DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTONOM SU ÜSTÜ VE SU ALTI ARAÇ FORMLARININ HİDRODİNAMİK AÇIDAN GELİŞTİRİLMESİ

Mesut TANER

Eylül, 2023
İZMİR

OTONOM SU ÜSTÜ VE SU ALTI ARAÇ FORMLARININ HİDRODİNAMİK AÇIDAN GELİŞTİRİLMESİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi
Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Anabilim Dalı, Gemi İnşaatı Programı

Mesut TANER

Eylül, 2023
İZMİR

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

MESUT TANER tarafından **PROF.DR. KADRİ TURGUT GÜRSEL** yönetiminde hazırlanan "**OTONOM SU ÜSTÜ VE SU ALTI ARAÇ FORMLARININ HİDRODİNAMİK AÇIDAN GELİŞTİRİLMESİ"** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

……
Prof. Dr. Kadri Turgut GÜRSEL
_____
Danışman

……	……
Prof. Dr. Gökdeniz NEŞER	Prof. Dr. Can Özgür ÇOLPAN
_____	_____
Tez İzleme Komitesi Üyesi	Tez İzleme Komitesi Üyesi
……	……
Prof. Dr. Şeniz Ertuğrul	Doç. Dr. Erinç Dobrucalı
_____	_____
Jüri Üyesi	Jüri Üyesi

_____
Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU
Müdür
Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tezin oluşumundan tamamlanmasına kadar geçen süreçte değerli fikirleri ile beni yönlendiren ve yoğun desteğini esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Kadri Turgut GÜRSEL'e ve tez izleme komitesinde yer alarak çalışmanın olgunlaşması sürecinde değerli görüş ve önerilerini sunan Prof. Dr. Gökdeniz NEŞER ve Prof. Dr. Can Özgür ÇOLPAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Mesut TANER

OTONOM SU ÜSTÜ VE SU ALTI ARAÇ FORMLARININ HİDRODİNAMİK AÇIDAN GELİŞTİRİLMESİ

ÖZ

Denizel araştırmalar ve mühendislik projelerinde araştırma gemilerinin yanı sıra insansız deniz araçlarından da yararlanılmaktadır. Bu araçlar araştırma sürelerini kısaltarak riskleri en aza indirmekle beraber denizlerin ve okyanusların derinliklerinde yerinde ayrıntılı oşinografik, jeolojik, jeofizik verileri ölçmek ve toplamak için önemli fırsatlar sunmaktadır. Bu nedenlerle insansız su üstü ve su altı araçlarının geliştirilmesi son yıllarda çok sayıda çalışmanın konusu olmuştur.

Bu çalışmada, Otonom Su Altı Aracı (AUV), Uzaktan Kumandalı Araç (ROV) ve Otonom Suüstü Aracı (ASV) olarak çalışabilen insansız bir araştırma aracı tasarlanmıştır. Bu uyarlanabilir cihazın temel amacı, oşinografi, jeofizik ve jeoloji, gibi çeşitli alanlarda bilimsel araştırmalar yapmak ve mühendislik çalışmalarına katkıda bulunmaktır. Yerinde veri toplama, konumlanma ve seyir için bir dizi sensörle donatılacak araç, gerçek zamanlı veri akışı ile gözlemlerin bir gemide veya karada bulunan merkezi bir kontrol merkezine iletilmesini sağlayacaktır. Otonom su altı araç teknolojilerinin entegre edilmesiyle bu uyarlanabilir araç, su altı haritalama ve açık deniz araştırmaları gibi görevler de dahil olmak üzere geniş bir çalışma sahasına sahip olacaktır.

