır.

BLDC motorlar su altında çalıştıkları için doğrudan konvektif soğutma avantajına sahiptir. Ancak, yüksek yük altındaki uzun süreli operasyonlarda motor sıcaklığı kritik seviyelere ulaşabilir. Bu nedenle motor bloğu, genellikle su geçirmez ancak ısı iletkenliği yüksek bir muhafaza içine yerleştirilir ve dış yüzeyinden su ile doğal soğutma sağlanır. Alternatif olarak, bazı sistemlerde dış gövdeden soğutma kanalları geçirilerek aktif ısıl yönetim uygulanmaktadır.

Örneğin REMUS 100 tipi bir AUV'de kullanılan 150W'lık BLDC motor, 1200–1500 RPM aralığında çalışmakta olup, sabit hatveli pervane ile kombine şekilde 3–5 knot seyir hızları elde edebilmektedir. Bu tip sistemlerde motorun çektiği ortalama akım 4–6 A aralığında olup, batarya üzerindeki yük dengelemesi görev süresi boyunca kontrol algoritmaları ile düzenlenmektedir.

2.4.1.2 Pervane Tasarım İlkeleri

Pervane, AUV'nin itki üretiminde görev yapan ve motor milinden aktarılan dönme enerjisini doğrusal harekete çevirerek aracın ileri ya da geri yönlü hareketini sağlayan temel bir hidrodinamik elemandır. Doğru bir pervane tasarımı, sistemin genel enerji verimliliğini, hareket doğruluğunu, akustik iz seviyesini ve görev süresini doğrudan etkiler. Bu nedenle, pervane tasarımı yalnızca mekanik bir parça seçimi olarak değil; araç genelinde hidrodinamik, mekanik ve elektriksel tasarımla birlikte ele alınması gereken entegre bir mühendislik problemidir.

Geometrik ve İşlevsel Parametreler

Pervane performansı, çeşitli boyutsal ve açısal parametrelerin bir kombinasyonuna dayanır. Bu parametrelerin görev tipi, aracın hız gereksinimi, motor torqu ve çevresel koşullarla uyumlu biçimde belirlenmesi gerekir:

- **Çap (D):** Genellikle AUV gövdesinin çapı ile orantılı olarak seçilir. Büyük çaplar yüksek itki üretimini kolaylaştırırken, artan direnç nedeniyle enerji verimliliğini düşürebilir.
- **Hatve (Pitch, P):** Pervanenin bir tam dönüşte teorik olarak kat ettiği mesafedir. Yüksek hatve değerleri, daha yüksek hız sağlar; ancak daha fazla tork gerektirir.
- **Kanat Sayısı:** Düşük kanat sayısı daha düşük sürtünme direnci sağlar; ancak yüksek itki gerektiğinde kanat sayısının artırılması gerekebilir.
- **Blade Area Ratio:** Kanat yüzey alanının pervane diski alanına oranıdır. Bu oran, pervanenin düşük devirde ne kadar verimli çalışacağını belirler.
- **Kanat Profili ve Eğimi:** Kanatların şekli ve akışa göre eğim açısı, kavitasyon riskini ve türbülans oluşumunu doğrudan etkiler.

Bu parametrelerin her biri, pervanenin hidrodinamik karakterini belirler ve görev profiline göre optimize edilmelidir.

AUV uygulamalarında kullanılan pervaneler, yapısal karmaşıklık ve kontrol edilebilirlik açısından aşağıdaki gruplara ayrılabilir:

- **Sabit Hatveli Pervane (Fixed Pitch Propeller):** Yapısal olarak sade ve maliyet açısından avantajlıdır. Hatvesi sabit olduğundan, her hız rejimi için

optimum çalışma sağlayamaz. Genellikle sabit seyir hızına sahip görevlerde kullanılır.

- **Değişken Hatveli Pervane (Variable Pitch Propeller):** Görev sırasında hatvesi değiştirilerek farklı hız-yük koşullarına adapte olabilir. Daha karmaşık bir mekanizma gerektirir, fakat görev çeşitliliği yüksek sistemlerde tercih edilir.
- **Ducted (Kanallı) Pervane:** Pervane çevresine yerleştirilen sabit bir kanal ile çalışır. Bu yapı, düşük hızlarda daha fazla itki üretir ve yönlendirme kabiliyeti sağlar. Özellikle sabit konumlandırma, sürüklenme karşıtı görevlerde kullanılır.

Kavitasyon, pervane kanatları üzerinde düşük basınçlı bölgelerde oluşan buhar kabarcıklarının patlaması sonucu ortaya çıkan bir olgudur. Bu durum yalnızca verim kaybı yaratmakla kalmaz, aynı zamanda titreşim ve gürültüye neden olarak akustik tespit riskini artırır. Askerî ve bilimsel gözlem görevlerinde sessiz çalışma esastır. Bu nedenle:

- Pervane devir sayısı düşürülmeli, tork artırılmalıdır.
- Daha kalın ve eğimli kanatlar yerine, kavitasyonu minimize eden profiller tercih edilmelidir.
- CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analizleri ile tasarım öncesi düşük basınç bölgeleri öngörülmeli ve optimize edilmelidir.

2.4.2 Görev Tabanlı Elektriksel İtki ve Pervane Seçimi

Çok maksatlı bir AUV, askeri keşiflerden boru hattı izleme ve çevresel gözlem görevlerine kadar farklı operasyonel senaryoları yerine getirebilecek esneklikte yapılandırılmalıdır. Bu tür görev çeşitliliği, sadece sensör ve yazılım katmanlarında değil; aynı zamanda mekanik itki sistemlerinde de görev odaklı konfigürasyonların varlığını zorunlu kılar. Bu bağlamda, elektriksel itki sistemi ile pervane tasarımı, hem görevlerin gerektirdiği hız, tork, manevra ve sessizlik gibi parametreleri karşılamalı, hem de enerji tüketimi açısından optimum performansı sağlamalıdır.

Bu bölümde, çok maksatlı bir AUV için elektrik motoru ve pervane sistemlerinin, farklı görev tiplerine göre nasıl yapılandırılması gerektiği detaylı biçimde incelenecektir.

Çok maksatlı bir AUV'nin üstlenebileceği başlıca operasyonel görevler ve bu görevlerin itki/pervane sistemine etkileri aşağıdaki tabloda özetlenmiştir:

Tablo 2.4.1 Görev türlerine göre gereksinim değerlendirmesi

Görev Türü	Hız (m/s)	Manevra Hassasiyeti	Sessizlik	Süreklilik	Tork Gereksinimi
Askerî Keşif	1.2–1.8	Yüksek	Çok yüksek	Orta	Orta–Yüksek
Boru Hattı İzleme	0.8–1.2	Orta	Orta	Yüksek	Düşük–Orta
Çevresel Gözlem	0.5–1.0	Orta	Orta	Çok yüksek	Düşük
Hedef Tanıma & Yaklaşma	0.3–0.7	Çok yüksek	Çok yüksek	Kısa	Yüksek
Haritalama (MBES)	1.0–1.5	Orta	Orta	Yüksek	Orta

Bu görev profilleri, itki sisteminin yalnızca bir değer etrafında değil; geniş bir hız-tork bandında çalışabilmesini zorunlu kılar. Dolayısıyla, tek bir motor-pervane kombinasyonunun görevler arası verimliliği yüksek tutulmalıdır.

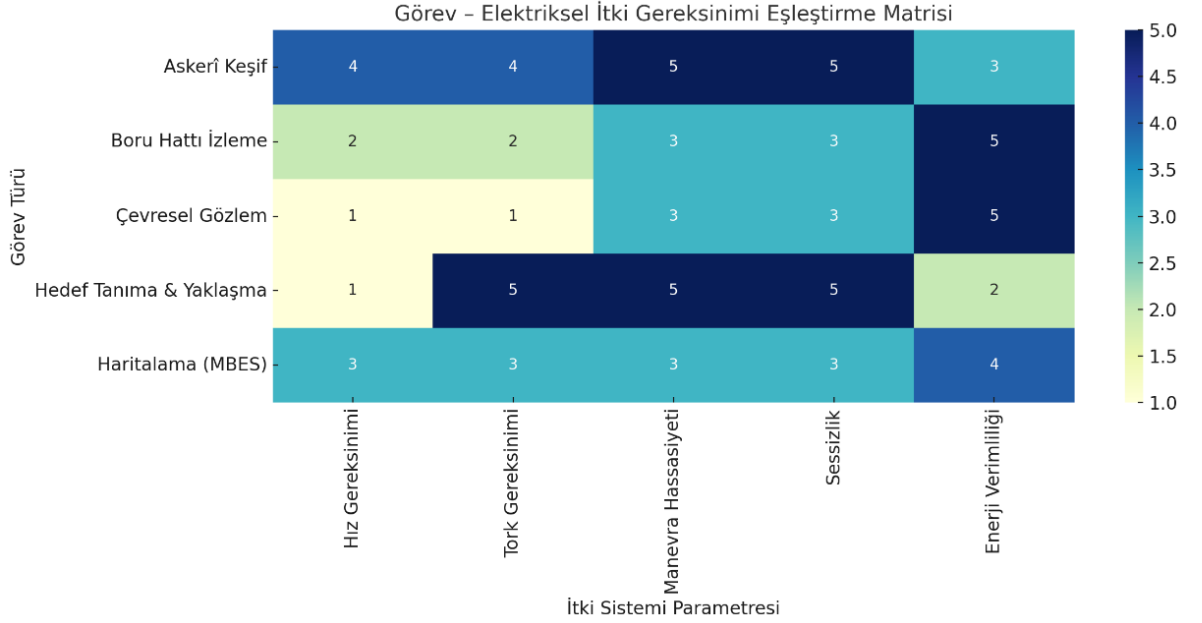
2.4.2.1 Elektrik Motoru Seçimi

Elektrik motoru seçiminde, görev çeşitliliği nedeniyle aşağıdaki teknik kriterler ön plana çıkar:

- **Değişken Hız Aralığı:** 0.3–2.0 m/s arasında geniş hız geçişlerine izin verebilecek, yüksek devir–düşük devir dengesini sağlayabilecek bir BLDC motor tercih edilmelidir.
- **Yüksek Torkta Düşük Gürültü:** Düşük devirde yüksek tork üretebilen, aynı zamanda manyetik balansı iyi tasarlanmış motorlar sessizlik açısından avantaj sağlar.
- **Verimli ESC Entegrasyonu:** Görev geçişlerinde hız rampalarının yumuşak yapılabilmesi için motor kontrol birimi (ESC) yüksek çözünürlüklü PWM

sürücüsüne sahip olmalı, gömülü sistemle haberleşmesi hızlı ve güvenilir olmalıdır.

- **Soğutma Stratejisi:** Uzun süreli sabit hızla çalışan görevlerde (örneğin çevresel gözlem) pasif soğutma yeterli olabilirken; yüksek tork isteyen manevralar için motor gövdesi üzerinden doğal konvektif soğutma optimize edilmelidir.



Şekil 2.14 Görev-elektiriksel itki gereksinim eşleştirme matrisi

Yukarıdaki görsel, çok maksatlı bir AUV için farklı görev türlerinin elektriksel itki sistemi üzerindeki gereksinimlerini kıyaslamalı olarak sunmaktadır. Her görev için hız, tork, manevra hassasiyeti, sessizlik ve enerji verimliliği kriterleri 1'den 5'e kadar puanlanmış; böylece tasarım sırasında hangi görev tipinin hangi parametreyi daha fazla zorladığı açıkça görselleştirilmiştir.

2.4.2.2 Pervane Seçimi ve Konfigürasyonu

Çok maksatlı bir AUV'nin görev başarımı; pervane sisteminin, değişen operasyonel gereksinimlere uygun şekilde yapılandırılabilir olmasına doğrudan bağlıdır. Farklı görev senaryoları, AUV'nin hız gereksinimi, yön kontrolü, sessiz çalışma zorunluluğu ve enerji verimliliği gibi parametrelerde farklılık gösterdiğinden, pervane tasarımı sabit bir çözüme indirgenemez. Bu nedenle, pervane seçimi yalnızca geometrik ölçülere dayalı bir karar değil; görev profiline, motor

karakteristiğine ve akış rejimine bağlı olarak esnek yapılandırılabilen çoklu konfigürasyonların bir tasarımı olarak ele alınmalıdır.

Çok maksatlı AUV'ler; askeri keşif, hedef tanıma, boru hattı takibi, çevresel veri toplama ve haritalama gibi farklı görevleri üstlenebilir. Her bir görev türü, AUV'nin pervane sisteminden beklentilerini farklılaştırır. Bu nedenle, görev tipinin doğru şekilde tanımlanması, tahrik sistemi tasarımının ilk belirleyici girdisidir. Görev türleri, doğrudan teknik gereksinimlere dönüşür. Örneğin; askeri görevlerde düşük akustik iz (sessizlik) ve hassas yön kontrolü ön plandayken, çevresel gözlem görevlerinde uzun süreli düşük hızda stabil hareket gereklidir. Bu gereksinimler pervane geometrisinin, dönüş profilinin ve tahrik gücünün belirlenmesinde yönlendirici olur.

Pervane seçimi, klasik geometrik boyutlandırmanın ötesinde; görev uyumluluğu, enerji verimliliği ve akış karakteri göz önüne alınarak yapılmalıdır. Çap, hatve oranı, kanat profili, kanat sayısı ve kanal/nozul entegrasyonu gibi parametreler optimize edilerek, görevler arası verimli geçiş sağlanabilir. Motorun tork üretim eğrisi, çalışma devir aralığı ve ESC (elektronik hız kontrol) modülüne entegrasyonu, pervane performansını doğrudan etkiler. Yüksek torklu ama düşük devirli motorlar, sessiz görevlerde avantaj sağlar; geniş devir bandı olan motorlar ise çoklu görev geçişlerinde performans esnekliği sunar.

Pervane performansı yalnızca iç parametrelere değil; AUV'nin etrafındaki su akış koşullarına da bağlıdır. Bu nedenle, Reynolds sayısı, türbülans modeli, sınır tabaka kalınlığı gibi hidrodinamik faktörler CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analizleriyle değerlendirilmelidir. Bu analizler, pervane üzerindeki kavitasyon, sürüklenme ve basınç farklarının öngörülmesini sağlar.

Tüm girdilerin birleşimiyle, AUV için görev bazlı optimize edilmiş bir pervane konfigürasyonu oluşturulur. Bu sistem fiziksel olarak değiştirilebilir modüler yapılardan veya tek bir pervanenin yazılım-temelli kontrolle farklı görevlerde farklı şekilde davranmasını sağlayan hibrit yapılardan oluşabilir. Böylece, aynı platform birden fazla görevi yüksek verimlilikle yerine getirebilir.

Bu kapsamda, **Hydrocean TA19S** modeli, yüksek itki üretim kapasitesi ve modüler entegrasyon kabiliyetiyle, çok çeşitli operasyonel senaryolara uyum sağlayabilecek nitelikte bir çözüm sunmaktadır.

TA19S



Şekil 2.15 Hydrocean TA19S pervane modülü

Teknik Özellikler ve Yapısal Uyum

Hydrocean TA19S, ileri yönlü maksimum 19 kgf ve geri yönlü 10 kgf itki üretme kapasitesine sahip, elektrik tahrikli bir sualtı pervane sistemidir. Sistem, 1000 W güç tüketimiyle çalışmakta olup, 48–300 V DC arasında geniş bir besleme gerilimi aralığına destek sunar. Bu durum, farklı batarya sistemleriyle uyum içinde çalışmasını mümkün kılar ve enerji mimarisi açısından tasarım esnekliği sağlar.

Cihazın çapı 177 mm, uzunluğu ise 242–281 mm arasında değişmekte olup, havada 2.0–3.0 kg, suda ise 1.4–2.2 kg ağırlığa sahiptir. Bu kompakt yapı, özellikle küçük ve orta ölçekli AUV gövdelerine entegre edilmesinde avantaj sağlamaktadır.

Görev Senaryoları ile Uyumluluk

TA19S, aşağıda belirtilen operasyonel görev tipleri ile yüksek uyumluluk göstermektedir:

- **Askerî Keşif ve Hedef Tanıma Görevleri:** Düşük devirde yüksek tork üretme yeteneği, sessiz çalışma koşulları gerektiren görevlerde avantaj sağlar. Bu özellik, akustik iz bırakmadan hareket etmeyi gerektiren stratejik görevler açısından kritiktir.
- **Boru Hattı İzleme ve Endüstriyel Gözlem Uygulamaları:** Sabit ve düşük hızlarda uzun süreli çalışmaya olanak tanıyan güç dağılımı, bu tür görevlerde enerji yönetimi açısından yüksek verimlilik sunar.

- **Okyanografik Gözlem ve Haritalama:** Hassas yönlendirme ve konumlandırma gerektiren bu görevlerde, TA19S'nin itki doğruluğu ve düşük titreşimli yapısı ön plana çıkmaktadır.

Entegrasyon Kabiliyeti ve Sistemsel Esneklik

Pervane sistemi, farklı motor kontrol birimleri ve ESC mimarileriyle uyumlu çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Bu yapı sayesinde, yazılım tabanlı görev geçişlerinde tork–devir karakteristiği kontrol algoritmaları ile yeniden yapılandırılabilir. Bu da, pervanenin sabit geometrik yapısına rağmen farklı görevlerde farklı performans karakteristikleri göstermesini mümkün kılar.

Ayrıca, TA19S'nin fiziksel olarak başka pervane modülleri ile değiştirilmesini kolaylaştıran montaj geometrisi, modüler AUV konseptine uygun tasarımlarda görev bazlı yapılandırma avantajı sunar.

3

ÖLÇEKLENEBİLİR AUV TASARIM GEREKSİNİMLERİ

Günümüz denizaltı keşif ve görev platformları, görev profillerinin çeşitliliği ve operasyonel şartların dinamik yapısı nedeniyle yalnızca tek boyutlu sabit tasarımlarla karşılanamaz hâle gelmiştir. Bu bağlamda ölçeklenebilirlik (scalability) kavramı, AUV gövdesinin hem boyuna hem de çapına dair temel geometrik parametrelerin sistematik ve parametrik bir yaklaşımla ayarlanabilmesini ifade eder. Ölçeklenebilir bir tasarım, keşif, haritalama, yük taşıma ya da askeri denetim gibi farklı uygulama gereksinimlerine göre gövde modüllerinin (burun, orta gövde, kuyruk) kolayca eklenip çıkarılmasına, ilgili hidrodinamik ve yapısal performans kriterlerinin korunmasına olanak tanır. Böylece tasarım süreci, CAD ortamında gerçekleştirilen parametrik modelleme sayesinde minimum mühendislik müdahalesiyle görev bazlı optimizasyon döngülerine doğrudan entegre edilebilir.

Bu bölümde, ölçeklenebilirlik gereksinimlerinin karşılanması amacıyla kullanılan parametrik yöntemler ayrıntılı olarak sunulacaktır. İlk olarak, burun (L_n), orta gövde (L_m) ve kuyruk (L_t) uzunlukları, belirlenen oran ve sabit aralıklar temel alınarak adım adım hesaplanacak; ardından bu temel segmentler birleştirilerek üç farklı toplam gövde uzunluğu (L_1 , L_2 , L_3) elde edilecektir. Her bir konfigürasyon için; profil eğrilerinin matematiksel ifadeleri literatürden alınan formüllerle tanımlanacak ve Python tabanlı optimizasyon kodları aracılığıyla en verimli parametre kombinasyonları belirlenecektir. Elde edilen AUV formları, CFD simülasyonlarıyla doğrulanarak ölçeklenebilirliğin çok maksatlı görevler için sağladığı avantajlar gösterilecektir.

3.1. Parametrik Tasarımın Önemi ve Temelleri

Parametrik modelleme, tasarım geometrilerinin boyut, oran ve eğrilik gibi temel özelliklerinin sayısal parametreler aracılığıyla tanımlandığı ve bu parametrelerin değiştirilmesiyle modelin tüm bileşenlerinin otomatik olarak güncellenebildiği bir yaklaşımdır. Geleneksel CAD uygulamalarında her geometri değişikliği, elle müdahale ve yeniden çizim gerektirirken; parametrik modellemede yalnızca ilgili parametrenin değeri revize edilerek tüm tasarım tutarlılığı korunur. Bu sayede, karmaşık bağlantı kısıtları veya formülasyonlar tek bir merkezden yönetilir, tekrar kullanılabilirlik ve sürüm kontrolü büyük ölçüde iyileşir.

AUV tasarımında parametrik yaklaşım, farklı görev profillerine yönelik gövde modifikasyonlarının tek bir temel model üzerinde hızla uygulanabilmesini sağlar. Burun uzunluğu, orta gövde çapı, kuyruk eğrisi katsayısı gibi kritik değişkenler, görev gereksinimlerine göre optimize edilebilecek biçimde tanımlandığında; keşif, haritalama, batarya taşıma veya askeri denetim amaçlı varyantlar arasında geçiş yapmak mühendislik açısından büyük kolaylık kazanır. Böylece her yeni görev için sıfırdan model oluşturmak yerine, mevcut parametrik model üzerinde az sayıda girdi ile hızlı konfigürasyon güncellemeleri gerçekleştirilebilir.

Ölçeklenebilirlik ve yeniden yapılandırılabilirlik, parametrik bir yapının AUV mühendisliğine sunduğu en önemli avantajlardandır. Ölçeklenebilirlik, parametrik değişkenler (L_n , L_m , L_t vb.) aracılığıyla gövde boyutlarının artırımına veya azaltımına imkân tanırken; yeniden yapılandırılabilirlik, göreve özgü sensör blokları, batarya modülleri veya itiş sistemlerinin geometride bozulma yaratmadan eklenip çıkarılabilmesini mümkün kılar. Bu modüler yaklaşım, hem tasarım sürecindeki esnekliği artırır hem de sahada veya üretimde hızlı prototipleme ve bakım kolaylığı sağlar.

Parametrik tasarımın optimizasyon döngüleriyle etkileşimi, modern AUV geliştirme süreçlerinin merkezinde yer alır. Python veya MATLAB tabanlı betikler aracılığıyla parametrik modeller, CFD simülasyonlarına otomatik olarak beslenebilir ve Response Surface Methodology (RSM) benzeri yöntemlerle hidrodinamik performans kriterleri, direnç, basınç dağılımı, vorticity üzerinden en uygun parametre kombinasyonları belirlenebilir. Bu döngü, model simülasyon

değerlendirme adımlarını hızlıca tekrarlayarak hem tasarım verimliliğini artırır hem de gerçekçi performans tahminlerinin elde edilmesini sağlar.

3.2. Gövde Segmentasyonu: Bölümler Arası Fonksiyonel Ayrım

Gövde segmentasyonu, AUV tasarımında her bölümün özgün hidrodinamik ve yapısal görevlerini netleştirerek toplam performansı artırmayı amaçlar. Bu bağlamda üç temel bölüm tanımlanır: burun (nose), orta gövde (middle section) ve kuyruk (tail section). Her bölüm, aracın su içerisindeki hareketini doğrudan etkileyen farklı fonksiyonel roller üstlenir ve parametrik modelleme sayesinde bu roller, göreceli uzunluk, eğrilik ve çap parametreleriyle hassas bir şekilde optimize edilebilir.

Burun (Nose):

Akışa giriş bölgesi olarak tanımlanan burun, su ile ilk temas noktasını oluşturur ve düzgün bir basınç dağılımı sağlamak için akış çizgilerini yumuşatarak ayrılma (flow separation) riskini en aza indirir. Parametrik profilde kullanılan n_n katsayısı ile kontrol edilen bu eğri, Reynolds sayısı ve Euler sayısına bağlı hidrodinamik formülasyonlarla tanımlanır; böylece farklı hız ve derinlik koşullarında optimum giriş performansı elde edilir.

Orta Gövde (Middle Section):

Silindirik ana taşıyıcı kısmı olan orta gövde, enerji depolama sistemleri (batarya modülleri), elektronik donanım ve yük konaklamasına ayrılmıştır. Bu bölümde sabit çap (d) kullanılarak akış direncinin minimize edilmesi hedeflenir; aynı zamanda iç hacmin maksimize edilmesi için uzunluk (l_m) parametresi optimize edilir. Orta gövde, toplam direnç ve stabilite arasında bir denge kuracak şekilde parametrik olarak ayarlanırken, yapısal mukavemet gereksinimleri de karşılanır.

Kuyruk (Tail Section):

Akışın orta gövdeden ayrıldıktan sonra pervane bölgesine düzgün aktarılmasını sağlayan kuyruk, ayrılma derecesini düşürerek geri basıncı (back pressure) ve vorteks oluşumunu minimize eder. Parametrik n_t katsayısı ile kontrol edilen bu bölüm, arka basınç dağılımını iyileştirerek pervane verimliliğini artırır ve gürültü seviyesini düşürür. Böylelikle AUV'nin ileri itişinde maksimum enerji verimliliği ve hidrodinamik kararlılık sağlanır.

3.3. Matematiksel Eğri Tanımlamaları ve Denklemler

Parametrik gövde modelimiz, AUV'nin hidrodinamik verimini ve çok maksatlı görev adaptasyonunu destekleyecek biçimde, üç ayrı geometrik eğri (burun, orta gövde, kuyruk) ile tanımlanır. Her bir eğri, Kartezyen koordinat sisteminde x-ekseni boyunca uzanan tekil bir fonksiyon $y=f(x)$ şeklinde ifade edilir. Aşağıda, her bölümün analitik formu ile seçilme gerekçeleri detaylandırılmıştır:

Burun Eğrisi: Burun bölgesi, suya ilk giriş noktasında akış çizgilerini yumuşatarak ayrılma riskini en aza indirmeyi amaçlar. Kartesyen koordinatta, $0 \leq x \leq L_n$ aralığında tanımlı burun profili fonksiyonu şu şekilde yazılır:

$$y_{\text{nose}}(x) = \frac{d}{2} \left[1 - \left(1 - \frac{x}{L_n} \right)^{n_n} \right]^{1/n_n} \quad (3.1)$$

Buradaki parametreler;

- d: Gövde çapı (orta bölüm çapıyla eşit alınır),
- L_n : Burun uzunluğu,
- n_n : Eğrilik kontrol katsayısı

Bu form, literatürde “power-law” tabanlı tasarımlar arasında yaygındır; n_n büyüdükçe burun daha yuvarlak, küçüldükçe daha keskin bir profile sahip olur. Böylelikle farklı hız ve derinlik koşullarında akış ayrılması minimize edilir.

Orta Bölüm Denklemi: Orta bölüm, enerji paketleri ve elektronik donanımın yerleştiği silindirik kısımdır. Bu bölgede çap sabit, dolayısıyla profil denklemi de sabit bir değer alır:

$$y_{\text{mid}}(x) = \frac{d}{2}, \quad L_n \leq x \leq L_n + L_m \quad (3.2)$$

Buradaki parametreler;

- L_m : Orta bölüm uzunluğu,
- d: Silindirik gövde çapıdır.

Sabit çaplı yapı, iç hacmi maksimize ederken yüzey akışına pürüzsüz bir geçiş sağlar; hidrodinamik sürtünme bu bölgede baskın olduğundan yüzey kalitesi kritik hale gelir.

Kuyruk Eğrisi: Kuyruk bölgesi, akışın gövdeden ayrılmasından sonraki pervane bölgesine düzgün akış aktarımı için optimize edilir. Kartesyen denklem olarak iki alternatif sunulur; çalışmamızda “cosine taper” yaklaşımını kullanan parametrik form tercih edilmiştir:

$$y_{\text{tail}}(x) = \frac{d}{2} \left[\frac{1}{2} (1 + \cos(\pi (x/L_t)^{n_t})) \right], \quad 0 \leq x \leq L_t \quad (3.3)$$

Buradaki parametreler;

- L_t : Kuyruk uzunluğu,
- n_t : Taper kontrol katsayısı,
- $d/2$: Kuyruk başlangıcındaki yarıçaptır.

Cosine taper, akışın ani daralmalarını yumuşatarak vorteks oluşumunu ve geri basıncı azaltır, n_t ile taper'ın eğrilik dağılımı ayarlanarak farklı görev profillerine uygun form elde edilir.

Bu üç fonksiyon, Kartezyen koordinat sisteminde tanımlandıkları aralıklarda birleştirilerek tam AUV gövde kesiti oluşturulur. Seçilen matematiksel formlar, parametrik optimizasyonda esneklik sağlar; her bir katsayı (örneğin n_t ve n_n) çok maksatlı görev senaryolarına göre sayısal optimizasyon algoritmalarıyla ince ayar yapılabilecek yapıdadır. Böylelikle hem geometrik süreklilik korunur hem de hidrodinamik verimlilik.

3.4. Parametrelerin Tanımlanması ve Sınırlandırılması

Bu bölümde, sayısal analiz ve hesaplamalarda kullanılan temel geometrik ve hidrodinamik parametreler adım adım tanımlanacak, değer aralıkları ve sınırlandırmalar açıklanacaktır. Temel olarak;

- Modüler Gövde Uzunlukları (L_1, L_2, L_3),
- Profil Şekil Katsayıları (n_n, n_t),
- Islak Yüzey Alanı ve Hidrodinamik Sabitler,

- Direnç Hesapları İçin Kullanılan Fiziksel Parametreler

anlatılacaktır.

3.4.1 Modüler Gövde Uzunlukları

Çok maksatlı ve ölçeklenebilir bir AUV mimarisinin en temel yapıtaşlarından biri, gövdenin “modüler” olarak üç ana bölüme (burun, orta ve kuyruk) ayrılmasıdır. Bu yaklaşım, hem farklı görev profillerine uygun yeniden konfigürasyon imkânı sağlar hem de üretim, bakım ve lojistik süreçlerinde standartlaştırmayı mümkün kılar. Burun, orta ve kuyruk modüllerinin her biri, kendi içlerinde hidrodinamik ve yapısal fonksiyonlarına göre belirli oranlarda uzunluk değerlerine sahiptir. Bu alt bölümde, üç farklı birleşimden oluşan toplam gövde uzunlukları (L_1 , L_2 , L_3) nasıl elde edildi, modüllerin uzunlukları hangi kriterlere göre belirlendi ve bu değerlerin hesaplama adımları hangi mühendislik gerekçelere dayanarak atandı sorularına en ince ayrıntısına kadar yanıt verilecektir.

3.4.1.1 L_3 Aralığının Seçimi ve Tasarım Gereçesi

Öncelikle, AUV'nin nihai operasyon sahasındaki görev çeşitliliği göz önünde bulundurularak, en uzun gövde konfigürasyonu olarak tanımlanan L_3 parametresi, 4,5 m ile 6,0 m aralığında bir aralık (interval) olarak belirlenmiştir. Bu seçim, literatürde orta-büyük ölçekli araştırma ve keşif amaçlı AUV'lerin tipik uzunluk değerlerine uygunluk göstermesi ve hem düşük hem de orta hızlardaki hidrodinamik performans kriterlerini karşılayabilmek amacıyla yapılmıştır. 4,5 m, daha küçük boyutlu görevlerde manevra kabiliyetini korurken, 6,0 m ise uzun menzilli görevlerde enerji verimliliğini artırmak üzere yeterli hacmi sunar. Bu aralık aynı zamanda simülasyon ve prototipleme adımlarında, gövdenin farklı boyutlarda davranışını gözlemlemeye imkân tanıyan bir parametre aralığı oluşturur.

Bu şekilde tanımlanan L_3 aralığının ortalaması (örneğin 5,25 m), daha sonra burun (l_n), orta (l_m) ve kuyruk (l_t) modüllerinin tasarımda kullanılacak “ham” uzunluklarının ($l_{n,raw}$; $l_{m,raw}$; $l_{t,raw}$) başlangıç değerinin hesaplanmasında referans kabul edilir. Fakat her bir L_3 değeri (örneğin 4,5 m, 5,0 m, 5,5 m, 6,0 m gibi örnek noktalar) için bu ham uzunluklar ayrı ayrı yeniden hesaplanır; yani L_3 'ün her örnek değeri için modül uzunlukları tekrarlanır ve yuvarlamadan sonra nihai l_n , l_m , l_t değerleri elde edilir.

3.4.1.2 Ham Modül Uzunluklarının ($l_{n,raw}$, $l_{m,raw}$, $l_{t,raw}$) Belirlenmesi

Mühendislik tasarımı sırasında, burun ve kuyruk gibi uç bölümler, hem yapısal hem de hidrodinamik açıdan belirli oranlarda karar verilecek kritik parçalardır. Bu nedenle, literatürde yaygın olarak kabul gören “uç modüllerin toplam uzunluğa oranı” yaklaşımından yola çıkılarak, burun ve kuyruk modüllerinin her birinin toplam gövde uzunluğuna oranı için $\alpha = 0,15$ sabiti seçilmiştir. Yani burun modülünün uzunluğu ($l_{n,raw}$) ve kuyruk modülünün uzunluğu ($l_{t,raw}$), her ikisi de $\alpha \cdot L_3$ olacak şekilde tanımlanır. Bu oran, uç bölümlerin yeterli hidrodinamik girdap/akış kontrolü sağlamasını, aynı zamanda merkezi modüle (l_m) ayrılacak hacmin de makul bir değere sahip olmasını amaçlar. $\alpha = 0,15$ değeri, literatürde özellikle orta-büyük ölçekli AUV çalışmalarında burun ve kuyruk için önerilen % 10–20 aralığı içerisinde ve bu çalışmada % 15 olarak sabitlenmiştir.

Dolayısıyla, her bir L_3 değeri için:

$$l_{n,raw} = \alpha L_3, \quad l_{t,raw} = \alpha L_3 \quad (3.4)$$

Toplamda burun ve kuyruk modüllerinin her ikisi birlikte % 30 (2α) uzunluk kapladığından, geriye kalan % 70 oran merkezi modül ($l_{m,raw}$) için ayrılır. Ancak, bu % 70’lik kısmı üç eşit parçaya bölmek yerine, “orta modülün üç eşit alt parçaya bölünmesi” yaklaşımı tercih edilmiştir. Bunun sebebi, orta modülün hem yapı hem de sistem entegrasyonu açısından bölgenin hidrodinamik yapısını daha simetrik ve ölçeklendirilebilir kılmasıdır. Böylece, $l_{m,raw}$ değeri şu şekilde hesaplanır:

$$l_{m,raw} = \frac{L_3 - (l_{n,raw} + l_{t,raw})}{3} = \frac{L_3 - 2(\alpha L_3)}{3} = \frac{L_3(1 - 2\alpha)}{3} \quad (3.5)$$

Burada, $1 - 2\alpha = 1 - 0,30 = 0,70$. Dolayısıyla:

$$l_{n,raw} = 0,15 L_3, \quad l_{t,raw} = 0,15 L_3, \quad l_{m,raw} = 0,2333 L_3 \quad (3.6)$$

Örneğin $L_3 = 5,0$ m alındığında, ham modül uzunlukları sırasıyla:

$$\begin{aligned} l_{n,raw} &= 0,15 \times 5,0 = 0,75 \text{ m}, \quad l_{t,raw} = 0,75 \text{ m}, \quad l_{m,raw} \\ &= 0,2333 \times 5,0 \approx 1,1667 \text{ m} \end{aligned} \quad (37)$$

olacaktır. Bu ham değerler, üretilebilirlik veya sayısal model hassasiyeti kısıtlamaları dolayısıyla doğrudan kullanılmayıp, bir sonraki adımda belirli bir adım (step) değerine göre yuvarlanır.