Biyomimikri metodolojisinin kullanımı, özellikle mühendislik tasarım süreçlerinin yürütülmesi için etkili ve alternatif bir yaklaşım olarak ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada, su altı aracı için uygun bir form tasarlamak amacıyla biyomimikri yaklaşımı kullanılmıştır. Hayvanlar, bitkiler ve organizmalar tarafından hayatta kalmalarını sağlamak için geliştirilen çözümlerden ilham alan biyomimikri, otonom su altı aracının form tasarımında kullanılmıştır. Bununla birlikte, bu metodun, yapısal dayanımdan yazılım mimarisine kadar uzanan tasarım sürecinin çeşitli yönlerinde etkili yenilikler üretebilecek yol gösterici bir ilke olarak kabul edilebileceği vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Form geliştirme, biyomimikri, otonom su üstü aracı, otonom su altı aracı, hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi

HYDRODYNAMIC DEVELOPMENT OF AUTONOMOUS SURFACE AND UNDERWATER VEHICLE FORMS

ABSTRACT

In addition to research ships, unmanned marine vehicles are also used in marine research and engineering projects. These tools minimize risks by shortening research times and offer important opportunities to measure and collect detailed oceanographic, geological and geophysical data in situ in the depths of the seas and oceans. For these reasons, the development of unmanned surface and underwater vehicles has been the subject of many studies in recent years.

In this study, an unmanned research vehicle that can operate as an Autonomous Underwater Vehicle (AUV), Remotely Operated Vehicle (ROV) and Autonomous Surface Vehicle (ASV) is designed. The main purpose of this adaptable device is to make scientific researches and contribute to engineering studies in various fields such as oceanography, geophysics and geology. The vehicle, which will be equipped with a series of sensors for on-site data collection, positioning and navigation, will enable the transmission of observations to a central control center located on a ship or on land, with real-time data flow. By integrating autonomous underwater vehicle technologies, this adaptive vehicle will have a wide range of work, including tasks such as underwater mapping and offshore exploration.

The use of biomimicry methodology is emerging as an effective and alternative approach, especially for the execution of engineering design processes. In this study, the biomimicry approach was used to design a suitable form for the underwater vehicle. Inspired by solutions developed by animals, plants and organisms to ensure their survival, biomimicry is used in the form design of the autonomous underwater vehicle. However, it has been emphasized that this method can be considered as a guiding principle that can produce effective innovations in various aspects of the design process, from structural strength to software architecture.

Keywords: Form development, biomimicry, autonomous underwater vehicle, computational fluid dynamics analysis

İÇİNDEKİLER

Sayfa

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU ii
TEŞEKKÜR iii
ÖZ iv
ABSTRACT vi
ŞEKİLLER LİSTESİ xi
TABLOLAR LİSTESİ xv
KISALTMALAR xvi
SEMBOLLER LİSTESİ xvii

BÖLÜM BİR- GİRİŞ 1

1.1 Araştırma Konusunun Tanımlanması ve Önemi 1
1.2 Araştırmanın Amacı ve Hedefleri 7
1.3 Araştırmanın Yöntemi 10
1.3.1 Araç Tipi Seçimi ve Ön Tasarım 13
1.3.2. Otonom Su Altı Aracının (AUV) Tasarlanması 16
1.3.3. Kablo Kumandalı Su Altı Aracının (ROV) Tasarlanması 17

BÖLÜM İKİ - TASARIMDA BİYOMİMİKRİ 19

2.1 Biyomimikri Teknolojileri ve Uygulama Alanları 22

BÖLÜM ÜÇ - MATEMATİKSEL MODEL 25

3.1. Akışkanlar Mekaniğinin Temel Diferansiyel Denklemleri 25
3.1.1 Kütlenin Korunumunun Diferansiyel Denklemi 26
3.1.2 Momentumun Korunumunun Diferansiyel Denklemi 26
3.1.3 Navier-Stokes Denklemleri 27
3.2 Türbülans Modelleri 28
3.2.1 RANS Denklemleri 29

3.2.2 k-ε Türbülans Modeli 32
3.2.3 k-ω Türbülans Modeli..... 35
3.3 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi 37