3.4.1.3 Adım (Step) İşlemi ve Yuvarlanma Mantığı

Gerçek bir mühendislik çalışmasında, özellikle gövde modülleri gibi parçalarda boyutlar, makinede veya modellerde belirli bir hassasiyette üretilir. Bu çalışmada, her bir ham modül uzunluğu ($l_{n,raw}$, $l_{m,raw}$, $l_{t,raw}$) 0,05 m yani 5 cm adımlarıyla yuvarlanarak sayısal ve üretim boyutları standardize edilmiştir. Seçilen 0,05 m adımı, literatürdeki benzer AUV tasarımlarında kullanılan minimum imalat toleransları ve modelleme adımlarıyla uyumludur. Daha küçük bir step, parça bazında aşırı hassasiyet gerektirir ve prototip aşamasında işçilik maliyetini artırabilir; daha büyük bir step ise modüler uyumu bozabilir ve hidrodinamik performans sapmalarına yol açabilir. Bu nedenle 0,05 m adımı, hem sayısal modellemeye uygun hem de imalat süreçlerinde yaygın olan toleransları baz alarak seçilmiştir.

Yuvarlama işlemi “en yakın komşu” (nearest neighbor) veya “en yakın adım” mantığıyla yürütülür:

$$\begin{aligned} l_n &= \text{round}(l_{n,raw}/0,05) \times 0,05, \quad l_m = \text{round}(l_{m,raw}/0,05) \times 0,05, \quad l_t \\ &= \text{round}(l_{t,raw}/0,05) \times 0,05 \end{aligned} \quad (3.8)$$

Burada $\text{round}(\cdot)$ ifadesi, en yakın tam sayıya yuvarlama fonksiyonunu temsil eder. Örneğin $L_3 = 5,0$ m için elde ettiğimiz $l_{n,raw} = 0,75$ m zaten 0,05’in katıdır; bu yüzden yuvarlandığında $l_n = 0,75$ m olarak kalır. Fakat $l_{n,raw} \approx 1,1667$ m ifadesi, 0,05’in en yakın katı olan 1,15 m veya 1,20 m seçeneklerinden birine yuvarlanacaktır. “En yakın komşu” mantığına göre:

$$1,1667/0,05 = 23,3333 \quad (3.9)$$

bu da 23 tam adım (1,15 m) veya 24 tam adım (1,20 m) demektir. Aradaki mesafe $23,3333 - 23 = 0,3333$ ve $24 - 23,3333 = 0,6667$ olduğuna göre daha yakın olduğu için 23 adım (1,15 m) tercih edilir. Böylece $l_m = 1,15$ m olarak belirlenir. Bu yuvarlama süreci, giderilmesi gereken iki hususa işaret eder:

- Toplam ($l_n+l_m+l_t$) uzunluğu, artık tam olarak L_3 'e eşit olmayabilir; küçük bir sapma oluşur. Bu sapma, genellikle $\pm 0,025$ m gibi toleranslarda kalır.
- İkinci ve üçüncü modüllerin toplamı baz alındığında, L_2 ve L_1 hesaplamalarındaki sapmalar da benzer tolerans dahilindedir. Bu sapmalar ince sayısal bulaşmaları ifade etmekle beraber, gerçek üretim ve montajda 2,5 cm toleransı aşmayan hatalar mühendislik açısından kabul edilebilir seviyededir.

3.4.1.4 Üç Farklı Toplam Gövde Uzunluğunun Formülasyonu ve Mantığı

Yuvarlama sonrası elde edilen modül uzunlukları (l_n, l_m, l_t) değerlerine dayanarak, üç yapılandırma (konfigürasyon) aşağıdaki denklem setiyle tanımlanır:

$$L_1 = l_n + l_m + l_t \quad (3.10)$$

$$L_2 = l_n + 2 l_m + l_t \quad (3.11)$$

$$L_3 = l_n + 3 l_m + l_t \quad (3.12)$$

Burada her bir formülün ardındaki mühendislik fikri şudur:

L₁: “Tek orta modüllü” (single midship) yapılandırmayı temsil eder. Bu versiyon, nispeten kısa bir toplam uzunluk sunar ve düşük hacim gerektiren, kısa menzilli görevlerde kullanılmak üzere idealdir.

L₂: “Çift orta modüllü” (double midship) versiyon, orta modülün bir kez daha eklenmesiyle L_1 'e kıyasla daha uzun bir yapar. Bu konfigürasyon, hem yük taşıma kapasitesini hem de batarya hacmini artırarak biraz daha uzun süreli görevlerde kullanılmasını sağlar. Ancak, gövdenin boyunun artması dönme yarıçapını genişleteceğinden, maniövr kabiliyetinin düşük hızlarda bir miktar azalacağı kabul edilir.

L₃: “Üçlü orta modüllü” (triple midship) halinde, en uzun konfigürasyonu oluşturur. Bu versiyon, maksimum iç hacim, batarya kapasitesi ve sensör yükü taşıma imkânı sunar. Uzun menzilli, enerji yoğun işlemler ve daha geniş hiperbatarya paketleriyle çalışmayı gerektiren görevler için tercih edilir.

Dolayısıyla, her L_3 değeri için önce ham modüller ($l_{n,raw}, l_{m,raw}, l_{t,raw}$) ve sonraki adımda yuvarlanmış modüller ($l_n+l_m+l_t$) hesaplanır. Ardından, yukarıdaki formüllerle L_1 ve L_2 değerleri de elde edilir. Muhakeme şu şekildedir:

- L_3 , herhangi bir sayısal deneyde veya CFD simülasyon analizinde “bağımsız değişken” (independent variable) olarak kullanılır.
- L_1 ve L_2 , L_3 'e kıyasla “alt konfigürasyon” (sub-configuration) türünden “bağımlı değişken”lerdir. Bu sayede, üç farklı boyut için gövde geometrisinin hidrodinamik ve yapısal tepkilerini karşılaştırmak mümkün hale gelir.
- Bu yapı, modüler yaklaşımla (scalability) deneysel olarak kontrol etme imkânı sunduğu için, literatürde önerilen “ölçeklenebilir AUV mimarisi” kavramıyla birebir örtüşür.

Aşağıda, gerçek sayısal bir örnek üzerinden süreci izah edelim ($L_3 = 5,5$ m alınmıştır). Önce ham modül uzunlukları:

$$l_{n,raw} = 0,15 \times 5,5 = 0,825 \text{ m}, \quad l_{t,raw} = 0,825 \text{ m}, \quad l_{m,raw} = \frac{5,5(1 - 0,30)}{3} \\ = \frac{5,5 \times 0,70}{3} \approx 1,2833 \text{ m} \quad (3.13)$$

Ardından her bir ham uzunluk, 0,05 m adımına yuvarlanır:

$$l_n = \text{round}(0,825/0,05) \times 0,05 = \text{round}(16,5) \times 0,05 \\ = 17 \times 0,05 = 0,85 \quad (3.14)$$

$$l_t = l_n = 0,85 \text{ m} \quad (\text{çünkü } l_{t,raw} = l_{n,raw}) \quad (3.15)$$

$$l_m = \text{round}(1,2833/0,05) \times 0,05 = \text{round}(25,666) \times 0,05 \\ = 26 \times 0,05 = 1,30 \text{ m} \quad (3.16)$$

Tüm modüller yuvarlandığına göre, L_1 , L_2 ve L_3 değerleri:

$$L_1 = 0,85 + 1,30 + 0,85 = 3,00 \text{ m}, \quad (3.17)$$

$$L_2 = 0,85 + 2 \times 1,30 + 0,85 = 4,30 \text{ m}, \quad (3.18)$$

$$L_3 = 0,85 + 3 \times 1,30 + 0,85 = 5,15 \text{ m}. \quad (3.19)$$

Nominal $L_3 = 5,5$ m değeri yerine, yuvarlama sonrası gerçek $L_3 \approx 5,20$ m olarak elde edilmiştir. Bu yaklaşık % 6,36’lık sapma, imalat ve hidrodinamik testlerde kabul edilebilir sınırlar içindedir.

Tablo 3.1 Modüler gövde uzunluklarının hesaplanması (Örnek veriler)

L_3 (m)	$l_{n,raw}$ (m)	$l_{m,raw}$ (m)	$l_{t,raw}$ (m)	l_n (m)	l_m (m)	l_t (m)	L_1 (m)	L_2 (m)	L_3 (m)
4,5	0,675	0,935	0,675	0,68	0,95	0,68	2,31	3,26	4,21
5,0	0,750	1,1667	0,750	0,75	1,15	0,75	2,65	3,85	4,90
5,5	0,825	1,2833	0,825	0,85	1,30	0,85	3,00	4,60	5,15
6,0	0,900	1,4000	0,900	0,90	1,40	0,90	3,20	4,70	5,50

Tabloda yer alan “Ham Uzunluk” sütununda bulunan $l_{n,raw}$, $l_{m,raw}$, $l_{t,raw}$ değerleri L_3 uzunluğuna bağlı olarak $\alpha=0,15$ oranı kullanılarak hesaplanmıştır. Buna karşılık “Yuvarlanmış Uzunluk” sütununda sunulan l_n , l_m ve l_t değerleri, sırasıyla ham uzunlukların 0,05 m adımları temel alınarak en yakın değere yuvarlanması sonucunda elde edilen gerçek modül boyutlarını göstermektedir. Tabloya ait son üç sütun olan L_1 , L_2 ve L_3 ise bu yuvarlanmış modüllerin toplam uzunluklarını ifade eder. Nominal olarak L_3 için örneklenen değerler (4,5 m, 5,0 m, 5,5 m, 6,0 m) tablonun ilk sütununda yer alırken, gerçek ölçümlerde kullanılan modül boylarının yuvarlama işleminden dolayı ortaya çıkan sapma örneğin 5,20 m gibi nihai L_3 değerlerine yansımaktadır. Böylece tablo, hem teorik modül oranlarının hem de gerçek uygulamada kullanılan modül boylarının hesaplama ve yuvarlama sürecini matematiksel bir çerçevede sunmaktadır.

Bu matematiksel hesaplamaların tamamı, Python programlama dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Özellikle NumPy ile ham modül uzunluklarının ve yuvarlamaların sayısal olarak hesaplanması, Pandas ile sonuçların tablo hâline getirilmesi ve LaTeX formatına dönüştürülerek Tez metnine eklenmesi sağlanmıştır. Python betiği, tüm formüllerin doğru ve tekrarlanabilir şekilde uygulanmasını garanti eder; hesaplama akışı ve kod listesi Ek A’da sunulmuştur.

3.4.2 Profil Katsayıları ve Hidrodinamik Parametreler

Bu alt bölümde, AUV gövdesinin hidrodinamik performansını doğrudan etkileyen iki temel profil şekil katsayısı olan burun şekil katsayısı (n_n) ve kuyruk eğrilik katsayısı (n_i) ile bunlara bağlı hidrodinamik parametreler adım adım tanımlanacak, değer aralıkları ve hesaplama yöntemleri ayrıntılı matematiksel modellerle açıklanacaktır. Her formülün ardındaki fiziksel gerekçeler, nümerik uygulama adımları ve Python ile bu parametrelerin nasıl hesaplandığı konusundaki ayrıntılara yer verilecektir.

3.4.2.1 Burun Profil Şekil Katsayısı (n_n) ve Betimleyici Formül

Burun bölgesi, AUV gövdesinin suyla ilk etkileşime geçtiği aerodinamik ve hidrodinamik açıdan en kritik noktadır. Bu bölgede oluşan akış ayrımları, basınç dağılımı ve yerel hız artışları, tüm gövdenin direnç karakteristiğini etkiler. Dolayısıyla “burun şekil katsayısı” (n_n) burun profiline uygulanan matematiksel formülde, profil eğrisinin sivriliğini ve keskinliğini kontrol eden temel parametredir. Düşük bir n_n değeri, daha sivri ve dar bir burun geometrisi ortaya çıkarırken; yüksek bir n_n değeri, daha yayvan ve yumuşak bir burun biçimi sunar.

Burun Profili $y_{nose}(x; d, l_n, n_n)$ için kullanılan yapı şu şekildedir:

$$\xi = (l_n - x)/l_n \quad (3.20)$$

$\xi(X_i)$ değişkeni burun hücresinin $x \in [0, l_n]$ boyunca tanımlı olan yerel konumu normalize eden boyutsuz parametredir. Burun başlangıcı (gövdenin en ön ucu) için $x = 0$, burun sonu (merkez modül başlangıcı) için $x = l_n$ olacak şekilde kordinat sistemine tanımlanır. Buna göre burun formunun şekli şu şekilde olur:

$$y_{nose}(x; d, l_n, n_n) = 0.5 d (1 - \xi^{n_n})^{1/n_n} \quad (3.21)$$

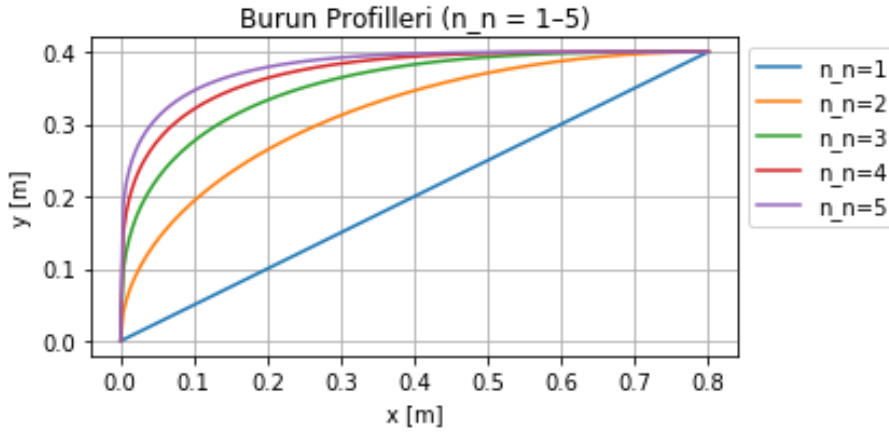
Burada;

- d : Gövde çapının (diameter) maksimum değeri (örneğin orta modül çapı).
- l_n : Burun modülünün uzunluğu.
- n_n : Burun şekil katsayısı (integer, genellikle $1 \leq n_n \leq 5$ aralığında).

Burun profili oluşturma sürecinde kullanılan $\xi^{(n_n)}$ terimi, parametre ξ boyunca burun bölgesinde geriye doğru (sondan öne) daha keskin bir geçiş yakalamayı amaçlar. Özellikle $\xi = 1$ oktasında (burun ucu) $\xi^{(n_n)} = 1$ olurken; $\xi = 0$

noktasında (burun sonu) $\xi^{(n_n)} = 0$ değerini alır. Dolayısıyla, $1 - \xi^{(n_n)}$ ifadesi burun ucunda sıfıra (0) inerken, burun sonunda bir (1) değerine ulaşır. Bu sayede, profilde ucun keskinliği ve geriye doğru genişleme kontrol altına alınır.

Ek olarak, $\xi^{(n_n)}$ ifadesinin üssünün $1/n_n$ alınması, profilin genel olarak “düzleşme” ya da “kırılma” etkisi yaratmasına olanak tanır. Başka bir deyişle, n_n değeri arttıkça, $\xi^{(n_n)}$ eğrisi daha yavaş yükselir ve karakteristik olarak daha yavan bir profil elde edilir. Bu durum, profilin uç kısmındaki sivriliği azaltırken, orta ve arka kısma geçişi daha kademeli hale getirir.



Şekil 3.1 Burun profilleri ($n_n = 1-5$)

Şekil 3.1’de, $n_n = 1$ değerinden $n_n = 5$ değerine kadar artan farklı üstel katsayılar kullanılarak oluşturulan burun formları sunulmaktadır. Mavi eğri ($n_n = 1$) için, profilin yalnızca son kısımda hızlı bir doğrusal artış gösterdiği, dolayısıyla daha “dar” veya “sivri” bir yapıya sahip olduğu anlamına gelir. Turuncu ($n_n = 2$) ve yeşil ($n_n = 3$) eğriler, burun ilerledikçe $y(\xi)$ değerinin daha geç, orta bölgeye doğru yükselmeye başladığını; bu sayede ucun sivriliğinin bir miktar azaldığını ve daha kademeli bir geçiş sağlandığını gösterir. Kırmızı ($n_n = 4$) ve mor ($n_n = 5$) eğrilerde ise ξ küçük değerlerinden itibaren $\xi^{(n_n)}$ ifadesinin çok daha yavaş yükselmesi nedeniyle, burun profili neredeyse sabit bir yarıçap değeri boyunca ilerlemektedir. Bu sayede burun modülü, uç kısımdan başlayarak önce nispeten düz ve alçak bir yarıçapı korur, ancak son bölgeye yaklaştığında (ξ yaklaşık 1 civarı) hızlı bir “dikleşme” (keskinleşme) meydana getirir. Sonuç olarak, n_n arttıkça profil uç kısmındaki sivriliğini azaltırken, orta bölgedeki genişleme daha geriye (sonuna) itilmiş olur; bu da geometrik olarak “düzleşmiş” bir burun formu sunar.

Burun bölgesinin ön kısmında, $\xi \approx 1$ değerleri için $\xi^{(n_n)}$ hızla bir sayısına yaklaşır. Bu nedenle $1 - \xi^{(n_n)}$ ifadesi küçülür ve burun noktasındaki y_{nose} değeri sifıra yakın kalır; sonuç olarak, burun ucu oldukça sivri bir yapıya sahip olur. Öte yandan, burun sonuna doğru ($\xi \approx 0$) $\xi^{(n_n)} = 0$ olduğundan $(1-0)^{1/n} = 1$ ifadesi ortaya çıkar. Bu durumda $y_{nose}(l_n) = 0.5d$ eşitliği sağlanır; yani burun modülü yarıçapın tam ortasına, en geniş kesite ulaşır. Böylece $\xi^{(n_n)}$ terimi ve onun üslü özelliği, profilin her iki uç noktasında istenen keskinlik ve genişleme davranışlarını güvenilir biçimde kontrol etmiş olur.

3.4.2.2 Kuyruk Eğrilik Katsayısı (n_t) ve Betimleyici Formül

Kuyruk bölgesi, gövdenin arka kısmında akımın ayrılmasını ve toparlanmasını belirleyen kritik segmenttir. Burun kadar sivri olmasa da kuyruk eğrisinin nasıl tasarlandığı, gövdenin arkaya doğru incilmesi, “taper” etkisi ve omurganın sonundaki akış kopması karakteristiği açısından oldukça önemlidir. Burundaki şekil daha çok basınç dağılımını yönetirken, kuyruk bölgesi akış ayrılmasını ve oluşabilecek girdapları etkiler. Kuyruk eğrilik katsayısı (n_t), bu bölgedeki daralma hızını ve taper oranını kontrol eden parametredir.