BÖLÜM DÖRT - İNSANSIZ DENİZ ARAÇLARI VE BİLEŞENLERİ 41

4.1 Kablo Kumandalı Su Altı Araçlar 42
4.2 Otonom Su Altı Araçları 46
4.2.1 Malzeme ve Mekanik Özellikler 51
4.2.2 Güç Sistemleri 51
4.2.3 Navigasyon ve İletişim 52
4.2.4 Sensörler 54
4.2.5 Bağlanma Sistemleri..... 55
4.3 Otonom Yüzey Araçları 56

BÖLÜM BEŞ - OTONOM DENİZ ARACI FORMLARININ HAD İLE GELİŞTİRİLMESİ 60

5.1 Giriş 60
5.1.1 SWATH, Torpido ve ROV Modelleriyle Validasyon Çalışması 62
5.1.2 Sonuçların Değerlendirilmesi 68
5.2 Katamaran ve Ponton Bot Modelleriyle Ayrıklık Oranı İncelenmesi 70
5.2.1 Katamaran Modeli 70
5.2.2 Ponton 79
5.3 AUV, ROV ve ASV Formlarının Geliştirilmesi 91
5.3.1 AUV, ROV ve ASV Formlarının CAD Geometrilerinin Oluşturulması. 91
5.3.2 Hesaplama Hacimleri ve Sınır Şartlarının Tanımlanması 102
5.3.3 Ağ Yapısının Oluşturulması 103
5.3.4 Sonuçların Değerlendirilmesi 106

BÖLÜM ALTI - SONUÇLAR VE ÖNERİLER 115

KAYNAKLAR 118

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 DEÜ Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü'ne ait araştırma gemileri; soldan sağa Koca Piri Reis , Dokuz Eylül 4 , Dokuz Eylül 1 ve Dokuz Eylül 3 8
Şekil 1.2 Biyomimikri tasarım spirali 12
Şekil 1.3 Farklı tip tekneler için yapılan direnç analizi sonuçları 15
Şekil 2.1 Biyomimikri yaklaşımları 19
Şekil 2.2 Çatı ve mukavvanın kıvrımlı yapısının örnek alındığı deniz kabuğu 22
Şekil 2.3 Biyomimikri yaklaşımları 23
Şekil 2.4 Biyomimikri uygulama alanları 24
Şekil 3.1 Türbülanslı akışta tipik noktasal hız ölçümü 29
Şekil 3.2 Hesaplamalı akışkanlar dinamiğine ait akış şeması 37
Şekil 3.3 P düğüm noktası etrafındaki kontrol hacmi 38
Şekil 4.1 Su Altı Araçlarının Sınıflandırılması 42
Şekil 4.2 Bir ROV'un bileşenleri 43
Şekil 4.3 ROV türleri 44
Şekil 4.4 ROV ve kablo yönetim sistemi 45
Şekil 4.5 Kablo direncinin ROV toplam direncine etkisi 46
Şekil 4.6 Bir AUV'nin bileşenleri 48
Şekil 4.7 AUV'lerin sınıflandırılması 49
Şekil 4.8 AUV'lerin farklı sınıflara göre kullanım oranları 50
Şekil 4.9 Bir ASV'nin temel bileşenleri 57
Şekil 4.10 ASV'lerin sınıflandırılması 59
Şekil 4.11 İngiliz Loydu'nun otonomi seviyesine göre yaptığı ASV sınıflandırması 59
Şekil 5.1 Begovic tarafından gerçekleştirilen test ve SWATH formundaki model ... 63
Şekil 5.2 SWATH formundaki modelin HAD analizi için oluşturulan hesap hacmi 63
Şekil 5.3 DARPA Suboff denizaltı modeli 65
Şekil 5.4 DARPA Suboff denizaltı HAD analizi için hesap hacmi 66
Şekil 5.5 DARPA Suboff gövdesinin ağ örgülü modeli 66
Şekil 5.6 MERLIN ROV aracı, aracın modelleri ve HAD analizi hesap hacmi 67
Şekil 5.7 HAD analizleri ile çekme tankı deneylerinin karşılaştırılması 69

Şekil 5.8 DARPA Suboff modelinin deneysel verileri ve HAD analizin karşılaştırılması 70
Şekil 5.9 Molland tarafından geliştirilen tekne formu 72
Şekil 5.10 Molland tarafından geliştirilen formun modeli ve hesaplama hacmi 72
Şekil 5.11 Broglia tarafından geliştirilen katamaran tekne formu 72
Şekil 5.12 Broglia tarafından geliştirilen katamaranın modeli ve hesaplama hacmi . 73
Şekil 5.13 Wigley tekne formuna ait model hesaplama hacmi 74
Şekil 5.14 Final-1 tekne formuna ait model ve hesaplama hacmi 74
Şekil 5.15 n200f-Final tekne formuna ait model ve hesaplama hacmi 75
Şekil 5.17 Katamaran modellerinin 1-5 m/s hızları için HAD analizi sonuçları 75
Şekil 5.18 Wigley formundaki katamaranların çeşitli hızlarda ayrıklık oranları karşılaştırması..... 77
Şekil 5.19 Final-1 formundaki katamaranların çeşitli hızlarda ayrıklık oranları karşılaştırması..... 77
Şekil 5.20 n200f-Final formundaki katamaranların çeşitli hızlarda ayrıklık oranları karşılaştırması..... 78
Şekil 5.21 Optimum ayrıklık oranı için form dirençlerinin karşılaştırması 78
Şekil 5.22 Üç silindirik sephiyeli ponton tekne 80
Şekil 5.23 Silindirik ve hidrodinamik olarak iyileştirilmiş sephiye elemanlarına (Orijinal-Form, Form-II ve Form-III) sahip ponton teknelerin modelleri . 80
Şekil 5.24 Sephiye elemanlarının yakınındaki alan da dahil olmak üzere tüm akışkan alanındaki ağ yapısı..... 82
Şekil 5.25 Ponton botların v= 1 m/s hızdaki direnç analizlerinin tahmini sırasında ağ yapılarında elde edilen duvar fonksiyon değerleri 83
Şekil 5.26 Ponton botların v= 5 m/s hızdaki direnç analizlerinin tahmini sırasında ağ yapılarında elde edilen duvar fonksiyon değerleri 83
Şekil 5.27 Ponton botların v= 10 m/s hızdaki direnç analizlerinin tahmini sırasında ağ yapılarında elde edilen duvar fonksiyon değerleri 84
Şekil 5.28 0,10- 0,15- 0,20 ayırma oranları ile “Orijinal-Form ve Form-II” modellerinin CFD analizlerinin direnç sonuçları 86
Şekil 5.29 0,10- 0,15- 0,20 ayırma oranları ile “Orijinal-Form ve Form-III” modellerinin CFD analizlerinin direnç sonuçları 87

Şekil 5.30 Ayrılma oranı 0,10 olan "Orijinal-Form, Form-II ve Form-III" modellerinin HAD analizlerinin direnç sonuçları. 88
Şekil 5.31 Ayrılma oranı 0,15 olan "Orijinal-Form, Form-II ve Form-III" modellerinin HAD analizlerinin direnç sonuçları. 88
Şekil 5.32 Ayrılma oranı 0,20 olan "Orijinal-Form, Form-II ve Form-III" modellerinin HAD analizlerinin direnç sonuçları. 89
Şekil 5.33 Ayrıklık oranı 0.1 olan Form-II'nin direnç bileşenlerinin payları 90
Şekil 5.34 AUV-0 modeli ve boyutları 92
Şekil 5.35 AUV-1 modeli ve boyutları 92
Şekil 5.36 AUV-2 modeli ve boyutları 93
Şekil 5.37 AUV-3 modeli ve boyutları 93
Şekil 5.38 Gagalı balina, model ve boyutları 95
Şekil 5.39 İspermeçet balinası, model ve boyutları 95
Şekil 5.40 Köpek balığı, model ve boyutları 96
Şekil 5.41 Yassı sırtlı deniz kaplumbağası, model ve boyutları 96
Şekil 5.42 AUV-4 ve boyutları 98
Şekil 5.43 AUV-5 ve boyutları 98
Şekil 5.44 AUV-6 ve boyutları 99
Şekil 5.45 AUV-7 ve boyutları 99
Şekil 5.46 Hibrit platform ve boyutları 100
Şekil 5.47 ROV formları 101
Şekil 5.48 NACA profilinden türetilen sephiye elemanına sahip ASV 101
Şekil 5.49 Ponton sephiye elemanına sahip ASV 102
Şekil 5.50 AUV modelleri için kullanılan hesaplama hacmi 103
Şekil 5.51 Torpido formlu AUV modelleri için oluşturulan ağ yapıları 104
Şekil 5.52 Seçilen deniz canlılarına ait AUV modelleri için oluşturulan ağ yapıları 104
Şekil 5.53 Hibrit formlu AUV modelleri için oluşturulan ağ yapıları 105
Şekil 5.54 ROV-7 ve ASV modelleri için oluşturulan ağ yapıları 105
Şekil 5.55 AUV-0 y+ dağılımı 106
Şekil 5.56 AUV-1 y+ dağılımı 106
Şekil 5.57 AUV-2 y+ dağılımı 107