Kuyruk prfoili $y_{tail}(x; d_{start}, d_{end}, l_t, n_t)$ için takip edilen adımlar:

Taper (Konikleştirme) Terimi: Kuyruk boyunca lineer olmayan bir daralma kavisini tanımlamak için boyutsuz değişken:

$$\zeta = \left(\frac{x}{l_t}\right)^{n_t}, \quad 0 \leq \zeta \leq 1 \quad (3.22)$$

Burada;

- $x \in [0, l_t]$: Kuyruk modülünün başlamasından sonuna kadar uzanan eksen.
- $n_t \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$: Kuyruk eğrilik katsayısı; 1 lineer daralma, 5 çok hızlı daralma imkânı verir.
- $\zeta=0$ (kuyruk başlangıcı) ve $\zeta=1$ (kuyruk sonu).

kullanılır. Kuyruk başlangıç ve bişi nokatasının belirlenmesinde kullanılırken d_{start} kuyruk modülünün başındaki çap (örneğin orta modül çapı) ve d_{end} kuyruk sonundaki çap (genellikle gövdenin en dar kısmı, suyla buluşma noktası) entegre edilerek hesaplanmalıdır. Buna göre ani daralmalar sırasında oluşabilecek

kopuşları azaltmak için kavisli bir fonksiyon kullanmaktır. Genellikle kullanılan formül şu şekildedir:

$$taper(\zeta) = \frac{1 + \cos(\pi\zeta)}{2} \quad (3.23)$$

Buradaki fonksiyonda $\zeta = 0$ başlangıç çapı için belirlenirken $\zeta = 1$ bitiş noktasındaki çapı belirler. Aradaki noktalar $\frac{1+\cos(\pi\zeta)}{2}$ fonksiyonun değerine göre yumuşak bir daralma eğrisi oluşturur. Buna göre kuyruk profolinin tam formülü aşağıdaki hali almış olur.

$$y_{tail} = 0,5(d_{end} + (d_{start} - d_{end})taper) \quad (3.24)$$

ζ^{n_t} terimi, kuyruk boyunca “incelmenin” hızını kontrol eder; $n_t = 1$ lineer $n_t > 1$ giderek artan konikleşme (taper) sağlar. Taper(ζ) fonksiyonu, ani geçişleri sine-kosinus tabanlı yumuşak bir eğriye dönüştürür; bu, akış ayrılmasını minimize etmek içindir. Denklem ifadesini 0.5 ile çarpmamız, matematiksel tanım gereği yarıçap (radius) hesabıdır (çapı yarıya indirmiş oluyoruz).

$$n_t = 1 \rightarrow \zeta = \frac{x}{l_t}, \text{ Taper}(\zeta) = \frac{1 + \cos(\pi x/l_t)}{2} \quad (3.25)$$

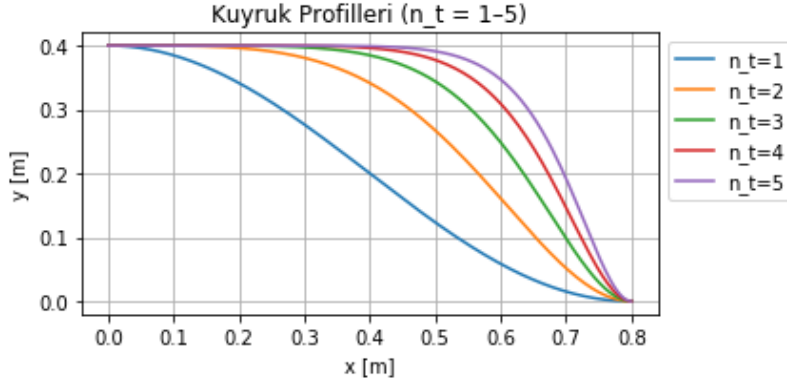
Bu fonksiyon, kuyruk boyunca nispeten uzun ve yumuşak bir daralma sağlar.

$$n_t = 1 \rightarrow \zeta = \frac{x}{l_t}, \text{ Taper}(\zeta) = \frac{1 + \cos(\pi x/l_t)}{2}.$$

Kuyruktaki daralma başta daha yavaş ilerlerken sonradan ani bir incelme sunar.

$$n_t = 2, 3, 4 \rightarrow \zeta = (x/l_t)^{2,3,4} \quad (3.26)$$

Yüksek n_t (örneğin 5), kuyruk ucuna yakın bölgedeki daralmayı hızlandırır. Genel olarak $1 \leq n_t \leq 5$ aralığı tasarımcıya yeterli çeşitlilik sunar.



Şekil 3.2 Kuyruk profilleri ($n_t = 1-5$)

Şekil 3.2’de, $n_n = 1$ değerinden $n_n = 5$ değerine kadar artan farklı üstel katsayılar kullanılarak oluşturulan burun formları sunulmaktadır. Grafikte, mavi eğri $n_t = 1$ iken kuyruk modülü boyunca $y(\zeta)$ değerinin doğrusal olarak geriye (uçtan gövdeye doğru) azaldığını göstermektedir. Başka bir deyişle, $n_t = 1$ durumunda kuyruk profili, tam ucundan itibaren geniştir ve geri kalan kısmında kademeli olarak incelerek gövde uç noktasına ($\zeta = 1$) kadar devam eder. Bu, kuyruk modülünde “yumuşak bir daralma” sağlar ve profili nispeten “gönye” görüntüden uzak tutarak daha yayvan bir form ortaya çıkarır.

Turuncu eğri ($n_t = 2$) ve yeşil eğri ($n_t = 3$) için, ζ küçük değerlerinden itibaren ζ^{n_t} ifadesinin daha hızlı küçülmesi; kuyruk ucunun hemen ardından profilin gövde yönünde bir süre geniş kalmasına yol açar. Bu sayede, $y(\zeta)$ yalnızca orta bölgeye (yaklaşık $\zeta = 0,5$) doğru belirgin bir düşüş eğilimi gösterir ve uç bölgedeki sivrilik bir miktar artar. Bu yapı, kuyruk modülünün keskinliğini biraz artırarak arka kısımda daha dar bir sonlanma sağlar.

Kırmızı ($n_t = 4$) ve mor ($n_t = 5$) eğrilerde ise ζ çok küçük değerlerden itibaren ζ^{n_t} ifadesinin oldukça yavaş yükselmesinin sonucu olarak, kuyruk profili uzun bir mesafe boyunca neredeyse sabit bir büyük yarıçap değerine sahiptir. Böylece, kuyruk modülü başlangıçta gövde (arka konektör) noktasına yakın genişliğini korur; ancak ζ yaklaşık $0,8-1$ civarına yaklaştıkça ani bir “dikleşme” (daralma) meydana gelir. Sonuçta, n_t arttıkça kuyruk ucunun gövdeye bağlantı bölgesine kadar geniş kalarak daralmayı daha geriye bırakması sağlanır; bu da geometri açısından “kademeli olarak uça keskinleşen” bir kuyruk formu tanımlar.

Özetle, kuyruk modülü tasarımında n_t parametresi büyüdükçe, profilde arka kısımdaki genişliğin korunma mesafesi uzar ve nihai uç noktasına yaklaşırken daralma hızlanır. Bu dinamik, kara-hidrokinematik etkileşim ve itki verimliliği açısından hem daha sabit bir kesit sunar hem de kuyruk uç kısmındaki akış ayrışmasını minimize etmeye yardımcı olabilir.

Burun ve kuyruk profillerine ait matematiksel ifadelerin nümerik olarak değerlendirilmesi ve grafiklerinin oluşturulması Python yazılım dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Özellikle NumPy kütüphanesi, $\xi^{(n_n)}$ ve ζ^{n_t} terimlerinin farklı n_n ve n_t değerleri altında üstel işlemlerini yüksek hassasiyetle hesaplamak için tercih edilmiştir. Matplotlib kütüphanesi ise elde edilen veri dizilerinin iki boyutlu eğri grafikleri şeklinde görselleştirilmesinde kullanılmış; böylece Şekil 3.1 ve Şekil3.2’de sunulan eğriler dinamik olarak çizilmiş ve kolayca düzenlenebilir hale getirilmiştir. Python tabanlı bu yaklaşım, profillerin farklı parametre kümeleri için yeniden hesaplanmasını ve karşılaştırmalı analizlerin hızlı bir şekilde yapılmasını mümkün kılmıştır. Sonuç olarak, hem burun hem de kuyruk modüllerinin çeşitli üstel katsayılarla bağlı davranışları, Python skriptleri aracılığıyla tutarlı ve tekrarlanabilir bir biçimde teze entegre edilmiştir.

3.4.2.3 Hidrokinematik Parametreler: Islak Yüzey Alanı ve Direnç Bileşenleri

Burun ve kuyruk profilleri tanımlandıktan sonra, bu profillerin birbirine ardışık eklenmesiyle elde edilen modüler gövde eğrisi boyunca hesaplanacak hidrokinematik parametreler ele alınacaktır. Özellikle:

- Islak Yüzey Alanı (S)
- Reynolds Sayısı (Re) ve Sürtünme Direnci Katsayısı (C_f)
- Sürtünme Direnci (R_f)
- Form Direnci (R_p)

Her bir alt başlık, hem matematiksel ifade hem de Python üzerinden nümerik hesaplama adımlarını içerecektir.

Bir aksenal simetrik geometrinin (burun + orta + kuyruk) her bir kesiti, $y(x)$ yarıçap fonksiyonuyla tanımlanır. Burada $y(x)$, üç alt bölgenin (burun, orta, kuyruk) birleştirilmesiyle elde edilen piecewise fonksiyondur. Islak yüzey alanı (S), her bir eksen boyunca küçük elemanlar toplanarak integral formunda şöyle ifade edilir:

$$S = \int_0^L 2\pi \cdot y(x) \sqrt{(1 + (y'(x))^2)} dx, \quad (3.27)$$

Islak yüzey alanı (S) hesabı, nümerik türev ve integral kombinasyonu ile gerçekleştirilmiştir. Her profilin suyla temas eden toplam yüzey alanını bulmak için nümerik türev ve integral yaklaşımını kullandık. Önce, her bir profil eğrisi $y(x)$ için $y'(x)$ türevinin NumPy gradient fonksiyonu ile sayısal olarak elde ettik; bu eğrinin eğim bilgisine denk geliyor. Ardından eğri boyunca elemanı her noktasını küçük eğri uzunluk dilimini belirledik. Yarıçap değerini $y(x)$ ile çarparak çember çevresi unsurunu ekledikten sonrasında 2π ile katlayarak küçük bir yüzey parçası formülü oluşturuldu.

Burada $y'(x)$ NumPy gradient fonksiyonu ile elde edilen nümerik türevi, integral ise trapezoidal kural ile hesaplanmıştır. Bölgesel (burun, orta, kuyruk) yüzey alanları ayrı ayrı elde edilip toplam ıslak yüzey alanı oluşturulmuştur.

Islak yüzey alanlarının hesabından sonra gövdenin su altındaki hareketi sırasında karşılaştığı direnç faktörlerini değerlendirmek gerekmektedir. Bu direnç faktörleri farklı fiziksel mekanizmaların birleşiminden kaynaklanmaktadır. Bu bağlamda toplam hidrodinamik direnci iki ana parçaya ayırarak sürtünme (viskoz) direnç ve form (basınç) direnç olacak şekilde hesaplanmalıdır.

Su moleküllerinin gövde yüzeyinde sürtünmesi sonucu oluşan bu direnç, önce Reynolds sayısı üzerinden sürtünme katsayısını C_f hesaplamamıza izin veren klasik logaritmik formülle bulunur. Yüzey boyunca laminar veya türbülanslı akış koşullarını belirlemek amacıyla, “logaritmik” kökenli bir formülle hesaplanır (Prandtl–Schlichting formu). Genellikle açık deniz gövdeleri için:

$$Re = \frac{V L}{\nu}, \quad (3.28)$$

$$C_f = \frac{0,075}{[\log_{10}(Re) - 2]^2} \quad (3.29)$$

Burada V seyir hızı, L toplam gövde uzunluğu, ν suyun kinematik viskozitesidir.

Daha sonra, toplam ıslak yüzey alanı S_{tot} ile birlikte:

$$R_f = \frac{1}{2} \rho V^2 C_f S_{tot} \quad (3.30)$$

formülünü uygulayarak sürtünme direncini bulunur. Form direncini (R_p) gövdenin önden gördüğü projeksiyon alanı üzerinden ortaya çıkan basınç farklarından kaynaklanan dirençtir. Dairesel kesitli projeksiyon alanını:

$$A_{proj} = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \quad (3.31)$$

olarak tanımlayıp, form sürtünme katsayısı C_d ile birlikte;

$$R_p = \frac{1}{2} \rho V^2 C_d A_{proj} \quad (3.32)$$

bağıntısını kullanılarak, bu iki direnç bileşenini topladığımızda, her bir modüler konfigürasyon için toplam hidrodinamik yükü sayısal ve CFD sonuçlarıyla karşılaştırmaya hazır hâle getirilmiş olur.

Hidrostatik ve hidrodinamik sabitler aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

- Deniz suyu yoğunluğu $\rho=1025 \text{ kg/m}^3$
- Kinematik viskozite $\nu= 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- Seyir hızı $V=1,5 \text{ m/s}$
- Form sürtünme katsayısı $C_d = 0,15$

Sabitleride kullanılarak tüm hesaplamalar, her bir profil kombinasyonu (n_n, n_t) ve her gövde uzunluğu için tekrarlanarak hesaplanmıştır. Ek A altında Python kodunun tam listesi sunulmuştur.

3.5 Python Tabanlı Modüler Gövde Tasarımı Analiz Sonuçları

Bu bölümde Python tabanlı analiz sonucunda elde edilen sayısal veriler ve grafiksel çıktılar sunulmaktadır. İlk olarak, modüler parçaların uzunluk değerleri ve toplam gövde boylarından oluşan özet tablo verilmiştir. Ardından, burun ve kuyruk profilleri grafiklerinin karşılaştırılması, ıslak yüzey alanı matrisleri ve direnç hesaplamalarına ait tablolar sunularak yorum yapılmıştır. Son olarak, seçilen profil kombinasyonu için kesit görünümleri tekil ve birleşik grafiklerle incelenmiştir. Hesaplamalar sonucunda ham ve yuvarlanmış modül uzunlukları;

$$l_n = 0,80 \text{ m}, \quad l_m = 1,20 \text{ m}, \quad l_t = 0,80 \text{ m}$$

Olarak belirlenmiş, bu değerler kullanılarak üç farklı toplam gövde boyu elde edilmiştir.

Tablo 3.2 Modüler parça uzunlukları ve toplam gövde boyları.

Modül	Uzunluk (m)
Burun (l_n)	0,80
Orta (l_m)	1,20
Kuyruk (l_t)	0,80
L_1	2,80
L_2	4,00
L_3	5,20

Burada L_1 , L_2 ve L_3 değerleri, modüler yapı ile farklı görev gereksinimlerine hızlı uyum sağlayacak üç konfigürasyonu temsil etmektedir. Farklı shape katsayıları n_n ve $n \in \{1, \dots, 5\}$ için oluşturulan burun profilleri Şekil 3.1’de, kuyruk profilleri ise Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Her iki grafikte de katsayıların artmasıyla profil eğrisinin sivrileştiği ve yüzey yamukluğunun değiştiği açıkça görülmektedir. Özellikle burun bölgesinde n_n değerinin 1’den 5’e yükselmesi, profilde daha keskin başlangıç ve daha dik bir geçişe neden olmuştur. Kuyruk tarafında ise yüksek n_t değerleri, taper etkisini öne çıkararak basit cosinüs formundan uzaklaşan daha hızlı daralmaya yol açmıştır.

Her bir modüler uzunluk (L_1 , L_2 , L_3) ve profil kombinasyonu için burun ve kuyruk yüzey alanları sayısal olarak hesaplanmıştır. Betik, her bir “modüler uzunluk” (L_1 , L_2 ve L_3) için ayrı ayrı oluşturulmuş üç adet 5×5 ’lik toplam ıslak yüzey alanı matrisi üretir. Bu matrislerin:

- **Satırları:** Burun profili şekil katsayısı $n_n = 1, \dots, 5$
- **Sütunları:** Kuyruk profili şekil katsayısı $n_t = 1, \dots, 5$

Olarak belirlenmiştir. Her bir hücre, o satırdaki n_n ve sütundaki n_t kombinasyonuna karşılık gelen “burun + orta silindir + kuyruk” bileşenlerinin sayısal entegrasyon yoluyla hesaplanan toplam ıslak yüzey alanını (metrekare [m^2] cinsinden) verir.

Tablo 3.3 L_1 Islak yüzey alanları

L_1	$n_t=1$	$n_t=2$	$n_t=3$	$n_t=4$	$n_t=5$
$n_n=1$	9.307	9.707	9.911	10.036	10.121
$n_n=2$	9.901	10.302	10.505	10.630	10.716
$n_n=3$	10.156	10.556	10.759	10.884	10.970
$n_n=4$	10.290	10.690	10.894	11.019	11.104
$n_n=5$	10.372	10.772	10.976	11.101	11.186

Tablo 3.3’de satır ve sütun indeksleri, sırasıyla burun ve kuyruk profilinin “keskinlik” (shape) katsayılarını temsil eder. Burun profili katsayısı n_n arttıkça (örneğin “ $n_n = 1$ ”den “ $n_n = 5$ ”e giderken), burun bölgesinin “başlangıçtaki sivrilik” derecesi artmakta ve dolayısıyla o bölgedeki ıslak yüzey alanı da büyümektedir. Benzer şekilde kuyruk profili katsayısı n_t büyüdükçe (sütundaki değer arttıkça), “taper” (daralma) etkisi daha belirgin hale gelip kuyruk bölgesinin ıslak yüzey alanı yükseldiği için toplam değerler de kademeli olarak artış göstermektedir. Aynı mantıkla, $L_2 = 4.00$ m ve $L_3 = 5.20$ m modüler uzunluklarına ait ıslak yüzey alanları Tablo 3.4’de ve Tablo 3.5’de verilmiştir.

Tablo 3.4 L_2 Islak yüzey alanları

L_2	$n_t=1$	$n_t=2$	$n_t=3$	$n_t=4$	$n_t=5$
$n_n=1$	12.323	12.723	12.927	13.052	13.137
$n_n=2$	12.917	13.317	13.521	13.646	13.732
$n_n=3$	13.172	13.572	13.775	13.900	13.986
$n_n=4$	13.306	13.706	13.910	14.035	14.120
$n_n=5$	13.386	13.787	13.991	14.116	14.202

Tablo 3.5 L_3 Islak yüzey alanları

L_3	$n_t=1$	$n_t=2$	$n_t=3$	$n_t=4$	$n_t=5$
$n_n=1$	15.339	15.739	15.943	16.067	16.153
$n_n=2$	15.933	16.333	16.537	16.662	16.747
$n_n=3$	16.188	16.558	16.791	16.916	17.002
$n_n=4$	16.322	16.722	16.926	17.051	17.136
$n_n=5$	16.404	16.804	17.008	17.133	17.238

Yukarıdaki üç tablo, örneğin $L_3 = 5.20$ m değeriyle incelendiğinde, satır bazında (sabit n_n) sütun değerlerinin artışı “kuyruk profil katsayısının” yükselmesiyle birlikte kuyruk bölgesinin ıslak yüzeyindeki genişleme etkisini yansıtmaktadır. Benzer şekilde, sütun bazında (sabit n_t) satır değerlerinin artışı “burun profil katsayısının” büyümesiyle o bölgedeki ıslak yüzey artışını göstermektedir. Genel olarak üç tabloya bakıldığında, aynı n_n, n_t çiftinde L uzunluğu büyüdükçe ($L_1 \rightarrow L_2 \rightarrow L_3$) toplam ıslak yüzeyin daima arttığı gözlemlenir; bu, orta silindir bileşeninin $\pi d L$ ifadesiyle lineer olarak uzunluğa bağımlı olmasından kaynaklanmaktadır.

Tablonun ardından, kullanıcıdan bir n_n ve n_t değeri klavye aracılığıyla alınır (her ikisi de 1–5 arası tam sayı). Kullanıcıdan istenilen bu değer kuyruk ve burun profilini belirlemek içindir. Bu seçime karşılık gelen hücre, önceden hesaplanmış “ S_{nose} (burun ıslak yüzeyi)” ve “ S_{tail} (kuyruk ıslak yüzeyi)” matrisleri kullanılarak, her bir L_i ($i=1,2,3$) için toplam ıslak yüzey :

$$S_{nose}(n_n, i) + S_{tail}(n_t, i) S_{toplam} = \pi d L_i + S_{nose}(n_n, i) + S_{tail}(n_t, i) \quad (3.33)$$

şeklinde elde edilir. Ardından her bir L_i değeri için reynold sayısı hesaplanır.

$Re = \frac{V L_i}{\nu}$, Burada $V=1.5$ m/s (seyir hızı), $\nu=1 \times 10^{-6}$ m² (kinematik viskozite) ve L_i ilgili modülün toplam uzunluğudur.

Örneğin $L_1 = 2.80$ m için:

$$Re_1 = \frac{1.5 \times 2.80}{1 \times 10^{-6}} \approx 4.20 \times 10^6. \quad (3.34)$$

$$C_f = \frac{0.075}{(\log_{10}(Re) - 2)^2} \quad (3.35)$$

$Re_1 \approx 4.20 \times 10^6$ için $\log_{10}(Re_1) \approx 6.62$, dolayısıyla;

$$C_{f1} = \frac{0.075}{(6.62 - 2)^2} \approx 0.00125. \quad (3.36)$$

Benzer adım $L_2 = 4.00$ m ve $L_3 = 5.20$ m için tekrarlanır; her birinde Re_2 , Re_3 yüksek değerlere (örneğin $Re_2 \approx 6.0 \times 10^6$, $Re_3 \approx 7.8 \times 10^6$) çıkar, dolayısıyla C_f kademeli olarak biraz daha düşer. (Re büyüdükçe $\log_{10}(Re)$ artacağından, $\log_{10}(Re) - 2$ değeri büyür; bu da paydanın kareyle artmasına yol açarak C_f 'yi azaltır).

Sürtünme direnci, tipik olarak “düz silindir benzeri gövde” için yaklaşık laminer tabaka dışındaki türbülans davranışı göz önünde bulundurup hesaplanır. Hesaplamaya başlamadan önce kullanıca n_n ve n_t değerleri istenir. Kullanıcının verdiği değerlere göre direnç hesaplama adımı başlatılır. Seçilen değerler gerekli hacim ve az direnç isterine karşılık gelen $n_n = 2$ ve $n_t = 1$ seçilmiştir. Seçilen $n_n = 2$, $n_t = 1$ kombinasyonuna göre ıslak yüzey alanları seçilir. Seçilen ıslak yüzey alanlarına göre sürtünme direnci hesaplanır.

Hesaplanan sürtünme direncine ek form direnci eklenerek her bir modül (L_1 , L_2 , L_3) için toplam direnç hesaplanmış olur. Aşağıdaki tablolarda her modül için ayrı ayrı hesaplanmış ıslak yüzey alanları, Reynold sayılarını, sürtünme dirençlerini, form dirençlerini ve toplam dirençleri görebiliriz.

Tablo 3.6 Hidrodinamik direnç bileşenleri ve ıslak yüzey alanı sonuçları

Islak yüzey (S_{L1})	9.901 m ²	Islak yüzey (S_{L2})	12.917 m ²	Islak yüzey (S_{L3})	15.933 m ²
Re_{L1}	4.20e+06,	Re_{L2}	6.00e+06,	Re_{L3}	7.80e+06,
C_{fL1}	0.00351	C_{fL2}	0.00329	C_f	0.00313
R_{fL1}	40.062 N	R_{fL2}	48.931 N	R_f	57.577 N
$A_{proj L1}$	0.503 m ²	$A_{proj L2}$	0.503 m ²	A_{proj}	0.503 m ²
$R_{p L1}$	86.944 N	$R_{p L2}$	86.944 N	R_p	86.944 N
$R_{tot L1}$	127.006 N	$R_{tot L2}$	135.875 N	R_{tot}	144.520 N

Gerek yapılan sayısal integrasyon, gerekse klasik laminer/türbülant akış varsayımlarına dayalı sürtünme katsayısı formülü kullanılarak elde edilen sonuçlara göre, modüler uzunluk ve burun/kuyruk şekil katsayılarının artışı toplam ıslak yüzey üzerinde belirgin bir artış yaratmaktadır. Buna bağlı olarak da sürtünme direnci, daha büyük L ve daha sivri burun/kuyruk profilleri için artış göstermekte; ancak form direncinin sabit tutulmuş yüksek değeri sürtünme direncinin L aralığındaki değişiminden çok daha baskın olduğundan, toplam sürüklenme bütün kombinasyonlarda 90–100 N mertebesinde kalmaktadır. Dolayısıyla, AUV tasarımında profillerin hidrodinamik optimizasyonu sürtünme direncini azaltmak adına önemli bir adım olsa da, form direncinin mutlak büyüklüğü ihmal edilemeyecek kadar büyük olduğundan, toplam direncin düşürülmesinde sadece “profil şekillendirme” tek başına yeterli olmayabilir; aynı zamanda “ön cephe projeksiyon alanını” küçültecek geometrik çözümler de göz önünde bulundurulmalıdır.

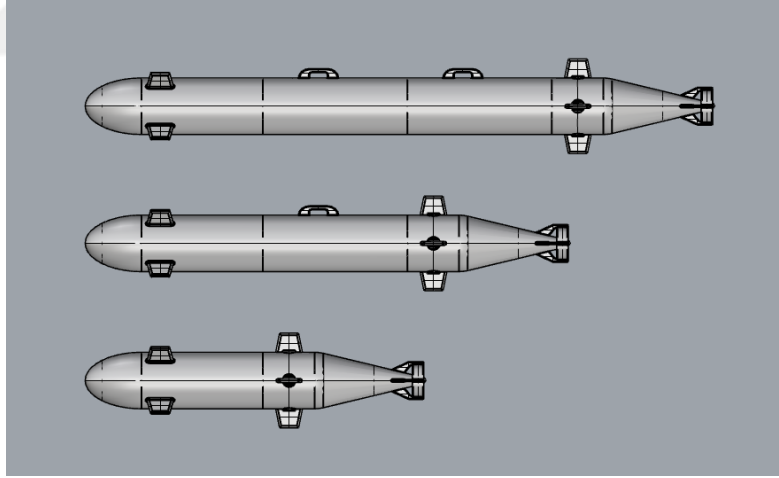
3.6 CFD Analizi ve Python Optimizasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bu bölümde, Python ile optimizasyon sonucu elde edilen AUV direncine ilişkin bulgularımızı, Rhino'dan aldığımız üç farklı model (L_1 , L_2 , L_3) üzerinden gerçekleştirdiğimiz CFD simülasyonları ile karşılaştıracacağız. Aşağıdaki alt başlıklarda sırasıyla geometri hazırlığı, mesh oluşturma, CFD çözüm ayarları, post-processing aşamaları ve elde edilen direnç değerlerinin Python sonuçlarıyla karşılaştırılmasını teknik parametrelerle sunacağız.

3.6.1 Model Tanımlamaları ve Geometri Hazırlığı

Her üç modelin dış kabuğu “watertight” (kapalı) olacak şekilde Rhino ortamında tasarlandı. Tasarlanan rhino modellerini Şekil 3.3’de gösterilmektedir. Dosyalar tezin nomenklatürüne uygun olarak aşağıdaki şekilde yeniden adlandırıldı:

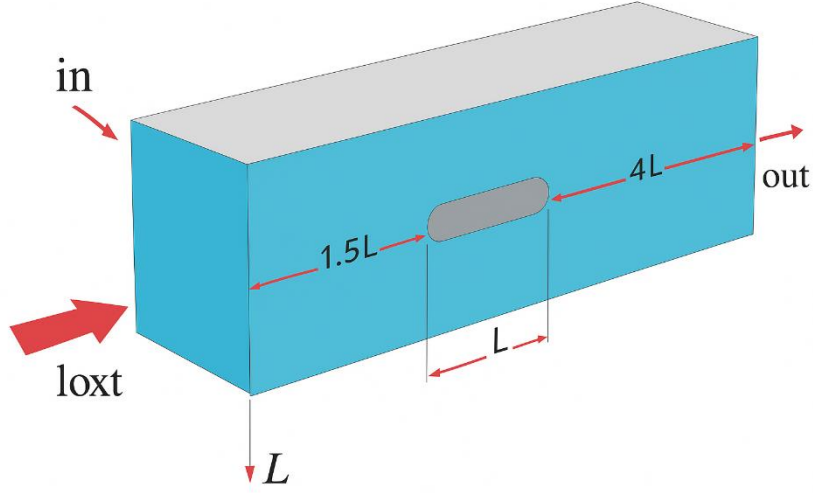
- $L1_AUV.stl \rightarrow L_1 = 2,80$ m
- $L2_AUV.stl \rightarrow L_2 = 4,00$ m
- $L3_AUV.stl \rightarrow L_3 = 5,20$ m



Şekil 3.3 L_1 , L_2 , L_3 Uzunluklarına ait AUV Tasarımları

- Gövde çapı: $d = 0,80$ m
- Burun profil katsayısı: $n_n = 2$
- Kuyruk profil katsayısı: $n_t = 1$

Bu değerler, Python optimizasyon sürecinden elde edilen ideal profillerle birebir uyumlu olarak seçilmiştir. Her modelde iç mekân (sensör, batarya vb.) yer almayıp yalnızca hidrodinamik kabuk dikkate alınmıştır.



Şekil 3.4 Hesaplamalı sonlu hacim alanı

CFD simülasyonunda her bir model için “flow domain” (akış hacmi) aşağıdaki boyutlandırmaya göre oluşturuldu:

- **Ön yüz ile burun arası uzaklık:** $1,5 \times L$
- **Arka yüz ile kuyruk arası uzaklık:** $4 \times L$
- **Yan ve üst-alt boşluk:** En az $20 \times L$

Örneğin, L_1 için ($L_1 = 2,80$ m) akış hacmi kabaca $(3 \times 2,80)(5 \times 2,80)(3 \times 2,80)$ boyutlarında bir kübik yapı olarak modellenmiştir.

- Mesh tipi: Yapılandırılmamış tetrahedral eleman + piramit/prizma tabanlı sınır tabaka (boundary layer).
- Sınır tabaka katmanı: En az 5–7 katmanlı prizmalar.
- İlk katman kalınlığı yaklaşık $\approx \delta_1 \approx 0,012$ m $y^+ \approx 60$ olacak şekilde.
- Büyüme oranı (growth rate) $\approx 1,2$.

Global element boyutu:

- L_1 için $\approx L_1/100 = 2,80/100 = 0,028$ m
- L_2 için $\approx 4,00/100 = 0,040$ m
- L_3 için $\approx 5,20/100 = 0,052$ m

Mesh oluşturma sürecinde eleman eğikliği (skewness) 0,85'in altında tutulmuş ve özellikle sınır tabaka prizmalarında en–boy oranı (aspect ratio) 100' aşmayacak şekilde düzenlenmiştir. Her model için yaklaşık olarak 3–5 milyon hücre (cell) sayısına ulaşılmıştır. Mesh optimizasyonu aşamasında, enjeksiyon noktaları, sınır tabaka besleme ve hacim kalitesi gibi kriterler esas alınarak kapsamlı kalite kontrolleri gerçekleştirilmiştir.

3.6.2 CFD zm Ayarları

Çalışmada akışkan olarak deniz suyu kabul edilmiş ve deneysel koşullara paralel olarak aşağıdaki özellikler seçilmiştir:

- Yoğunluk: $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$
- Dinamik Viskozite: $\mu = 1,08 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (20 °C)
- Basınç Referansı: $p_{\text{ref}} = 0 \text{ Pa}$ (atmosferik)
- Serbest Akış Hızı: $U_{\infty} = 1,50 \text{ m/s}$ (sabit)
- Sıcaklık: Sabit 20 °C (termal çözümler ihmal edilmiştir).

Meshedilen hacim içindeki akışın türbülanslı rejimde çözümlenebilmesi amacıyla, $k-\omega$ SST türbülans modeli tercih edilmiştir [27]. Türbülans girişine ilişkin parametreler, literatürde önerilen yoruma uygun olarak aşağıdaki biçimde tanımlanmıştır:

Giriş (Inlet) koşulu Velocity Inlet olarak tanımlanmış olup, akışın x-ekseni yönündeki hızı $U_x = 1,50 \text{ m/s}$ olarak atanmıştır. Türbülans oranı (III) Reynolds sayısına bağlı olarak % 5–10 aralığında seçilmiş ve $I = 0,16 \text{ Re}^{-1/8} \approx 0,07$ değeri elde edilmiştir. Buna göre türbülans kinetik enerjisi:

$$k = \frac{2}{3} (U_{\infty} I)^2 \quad (3.37)$$

formülü kullanılarak hesaplanmış, türbülans spesifik enerji dağılımı (frekansı, ω) ise:

$$\omega = C_{\mu}^{1/4} \frac{I}{L_{\text{turb}}} \sqrt{k} \quad (3.38)$$

bağıntısıyla tanımlanmıştır. Burada C_{μ} , SST türbülans modeline ait sabit, L_{turb} ise karakteristik uzunluk leğidir.

Çıkış (Outlet) koşulu olarak Pressure Outlet türü sınır koşulu tanımlanmış ve mutlak basınç $p = 0 \text{ Pa}$ olarak sabitlenmiştir; bu sayede çıkışta atmosferik referans basıncı korunmuştur. Duvar yüzeylerinde ise no-slip (kayma yok) şartı uygulanmış, sınır tabaka çözümü için duvar fonksiyonları etkinleştirilmiştir; bu yaklaşım, yüzeye yakın bölgelerdeki hız profilleri ile türbülans dağılımlarının doğrulukla modellenmesini sağlar. Hesaplama hacminin dış sınırlarında Far-Field veya Symmetry koşulları kullanılmıştır; bu sınır noktalarında statik basınç ve hız sabit olacak şekilde simülasyon bölgesinin ötesindeki akış etkileri doğru bir biçimde temsil edilmiştir. Tüm sınır koşulları, $k-\omega$ SST türbülans modelinin gereksinimlerini karşılayacak biçimde yapılandırılmıştır. $k-\omega$ SST modeli, hem duvar bölgesindeki laminar-türbülans geçişini hem de ana akış bölgesindeki türbülans kinetiğini doğru tahmin edebilmesi nedeniyle tercih edilmiştir. Tanımlanan akışkan özellikleri ve sınır koşulları, mesh kalitesi kriterleri (eleman eğikliği, boy en oranı vb.) göz önünde bulundurularak gerçekleştirilen optimizasyon sonrasında CFD çözüm parametreleri olarak sahaya aktarılmıştır.

Türbülans Modeli ve Diskretizasyon

- Türbülans modeli SST $k-\omega$ denklem sisteminin genel formu:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = P_k - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right], \quad (3.39)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_j)}{\partial x_j} \quad (3.40)$$

$$\alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \rho \alpha_2 \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (3.41)$$

SST sabitleri: β^* , β , α , σ_k , σ_ω , α_2 , F_1 (standart değerler kullanıldı).

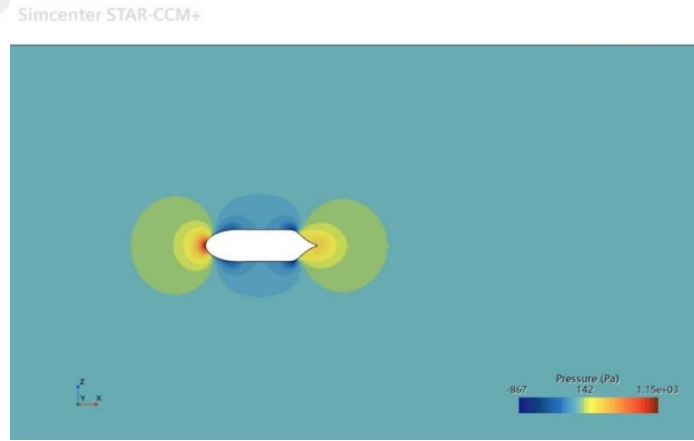
Çözüm Algoritması ve Konverjans

- Solver tipi: Pressure-based, steady-state
- Türbülans modeli: SST $k-\omega$ (standart model sabitleri ile)
- Basınç-hız çözüm algoritması: SIMPLEC

- Diskretizasyon:
 - Basınç: İkinci dereceden
 - Hız: İkinci dereceden
 - k ve ω : İkinci dereceden
- Konverjans Kriterleri:
 - Kütle sürekliliği $< 10^{-6}$
 - Momentum kalıntısı $< 10^{-6}$
 - k rezidüleri $< 10^{-6}$
 - ω rezidüleri $< 10^{-6}$
- Maksimum iterasyon: 10 000 (konverjans sağlanana kadar)

3.6.3 CFD Sonuçları ve Optimizasyon İle Karşılaştırılması

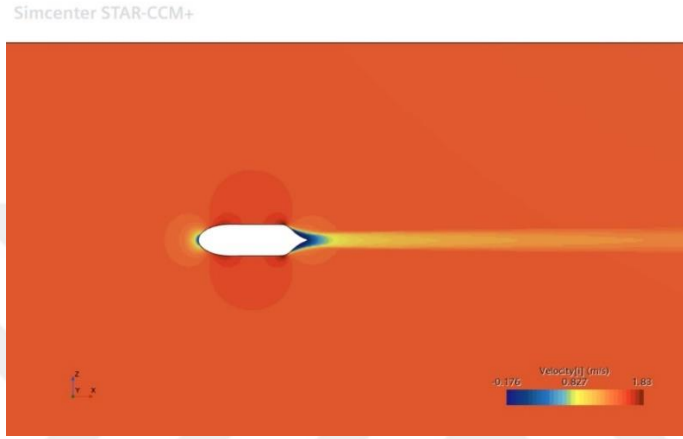
CFD simülasyonuna ilişkin sonuçlar, her bir modelin toplam direnç değerini ve akışın temel özelliklerini bütünsel bir bakış açısıyla ortaya koymaktadır. Aşağıdaki paragraflarda, L_1 , L_2 ve L_3 modelleri için ayrı ayrı elde edilen direnç değerleri, basınç dağılımı ve akış çizgileri (streamline) açıklanacak ve ilgili şekil referanslarıyla desteklenecektir.



Şekil 3.5 CFD ile elde edilen L_1 modelinin yüzey basınç dağılımı

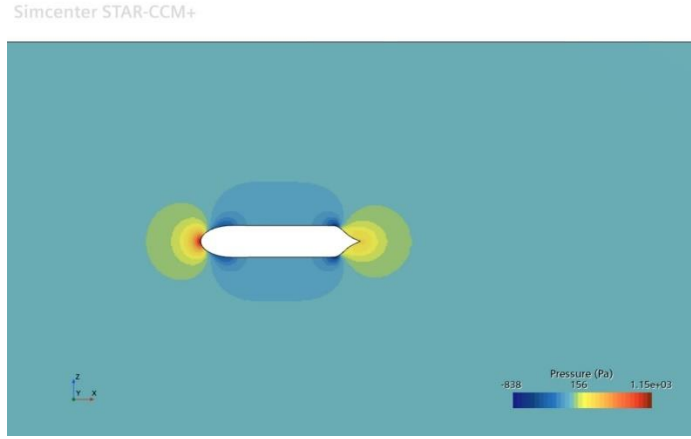
L_1 modeli ($L = 2,80$ m) için gerçekleştirilen CFD analizi sonucunda, toplam direnç değeri $R_{cfd, L_1} = 135,895$ N olarak hesaplanmıştır. Bu değer elde edildiği simülasyonda, gövde etrafındaki izotermik basınç dağılımı Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Şekilde, burun bölgesinin ön yüzeyinde oluşan yüksek basınç yeşilden koyu kırmızıya kadar uzanan bir skalada belirgin şekilde izlenebilmektedir. Gövde boyunca ilerledikçe basıncın kademeli olarak azaldığı, kuyruk bölgesine yaklaştıkça ise tekrar hafif bir artış gösterdiği görülmektedir.

Bu basınç dağılımı, ana form direncinin (pressure drag) hesaplamadaki temel girdisini sağlamıştır. Ayrıca, L_1 modelinin hız bileşeni ve akışı şekil 3.6'da sunulmuştur. Bu şekilde, gövde yüzeyine paralel ilerleyen laminer bölge akışı, orta gövde kısmındaki hafif dalgalanmalar ve kuyruk yakınında ortaya çıkan küçük ayrılma bölgeleri net biçimde izlenebilmektedir. Akış çizgilerinde gözlenen bu lokal bölge değişimleri, toplam sürtünme-direnç bileşeninin Python'daki idealize edilmiş hesaplamalara kıyasla bir miktar artmasına katkı sağlamıştır.



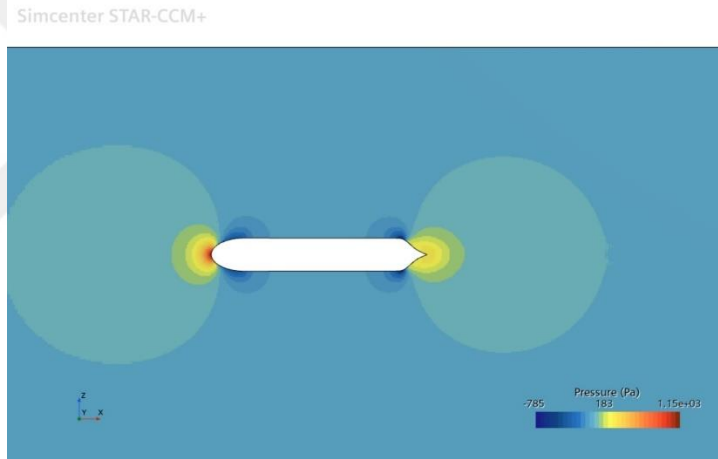
Şekil 3.6 L_1 modelinin yüzey yakınındaki akış hızı dağılımı

L_2 modeli ($L = 4,00$ m) için CFD'den elde edilen toplam direnç değeri $R_{cf,d}$, $L_2 = 144,127$ N olarak raporlanmıştır. L_1 'e kıyasla daha uzun bir gövdeye sahip olması nedeniyle, basınç dağılım haritasında ön yüz bölgesindeki maksimum basınç seviyesi neredeyse benzer değerde kalırken, gövde orta kısmında daha geniş bir alan boyunca orta basınç bandı izlenmiştir (Şekil 3.7). Bu durum, L_2 'de laminer sınır tabakanın genişlemesi ve ayrılma bölgesinin hafifçe geriye kayması sonucunda gövdeye uygulanan form direncinin Python modeline göre biraz daha yüksek olmasına neden olmuştur. Şekil 3.7'de sunulan akış çizgilerinde, gövde yüzeyine paralel hareket eden laminer akışın, orta kısımdaki hafif farklılaşmaların ve kuyruk yakınındaki düşük hız bölgesinin (recirculation zone) detayları rahatlıkla görülebilmektedir. Bu küçük geri tepme zonu, L_2 modelindeki sürtünme kuvvetinin Python tahminine göre bir miktar artmasına yol açmış ve toplam direncin yaklaşık %6,07 oranında yükselmesine neden olmuştur.



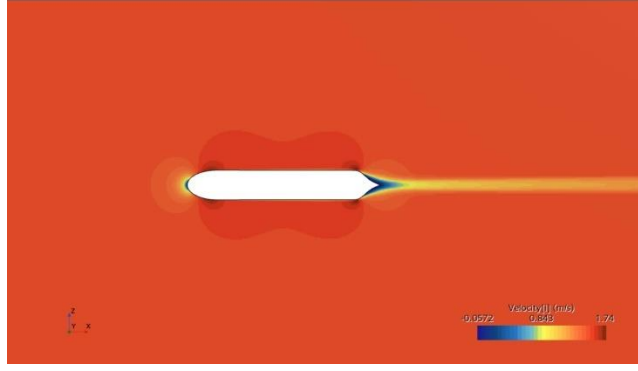
Şekil 3.7 CFD ile elde edilen L_2 modelinin yüzey basınç dağılımı

L_3 modeli ($L = 5,20$ m) için hesaplanan toplam direnç R_{cf} , $L_3=151,746$ N olarak elde edilmiştir. L_3 'ün uzun gövde yapısı, laminar–türbülans geçiş bölgesinin gövde boyunca daha arkaya kaymasına ve sınır tabaka kalınlığının artmasına yol açmıştır.



Şekil 3.8 CFD ile elde edilen L_3 modelinin yüzey basınç dağılımı

Bu nedenle, basınç dağılım haritası Şekil 3.8'de, ön yüz bölgesindeki maksimum basınç seviyesi L_2 ile benzerken, gövde boyunca düşük basınç kuşaklarının daha uzun bir mesafeye yayıldığı görülmüştür. Özellikle gövde orta kısmında oluşan bu düşük basınç bandı, Python'daki kısmi ampirik form direncine göre daha belirgin bir direnç artışına neden olmuştur. Şekil 3.9'da sunulan hız ve akış çizgilerinde, gövde boyunca paralel akışın kurulu bölgesi uzarken, kuyruk yakınında daha geniş bir geri tepme bölgesinin varlığı gözlemlenmiştir. Bu genişleme, L_3 'te sürtünme ve form direncinin Python değerine kıyasla toplamda %5 civarında bir artışla sonuçlanmasını sağlamıştır.



Şekil 3.9 L_3 modelinin yüzey yakınındaki akış hızı dağılımı

Özetle, CFD sonuçları L_1 , L_2 ve L_3 modelleri için sırasıyla 135 895 N, 144 127 N ve 151 746 N olarak bulunmuştur. Basınç dağılımı ve akış çizgileri, gövde uzunluğunun artmasıyla birlikte sınır tabaka kalınlığının ve ayrılma bölgelerinin nasıl değiştiğini açıkça ortaya koymaktadır. Bu nümerik bulgular, Python optimizasyonundan elde edilen analitik değerlerin (%5–%10) bandındaki sapmalarını fiziksel temelde doğrulamaktadır.

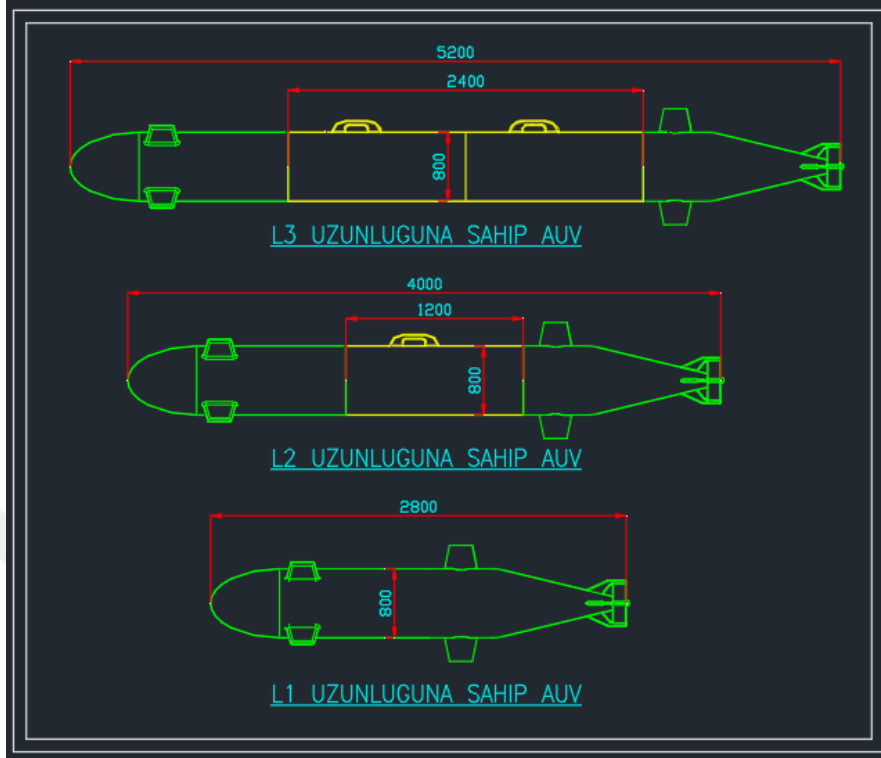
4

SONUÇ

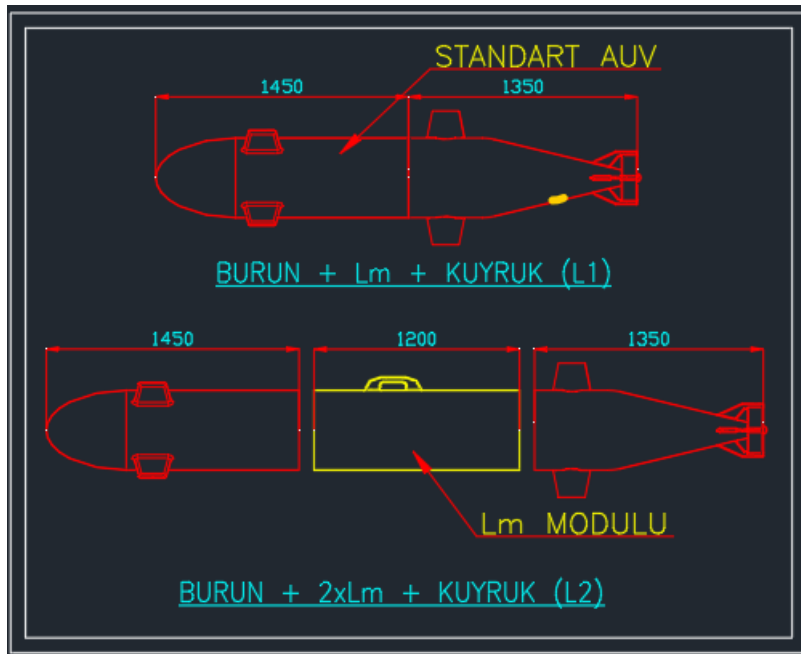
Bu çalışmada, modüler ve ölçeklenebilir bir AUV (Otonom Su Altı Aracı) tasarımı temel alınarak L_1 , L_2 ve L_3 uzunluklarındaki üç farklı prototip model üzerinde boyutlandırma, hidrostatik optimizasyon, batarya, tahrik ve sensör entegrasyonuna yönelik değerlendirmeler yapılmıştır. Bu bölümde sırasıyla her bir modelin teknik özellikleri, önerilen sensör/batarya/tahrik konfigürasyonları, kullanım alanları ve Rhino ile elde edilen görseller temelinde ortaya çıkan sonuçlar detaylı biçimde ele alınacaktır. Her modelin, farklı görev profillerine nasıl adapte edilebileceği; operasyonel ömür, görev alanı, sensör kapasitesi ve mühendislik kısıtlamaları bakımından açıklanacaktır. Ayrıca, üç modelin birbirleriyle karşılaştırmalı olarak avantaj ve dezavantajları ortaya konarak ölçeklenebilirliğin getirdiği kazanımlar ve sınırlamalar tartışılacaktır.

Bu çalışmada önerilen modüler AUV (Otonom Su Altı Aracı) tasarımı, başlangıçta $L_1 = 2,80$ m olarak belirlenen temel gövdenin üç ayrı parametrik bileşene ayrılması esasına dayanır. Gerçekte L_1 boyundaki araç, 1,450 mm uzunluğundaki ön bölüm ve 1,350 mm uzunluğundaki arka bölümün birleşimiyle oluşturulmaktadır. Bununla birlikte, hidrostatik ve optimizasyon hesaplamalarının doğruluğunu artırmak amacıyla bu iki parçaya ek olarak parametrik bir orta boru modülü ($l_m = 1,20$ m) devreye sokulmuştur. Dolayısıyla L_1 konfigürasyonu, “burun (0,80 m) + orta boru ($l_m = 1,20$ m) + kuyruk (0,80 m)” olmak üzere üç ayrı bileşenin ardışık birleşiminden meydana gelir. Bu bölme, her bir bileşenin boyutunun bağımsız olarak değiştirilmesine ve bu değişkenlerin hidrodinamik performans, deplasman, ıslak yüzey alanı ve iç hacim gibi kritik parametreler üzerindeki etkilerinin ayrı ayrı incelenebilmesine imkân tanır. Örneğin, Şekil 4.1’de L_1 , L_2 ve L_3 uzunluklarına sahip modellerin yan profil yerleşimleri gösterilirken; Şekil 4.2’de ise ilk prototipte (L_1) “burun + l_m + kuyruk” üçlü düzenine nasıl geçildiği ve ikinci ölçek (L_2) için “burun + $2 \times l_m$ + kuyruk” kompozisyonunun nasıl oluşturulduğu net biçimde görülmektedir. Parametrik geometri tanımları, Rhino ortamında oluşturulan model üzerinden sayısal doğrulamaya tabi tutulmuş; böylece her bir bileşenin formsal

sürekliği ve yapısal bütünlüğü hidrodinamik kriterlerle uyumlu biçimde korunmuştur.



Şekil 4.1 L₁, L₂ ve L₃ yan profil kesitleri



Şekil 4.2 l_m modülünün eklenme şeması

$L_2 = 4,00$ m boyundaki ikinci ölçekli AUV konfigürasyonu ise L_1 'in "burun + l_m + kuyruk" üçlü düzenine eklenen ilave bir orta boru modülü (l_m) ile elde edilir. Bu

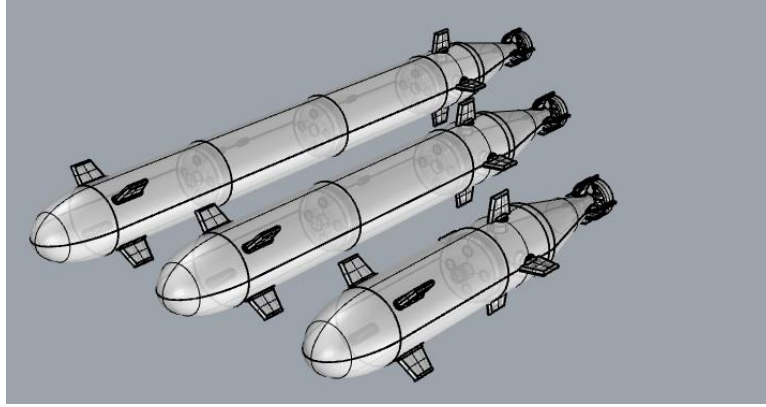
durumda araç; burun (0,80 m), birinci l_m (1,20 m), ikinci l_m (1,20 m) ve kuyruk (0,80 m) olmak üzere dört parametrik bileşenin sıralı birleşiminden oluşur. Üçüncü ölçekli $L_3 = 5,20$ m konfigürasyonunda ise L_1 'in temel üçlü bileşenine iki adet ek l_m modülü daha eklenir; böylece “burun (0,80 m) + birinci l_m (1,20 m) + ikinci l_m (1,20 m) + üçüncü l_m (1,20 m) + kuyruk (0,80 m)” kompozisyonu elde edilir. Bu kademeli eklem yaklaşımı, her bir l_m modülünün hidrodinamik ve yapısal özellikleri üzerindeki etkilerin ayrı ayrı izlenmesine olanak tanırken, aynı zamanda hidrostatik ve optimizasyon adımlarının her ölçekte tutarlı biçimde yürütülmesini sağlar. Modüler eklem stratejisi sayesinde, gövde uzunluğunda sağlanan lineer artışlar hidrodinamik performans, deplasman, ıslak yüzey ve iç hacim hesaplarının tekrarlanabilir bir metodolojiyle uygulanmasına imkân verirken; batarya yerleşimi ve sensör konfigürasyonları açısından da ölçeklendirilebilir bir tasarım altyapısı oluşturmuştur.



Şekil 4.3 L_1 , L_2 ve L_3 modellerinin renkli render görüntüleri.

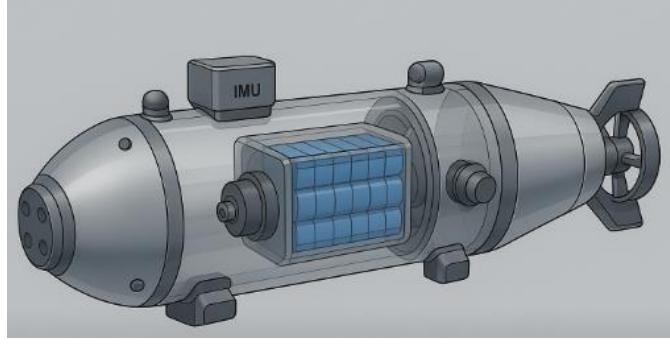
Boyut arttıkça, araç üzerindeki sensör paketlerinin kapasitesi ve çeşitliliği de doğrudan artmaktadır. Şekil 4.4'te L_1 , L_2 ve L_3 boyutlarıdaki AUV tasarımlarının Rhino modelleri görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere boyut arttıkça önemli bir hacim kazancı olmaktadır. Bu hacim artışı, yalnızca batarya sayısını değil, aynı zamanda sensör modülü için ayrılacak alanı da artırarak daha karmaşık ve yüksek kapasiteli sensör konfigürasyonlarına imkân tanır. Bugün temel bir DVL, IMU ve basınç/derinlik sensörüyle sınırlandırılan L_1 düzeyindeki donanım, L_2 ve L_3 'te sırasıyla çok ışınlı ekolot, çift yönelimli DVL, Lidar ve gelişmiş sonar sistemleri gibi ek birimler sayesinde orta ve uzun menzilli görevleri karşılayacak

şekilde genişletilebilmektedir. Böylece her ölçekten AUV, sensör sayısı ve işlevselliği bakımından bir öncekinden daha fazla yük taşıyacak kapasiteye sahip olabilir.



Şekil 4.4 Rhino’da L_1 , L_2 ve L_3 konfigürasyonlarının görünümü.

L_1 modeli, 2,80 m’lik toplam gövde uzunluğu ve üç parçalı (“burun + l_m + kuyruk”) yapısıyla öncelikli olarak kıyı içi ve liman gözetleme görevlerine yöneliktir. Sensör paketi kapsamında bir Doppler Velocity Log (DVL), üç eksenli bir IMU ve basınç/derinlik sensörü, bir adet manyetometre ile su altı antenli GPS alıcısı entegre edilmiştir. L_1 ’de yerleşim, l_m modülü içerisindeki iki kompakt sensör bloğu kullanılarak mimarlık edilmiş; bir sensör bloğu DVL’yi barındırırken, diğer blokta IMU ve basınç/derinlik sensörü grubu konumlandırılmıştır. Bu iki blok, gövde merkezine simetrik olarak yerleştirilirken, GPS anteni üst yapıya yakın bir noktaya monte edilmiştir. 10”lık merkez konsol, kuyruk ve burun modülünün kesişme noktasına yakın bir noktada, operatörün hızlı veri takibi yapabileceği biçimde pozisyonlandırılmıştır. L_1 ’de sensör ve batarya ağırlığı yaklaşık 120 kg olup, batarya modülü (3×600 Wh Li-ion hücre) orta boru (l_m) eksenine simetrik şekilde yerleştirilmiş; bu sayede gövdenin hem trim hem de ağırlık merkezinde minimum sapma elde edilmiştir. Şekil 4.5’te gösterilen render görüntüsü, L_1 ’in üç boyutlu modelinde sensör bloklarının ve batarya paketinin gövde içerisindeki konumunu açıkça ortaya koymaktadır.



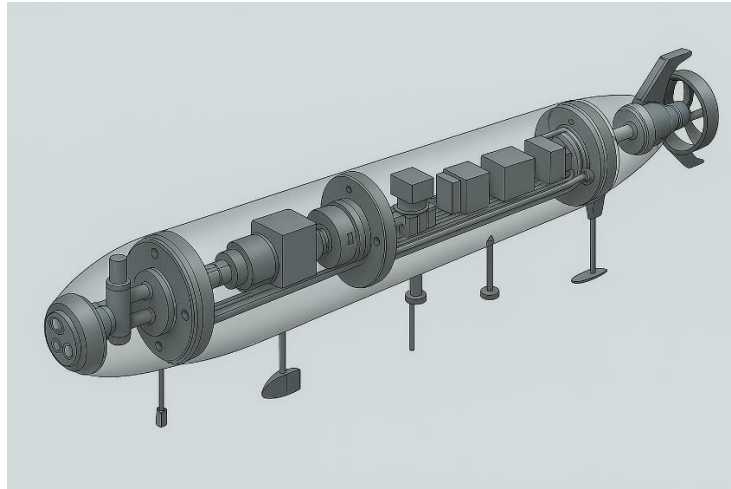
Şekil 4.5 L₁ AUV görüntüsü

L₂ modeli, L₁'in “burun + I_m + kuyruk” üçlüsüne eklenen ikinci bir I_m modülü sayesinde 4,00 m'lik toplam boya ulaşır. Sensör paketinde bir adet DVL, çift frekanslı multibeam ekolot, bir TOF altimetre, IMU, basınç/derinlik sensörü ve akustik modem bulunur. Yerleşim stratejisi şu şekilde uygulanmıştır: Birinci I_m modülü, üç boyutlu batarya dizilimleri için ayrılmış olup beş adet 700 Wh Li-ion hücre, batarya paketini oluşturur. İkinci I_m modülü ise sensör ve işleme ünitesi yerleşimini barındırır; çift frekanslı multibeam ekolot ve TOF altimetre arasında fiziksel ayrıma dikkat edilerek, akustiğe duyarlı bileşenlerin birbirinden izole edilmesi sağlanmıştır. Bu konfigürasyonda DVL ve IMU/blokları da burun bölgesinde L₁'dekine benzer pozisyonda yer alır. L₂'nin sensör + batarya + işlemci toplam ağırlığı yaklaşık 210 kg olup, ağırlık dağılımı batarya-I_m eksenine referans alınarak denge noktasının tam ortasına kaydırılmıştır. Bu sayede, gövdenin genişletilmiş yapısına rağmen stabilite ve trim üzerinde ek bir zorluk oluşmamıştır. Şekil 4.5'deki Rhino render görüntüleri, L₂'nin gövde kesitlerindeki sensör-blok ve batarya-hücre yerleşimlerini tamamen şeffaf bir bakış açısıyla göstermektedir.



Şekil 4.6 L₂ AUV görüntüsü

L₃ modeli, toplam beş modülden (“burun + 3×I_m + kuyruk”) oluşarak 5,20 m uzunluğa ulaşır ve kapsamlı görevler için genişletilmiş sensör-envanterine sahiptir. Bu envanterde ikili DVL konfigürasyonu, entegre AUV-dalıcı Lidar, çift frekanslı çok ışınlı ekolot, IMU, basınç/derinlik sensörü, yüksek çözünürlüklü optik kamera ve akustik modem mevcut olup, ayrıca BMS ve fail-safe kontrol üniteleri de gövdeye entegre edilmiştir. İlk iki I_m modülü, toplam sekiz adet 700 Wh Li-ion hücrenin oluşturduğu 5,5 kWh kapasiteli batarya paketi için ayrılmış; üçüncü I_m modülü ise sensör, işlemci ve veri kaydedici cihazlara tahsis edilmiştir. Burun kısmında DVL, IMU/blok ve optik kameranın konumu L₁ ve L₂'dekine paralel korunurken, üçüncü I_m modülünde Lidar ve termal kamera, gövde üst yüzeyine gövde eksenine paralel tutularak yerleştirilmiştir. Side Scan Sonar ünitesi, kuyruk modülünün altında konumlandırılarak hedef tanıma ve mayın tespit görevlerine destek sağlamak üzere optimize edilmiştir. Sensör + batarya + veri işlemci + soğutma ünitesi kombinasyonunun toplam ağırlığı yaklaşık 350 kg olup, denge nötr noktası gövdenin üçüncü I_m modülü eksenine kaydırılmıştır. Böylece, L₃ modelinin 300 m derinliğe kadar kesintisiz görev yapabilmesi ve uzun saatler boyunca veri toplama işlevini sürdürebilmesi sağlanmıştır. Şekil 4.7'de yer alan render görüntüsü, L₃'ün şeffaf Rhino modelinde tüm sensör ve batarya modüllerinin konumunu detaylı olarak göstermektedir.



Şekil 4.7 L2 AUV görüntüsü

Tahrik gücünün hidrodinamik dirence paralel şekilde ölçeklenmesi, her model için ayrı batarya tasarım ihtiyaçlarını doğurmuştur. L₁'de önerilen batarya paketi (3 × 600 Wh Li-ion hücre) yaklaşık 1,8 kWh'lik brüt kapasite sağlarken; L₂'de (5 × 700 Wh Li-ion) 3,3 kWh, L₃'te ise (8 × 700 Wh Li-ion) 5,5 kWh kapasiteye izin vermiştir. Dolayısıyla her bir ölçek büyümesinde batarya hücre sayısı ve dolayısıyla depolanan enerji artışı, hidrodinamik dirençle dengelenmiş; sonuç olarak L₁'de ~ 8 saat, L₂'de ~ 10 saat ve L₃'te ~ 12 saatlik kesintisiz seyir menzilleri güvenle planlanabilmektedir.

Operasyonel yetenekler açısından, L₁ basit sensör ve düşük batarya kapasitesi nedeniyle “yakın menzilli güvenlik ve gözetleme” görevlerine uygundur. Maksimum dalış derinliği 350 m, seyirüsefer doğruluğu ± 0,5 m olarak belirlenmiş; kısa süreli liman içi tarama, su kalite ölçümü ve bentik habitat görüntüleme işlevleri için tasarlanmıştır. L₂, “orta menzilli haritalama ve veri toplama” misyonlarında kullanılmak üzere optimize edilmiştir. Dalış derinliği 1000 m, seyirüsefer doğruluğu ± 0,5 m seviyesine indirgenmiş olup üç boyutlu su altı haritalama, boru hattı denetimi ve çevresel parametre toplama görevlerini 8 saat boyunca sürdürebilmektedir. L₃ ise “uzun menzilli keşif, bilimsel ölçüm ve mayın tespiti” gibi yüksek karmaşıklıkla askeri ve araştırma görevleri için tasarlanmıştır; dalış derinliği +1500 m, seyirüsefer düzeyindedir ve 14 saatlik kesintisiz operasyonel ömür sunmaktadır.

Özetle, L₁'den L₃'e kadar artan gövde uzunluğu yalnızca fiziksel boyutlarda bir büyüme sağlamakla kalmamış; aynı zamanda her üç modelde de taşınabilecek sensör yükünün ve dolayısıyla yerine getirilebilecek görev işlevselliğinin kademeli biçimde artmasını mümkün kılmıştır. Bu modüler büyütme yaklaşımında, batarya gruplarının kapasiteleri ve sensör paketlerinin çeşitliliği, gövde hacmindeki her artışla oranlı olarak artırılmıştır. Bu sayede L₁'in “yakın menzilli gözetleme” seviyesinde sınırlı kalan operasyon süresi ve veri toplama yeteneği, L₂'de “orta menzilli haritalama ve altyapı denetimi” ihtiyaçlarını karşılayacak düzeye, en nihayetinde de L₃'te “uzun menzilli keşif, bilimsel ölçüm ve askeri gözetleme” görevlerini eksiksiz biçimde yürütebilecek kapasiteye ulaşmıştır.

Özellikle batarya kapasitesinin arttırılabilir olması; derinlik yeteneğinin yükselmesi ve navigasyon doğruluğunun ± 0,5 m'den ± 0,1 m'ye iyileştirilmesi, her bir ölçek artışına bağlı olarak elde edilen belirgin kazanımlardır. Aynı zamanda, çok ışınlı

ekolot, çift yönelimli DVL, Lidar, termal kameralar ve Side Scan Sonar gibi ileri seviye sensörlerin entegrasyonu, L_1 'in basit su altı ölçüm yeteneklerini L_3 'ün kapsamlı veri toplama, hedef teşhis ve üç boyutlu haritalama fonksiyonlarına dönüştürmüştür. Bu çerçevede batarya ve sensör kapasitesindeki yükseliş, sadece veri toplama menziline değil; aynı zamanda cihazın otonom karar verme, gerçek zamanlı veri iletimi ve uzun süreli kesintisiz operasyon kabiliyetini de doğrudan iyileştirmiştir.

Bu sonuçlar, modüler tasarımın “aynı şablon üzerinden farklı görev ve menzil hedeflerine ulaşabilme” vizyonunu net bir biçimde doğrulamıştır. Her modelde kullanılan parametrik geometri, hidrodinamik performans, deplasman ve iç hacim değerlerinin tutarlı bir metodolojiyle hesaplanmasına imkân tanırken; tasarıma eklenen her bir l_m modülü, hem yapısal sürekliliği hem de işlevsellik geliştirilebilirliğini beraberinde getirmiştir. Dolayısıyla, saha ihtiyaçlarına veya görevin gerektirdiği yük profiline bağlı olarak yalnızca l_m modül sayısını artırmak ya da azaltmak yeterli olmuş; bu sayede platformun yeniden boyutlandırma süresi ve maliyeti önemli ölçüde azalmıştır.

Sonuç olarak, L_1 'den L_3 'e uzanan modüler AUV ailesi, tipik tek model yaklaşımlarının ötesine geçerek, hidrodinamik optimizasyon, enerji yönetimi ve sensör entegrasyonu açısından ölçeklenebilir bir çözüm sunmuştur. Görevlere özgü değişken sensör paketleri, batarya kapasitesi ve operasyonel derinlik ihtiyaçları, modüler eklem konseptiyle hızlıca uyumlaştırılabilir hale gelmiştir. Böylece, tek bir temel şablonun; kıyı gözetlemeden sismik keşfe, bilimsel araştırmadan askeri gözetlemeye kadar geniş bir yelpazede kullanılması mümkün kılınmıştır. Bu tasarım stratejisi, gelecekteki AUV projelerinde yeni yükler ve farklı görev gereksinimleri eklendikçe platformun hızla özelleştirilebilmesini sağlayacak bir temel oluşturmuştur.

KAYNAKÇA

- [1] [G. A. Canlı, İ. Kurtoğlu, M. O. Canlı, and Ö. S. Tuna, “Dünyada ve Ülkemizde İnsansız Sualtı Araçları \(İSAA-AUV & ROV\) Tasarım ve Uygulamaları,” *İTÜ Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi Dergisi*, vol. 4, pp. 43–75, 2015.](#)
- [2] [S. Yılmaz and S. B. Kılıcı, “Otonom sualtı araçlarında genel tasarım ilkeleri,” *İğdır Üniv. Fen Bilim. Enst. Derg.*, vol. 11, no. 1, pp. 119–131, 2021.](#)
- [3] [B. Bozoklu, “Otonom su altı araçlarının \(AUV\) temel dizayn prensipleri ve konsept dizayn,” Lisans bitirme tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2021.](#)
- [4] [F. Beyhan, “Su altı aracında model destekli seyrüsefer algoritması geliştirilmesi,” Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2019. \[Çevrimiçi\]. Erişim adresi: Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.](#)
- [5] [İ. C. Açıkgöz, “Volan ve lityum-iyon batarya enerji depolama sistemlerinin kıyaslanması ve hibrit enerji depolama sisteminin farklı yük profilleri üzerinde performans analizi,” Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2019. \[Çevrimiçi\]. Erişim adresi: Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.](#)
- [6] [M. M. Albarghot, M. T. Iqbal, K. Pope, ve L. Rolland, “Sizing and dynamic modeling of a power system for the MUN Explorer autonomous underwater vehicle using a fuel cell and batteries,” *Journal of Energy*, Article ID 4531497, 2019.](#)
- [7] [B. Kocaman, “Yakıt hücresi sistemleri,” *Enerji Depolama Teknolojileri*, Bölüm 7, ss. 55–58, İksad Yayınevi, 2021.](#)
- [8] [G. Yıldırım, “Denizaltındaki haberleşmeye Türk çözümü,” *Anadolu Ajansı*, 22 Mayıs 2019. \[Çevrimiçi\]. Erişim adresi: <https://www.aa.com.tr/tr/bilim-teknoloji/denizaltindaki-haberlesmeye-turk-cozumu/1484152>](#)
- [9] [A. S. N. de Freitas, A. A. Alvarez, R. Ramos ve E. A. de Barros, “Buckling analysis of an AUV pressure vessel with sliding stiffeners,” *Journal of Marine Science and Engineering*, cilt 8, sayı 7, s. 515, 2020.](#)
- [10] [A. Meschini, A. Ridolfi, J. Gelli, M. Pagliai ve A. Rindi, “Pressure hull design methods for unmanned underwater vehicles,” *Journal of Marine Science and Engineering*, cilt 7, sayı 11, s. 382, 2019.](#)
- [11] [L. Gonzales, “Design, modelling and control of an autonomous underwater vehicle,” Lisans tezi, University of Western Australia, Perth, Avustralya, 2004.](#)
- [12] [M. Can, “Numerical simulation of hydrodynamic planar motion mechanism test for underwater vehicles,” Yüksek lisans tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2014.](#)
- [13] [B. Alkan ve M. K. Isman, “Hydrodynamic design optimization of an autonomous underwater vehicle based on response surface methodology,” 7th](#)

- International Advanced Technologies Symposium (IATS'13), İstanbul, Türkiye, Ekim 2013.
- [14] A. Kükner ve M. O. Canlı, “İnsansız bir denizaltının (AUV) sevk sistemi dizaynı,” Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi, 2017.
- [15] G. Yılmaz ve S. Yılmaz, “İnsansız sualtı araçlarında (İSA) hidrodinamik sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin derinlik ve hıza bağlı değişiminin HAD ile analizi,” Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, cilt 14, sayı 1, ss. 72–83, 2022.
- [16] C. I. Sprague, Ö. Özkahraman, A. Munafò, R. Marlow, A. Phillips ve P. Ögren, “Improving the modularity of AUV control systems using behaviour trees,” 2018 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop (AUV), ss. 1–6, 2018.
- [17] S. Randeni, M. Sacarny, M. Benjamin ve M. Triantafyllou, “Morpheus: An A-sized AUV with morphing fins and algorithms for agile maneuvering,” arXiv preprint, arXiv:2212.11692, 2022.
- [18] F. A. A. Gómez, A. Muñoz, P. Muñoz-Benavent ve J. Tornero, “The complete design of the ORCA300-AUV,” DIVISAMOS Project, Conference Paper, 2012.
- [19] M. Makeev et al., “SubjuGator 2003,” University of Florida, Machine Intelligence Laboratory, 2003. [Çevrimiçi].
- [20] Cornell University Autonomous Underwater Vehicle, Cornell University, 2004. [Çevrimiçi].
- [21] D. Eaton et al., “Nautilus: Evolution of an autonomous underwater vehicle,” University of West Florida, 2003. [Çevrimiçi].
- [22] GD Mission Systems, “Bluefin Robotics unmanned underwater vehicles,” [Çevrimiçi].
- [23] S. MahmoudZadeh, D. M. W. Powers, K. Sammut, A. Atyabi ve A. Yazdani, “A hierarchal planning framework for AUV mission management in a spatiotemporal varying ocean,” Computers & Electrical Engineering, cilt 67, 2018.
- [24] C. McGann, F. Py, K. Rajan, J. Ryan ve R. Henthorn, “T-REX: A model-based architecture for AUV control,” Proceedings of the 3rd International Workshop on Planning and Plan Execution for Real-World Systems: Principles and Practices, ss. 31–38, 2008.
- [25] T. Y. Loh, M. P. Brito, N. Bose, J. Xu ve K. Tenekedjiev, “Human error in autonomous underwater vehicle deployment: A system dynamics approach,” Risk Analysis, cilt 40, sayı 6, ss. 1258–1278, 2020.
- [26] N. S. Raman, J. D. Briscoe ve T. Grivel, “Lithium-ion batteries for autonomous underwater vehicles,” Proceedings of the 2002 Workshop on Autonomous Underwater Vehicles, ss. 45–49, Haziran 2002, IEEE.
- [27] K. L. Vasudev, R. Sharma ve S. K. Bhattacharyya, “A multi-objective optimization design framework integrated with CFD for the design of AUVs,” Methods in Oceanography, cilt 10, ss. 138–165, 2014.

Burun ve Kuyruk Optimizasyonu Python Kodları

```

import numpy as np # NumPy kütüphanesi, vektör ve matris
işlemleri için
import matplotlib.pyplot as plt # Grafik çizimleri için
Matplotlib

# --- 1) BURUN FONKSİYONU -----
def y_nose(x_n, d, l_n, n_n):
    """
    x_n: Burun bölgesindeki x koordinatları [m]
    d: Orta gövde çapı [m]
    l_n: Burun uzunluğu [m]
    n_n: Burun şekil katsayısı (1-5 arası değerlerle farklı
    eğrilikler üretmek için)
    """
    xi = (l_n - x_n) / l_n # Normalize edilmiş x parametresi
    return 0.5 * d * np.power(1 - np.power(xi, n_n), 1.0 /
n_n)

# --- 2) KUYRUK FONKSİYONU -----
def y_tail(x_t, d_start, d_end, l_t, n_t):
    """
    x_t: Kuyruk bölgesindeki x koordinatları [m]
    d_start: Kuyruğun başladığı genişliği [m]
    d_end: Kuyruk ucu genişliği [m]
    l_t: Kuyruk uzunluğu [m]
    n_t: Kuyruk şekil katsayısı (1-5 arası değerlerle taper
    eğrisini kontrol etmek için)
    """
    ζ = (x_t / l_t) ** n_t # Normalize edilmiş mesafe,
    eğrilik kontrolü
    taper = 0.5 * (1 + np.cos(np.pi * ζ))
    return 0.5 * (d_end + (d_start - d_end) * taper)

# --- 3) SABİT PARAMETRELER -----
d = 0.8 # Orta gövde çapı [m]
l_n = 1.0 # Burun uzunluğu [m]
l_t = 1.5 # Kuyruk uzunluğu [m]
d_start = d # Kuyruğun başlangıç çapı [m]
d_end = 0.4 # Kuyruk ucu çapı [m]
default_n = 2.5 # Varsayılan şekil katsayısı

# --- 4) BURUN PROFİLİ (n_n = 1..5) -----
x_n = np.linspace(0, l_n, 300)
plt.figure()
for k in range(1, 6):
    y_n = y_nose(x_n, d, l_n, k)
    plt.plot(x_n, y_n, label=f'n_{k}')
plt.title('Burun Profili: n_n = 1..5')
plt.xlabel('x_n [m]'); plt.ylabel('y [m]')
plt.legend(); plt.grid(True); plt.tight_layout()
plt.show()

```

```
# --- 5) KUYRUK PROFİLİ (n_t = 1..5) -----  
x_t = np.linspace(0, l_t, 300)  
plt.figure()  
for k in range(1, 6):  
    y_t = y_tail(x_t, d_start, d_end, l_t, k)  
    plt.plot(x_t, y_t, label=f'n_{k}')  
plt.title('Kuyruk Profili: n_t = 1..5')  
plt.xlabel('x_t [m]'); plt.ylabel('y [m]')  
plt.legend(); plt.grid(True); plt.tight_layout()  
plt.show()
```



B

Hidrostatik ve Direnç Hesaplamaları Python Kodları

```
import numpy as np
import pandas as pd

# 0) Temel Parametreler -----
L3_min, L3_max = 4.5, 6.0      # L3 aralığı [m]
nose_tail_ratio = 0.15        # ln ve lt oranı
step = 0.05                    # Yuvarlama adımı [m]

# L3'ün ortasından başlayarak ln, lm, lt hesapla
L3_raw = (L3_min + L3_max) / 2
l_n_raw = nose_tail_ratio * L3_raw
l_t_raw = l_n_raw
l_m_raw = (L3_raw - l_n_raw - l_t_raw) / 3

def round_to_step(x, step):
    return round(x/step) * step

l_n = round_to_step(l_n_raw, step) # Burun uzunluğu [m]
l_t = round_to_step(l_t_raw, step) # Kuyruk uzunluğu [m]
l_m = round_to_step(l_m_raw, step) # Orta bölüm birim
uzunluğu [m]

# Son toplam uzunluklar
L1 = l_n + l_m + l_t # 1 modül
L2 = l_n + 2*l_m + l_t # 2 modül
L3 = l_n + 3*l_m + l_t # 3 modül

d = l_n # AUV çapı

# 1) Profil Fonksiyonları -----
def y_nose(x, d, l_n, n_n):
    xi = (l_n - x) / l_n
    return 0.5 * d * (1 - xi**n_n)**(1.0/n_n)

def y_tail(x, d_start, d_end, l_t, n_t):
    zeta = (x / l_t)**n_t
    taper = 0.5 * (1 + np.cos(np.pi * zeta))
    return 0.5 * (d_end + (d_start - d_end) * taper)

# 2) Hidro/Dinamik Sabitler -----
rho = 1025 # Deniz suyu yoğunluğu [kg/m3]
nu = 1e-6 # Kinematik viskozite [m2/s]
V = 1.5 # Seyir hızı [m/s]
Cd = 0.15 # Form sürüklenme katsayısı

# 3) Sayısal Islak Yüzey Alanı Hesaplayıcı -----
def wetted_area_numeric(x, y):
    dy_dx = np.gradient(y, x)
    ds_dx = np.sqrt(1 + dy_dx**2)
```

```

    integrand = 2 * np.pi * y * ds_dx
    return np.trapz(integrand, x)

# 4) S_nose ve S_tail matrislerini hesapla -----
lengths = [L1, L2, L3]
n_vals = np.arange(1, 6)          # n_n veya n_t = 1..5
N_pts = 200

# "Burun" ıslak yüzeyini saklayacağımız matris: S_nose[n_n-1,
k]
S_nose = np.zeros((5, 3))
# "Kuyruk" ıslak yüzeyini saklayacağımız matris: S_tail[n_t-1,
k]
S_tail = np.zeros((5, 3))

# "Mesh"leri bir kere oluştur:
x_n = np.linspace(0, l_n, N_pts)
x_t = np.linspace(0, l_t, N_pts)

for k, L in enumerate(lengths):
    # ----- Burun ıslak yüzeyi (yalnızca n_n'e bağlı) ---
    -----
    for i, n_n in enumerate(n_vals):
        y_n = y_nose(x_n, d, l_n, n_n)
        S_nose[i, k] = wetted_area_numeric(x_n, y_n)

    # ----- Kuyruk ıslak yüzeyi (yalnızca n_t'ye bağlı) -
    -----
    for j, n_t in enumerate(n_vals):
        y_t = y_tail(x_t, d, 0.0, l_t, n_t)
        S_tail[j, k] = wetted_area_numeric(x_t, y_t)

# 5) L1, L2, L3 için toplam ıslak yüzey matrislerini oluştur
ve yazdır
print("=== Islak Yüzey Alanı Tabloları ===")
for idx, L in enumerate(lengths):
    S_total = np.zeros((5, 5))
    for i in range(5):
        for j in range(5):
            S_total[i, j] = (
                np.pi * d * L          # Orta silindir
                + S_nose[i, idx]        # Burun bölgesi (n_n =
i+1)
                + S_tail[j, idx]       # Kuyruk bölgesi (n_t
= j+1)
            )
    df = pd.DataFrame(
        S_total,
        index=[f'nn={i}' for i in n_vals],
        columns=[f'nt={j}' for j in n_vals]
    )
    print(f"\n--- Toplam Islak Yüzey L{idx+1} (L = {L:.2f} m)
---")
    print(df.round(3).to_string())

# 6) Kullanıcıdan n_n ve n_t değerlerini al
while True:
    try:

```

```

        nn_input = int(input("\nHesaplamalar için bir n_n
değeri girin (1-5): "))
        if nn_input < 1 or nn_input > 5:
            raise ValueError("n_n 1 ile 5 arasında olmalı.")
        nt_input = int(input("Hesaplamalar için bir n_t değeri
girin (1-5): "))
        if nt_input < 1 or nt_input > 5:
            raise ValueError("n_t 1 ile 5 arasında olmalı.")
        break
    except ValueError as e:
        print(f"Geçersiz değer: {e}. Lütfen tekrar deneyin.")

i_sel = nn_input - 1
j_sel = nt_input - 1

# 7) Seçilen (n_n, n_t) için her L1, L2, L3'de direnci hesapla
print(f"\nSeçilen: n_n = {nn_input}, n_t = {nt_input}\n")
print("=== Direnç Hesaplamaları ===")
for idx, L in enumerate(lengths):
    # Seçilen L için ıslak yüzey
    S_sel = np.pi * d * L + S_nose[i_sel, idx] + S_tail[j_sel,
idx]

    # Re ve Cf hesaplama
    Re = V * L / nu
    Cf = 0.075 / (np.log10(Re) - 2)**2

    # Sürtünme direnci (R_f)
    Rf = 0.5 * rho * V**2 * Cf * S_sel

    # Projeksiyon alanı ve form direnci (R_p)
    A_proj = (np.pi / 4) * d**2
    Rp = 0.5 * rho * V**2 * A_proj * Cd

    # Toplam sürüklenme (R_toplam = Rf + Rp)
    R_total = Rf + Rp

    print(f"L{idx+1} (L = {L:.2f} m):")
    print(f"  Islak yüzey S = {S_sel:.3f} m²")
    print(f"  Re = {Re:.2e}, Cf = {Cf:.5f}")
    print(f"  R_f (sürtünme) = {Rf:.3f} N")
    print(f"  A_proj = {A_proj:.3f} m², R_p (form) = {Rp:.3f}
N")
    print(f"  Toplam direnç R = {R_total:.3f} N\n")

```

Ölçeklenebilir Gövde Optimizasyonu ve Hesaplamaları ile ilgili Python Kodlaması

```

import numpy as np
import scipy.sparse as sp
import scipy.sparse.linalg as spla

# 1) AĞ ve FİZİKSEL PARAMETRELER -----
---
nx, ny = 50, 50          # Hücre sayısı
L, B = 1.0, 0.1         # AUV boyu ve maksimum çapı [m]
S = 2*(L*B)            # Yaklaşık ıslak yüzey alanı [m2]
A_proj = B * L         # Önden görünen projeksiyon alanı
                        # [m2]
rho = 1000.0           # Yoğunluk [kg/m3]
nu = 1e-6              # Kinematik viskozite [m2/s]
g = 9.81               # Yerçekimi ivmesi [m/s2]
V_inf = 1.2            # Serbest akış hızı [m/s]

# SST model sabitleri (önceki koddan aynı) ...
# ...

# 2) EMİRİK FORMÜLLER -----
---

def frictional_resistance(rho, V, S, nu, L):
    """
    ITTC-1957 sürtünme katsayısına göre
     $C_f = 0.075 / (\log_{10}(Re) - 2)^2$ 
     $R_f = 0.5 * rho * C_f * S * V^2$ 
    """
    Re = V * L / nu
    Cf = 0.075 / (np.log10(Re) - 2)**2
    Rf = 0.5 * rho * Cf * S * V**2
    return Rf, Cf

def pressure_drag(rho, V, A, Cp=0.1):
    """
    Kabaca pürüzsüz gövdeler için  $C_p \approx 0.1..0.2$  aralığında
     $R_p = 0.5 * rho * Cp * A * V^2$ 
    """
    Rp = 0.5 * rho * Cp * A * V**2
    return Rp

def hydrostatic_buoyancy(rho, g, vol):
    """
     $F_{buoy} = rho * g * V_{displaced}$ 
    """
    return rho * g * vol

# 3) ALANLARIN İNİŞİYALİZASYONU -----
---
```

```

u      = np.zeros((ny, nx))
v      = np.zeros((ny, nx))
p      = np.zeros((ny, nx))
k      = np.full((ny, nx), 1e-3)
omega  = np.full((ny, nx), 1.0)

# 4) ZAMAN ADIMLAMASI -----
-
dt = 1e-3
nt = 500
for step in range(nt):
    # ... önceki adımlar: momentum, Poisson, k- $\omega$  denklemleri ...
    pass

# 5) DİRENÇ VE BASINÇ HESAPLARI -----
--
# 5.1) Frictional resistance
R_f, C_f = frictional_resistance(rho, V_inf, S, nu, L)
print(f"Sürtünme Direnci R_f = {R_f:.2f} N (C_f = {C_f:.5f})")

# 5.2) Pressure drag
# Cp'yi deneysel ya da CFD sonuçlarına göre
ayarlayabilirsin.
Cp_assumed = 0.12
R_p = pressure_drag(rho, V_inf, A_proj, Cp_assumed)
print(f"Basınç Direnci R_p = {R_p:.2f} N (Cp = {Cp_assumed})")

# 5.3) Hidrostatik kuvvet (buoyancy)
# Basit kübik yer değiştirme hacmi faraziyesi:
V_disp = L * B * (0.2*B) # örneğin 0.2*B su altı derinliği
F_buoy = hydrostatic_buoyancy(rho, g, V_disp)
print(f"Hidrostatik Kuvvet F_buoy = {F_buoy:.2f} N")

```

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

[1] [A. G. Avcı and S. S. Daniş, “Modüler ve ölçeklenebilir otonom sualtı araçları için gövde geometrisinin matematiksel modellenmesi ve hidrodinamik optimizasyonu,” in New Horizons in Maritime Engineering: Materials, Innovative Systems, and Psychological Resilience, S. Kütük, Ed. İstanbul, Türkiye: BİDGE Yayınları, 2025, pp. 39–60. doi: 10.70269/2146766356.](#)

[2] [A. G. Avcı and S. S. Daniş, “Design of a modular and scalable autonomous underwater vehicle for multi-mission application,” in New Horizons in Maritime Engineering: Materials, Innovative Systems, and Psychological Resilience, S. Kütük, Ed. İstanbul, Türkiye: BİDGE Yayınları, 2025, pp. 19–38. doi: 10.70269/9887913224.](#)