Şekil 5.58 AUV-3 y+ dağılımı 107
Şekil 5.59 Torpido formundaki AUV modellerinin direnç değerleri 108
Şekil 5.60 Gagalı balina modeli y+ dağılımı 108
Şekil 5.61 İspermeçet balinası modeli için y+ dağılımı 109
Şekil 5.62 Köpek balığı modeli için y+ dağılımı 109
Şekil 5.63 Yassı sırtlı deniz kaplumbağası modeli için y+ dağılımı 110
Şekil 5.64 Seçilen deniz canlılarının AUV modellerinin direnç değerleri 110
Şekil 5.65 AUV-4 modeli için y+ dağılımı 111
Şekil 5.66 AUV-5 modeli için y+ dağılımı 111
Şekil 5.67 AUV-6 modeli için y+ dağılımı 112
Şekil 5.68 AUV-7 modeli için y+ dağılımı 112
Şekil 5.69 Hibrit platform modeli için y+ dağılımı 112
Şekil 5.70 Hibrti formdaki AUV modellerinin direnç değerleri 113
Şekil 5.71 NACA-ASV modeli için y+ dağılımı 113
Şekil 5.72 Ponton-ASV modeli için y+ dağılımı 113
Şekil 5.73 ROV modellerinin direnç değerleri 114

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 5.1 SWATH formundaki modelin boyutları 62
Tablo 5.2 MERLIN ROV aracına ait temel özellikler 67
Tablo 5.3 Uygulanan ağ yapılarında elde edilen duvar fonksiyon değerleri y+ 84

KISALTMALAR

AUV	: Otonom Su Altı Aracı
ASV	: Otonom Deniz Yüzeyi Aracı
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
RANS	: Reynolds Ortalamalı Navier Stokes
ROV	: Kablo Kumandalı Su Altı Aracı
CDNSWC	: Carderock Bölümü Deniz Yüzey Harp Merkezi
HSMB	: Tracor Hydronautics Gemi Modeli Havuzu
SST k-ω	: Kayma Gerilmesi Taşınımı k-ω,
DARPA	: Savunma İleri Araştırma Projeleri Ajansı
STARCCM+	: Keyfi Bölgelerde Türbülanslı Akışın Simülasyonu Hesaplamalı Süreklilik Mekaniği, C++ tabanlı
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
SWATH	: Küçük Su Hattı Alanı İkiz Gövde
GM	: Metasantrik Yükseklik
LARS	: Fırlatma ve Kurtarma Sistemi
INS	: Ataletsel Navigasyon Sistemleri
GPS	: Küresel Konumlandırma Sistemi
LBL	: Uzun Temel Konumlandırma
SBL	: Kısa Temel Konumlandırma
DVL	: Doppler Hız Kayıt Cihazı
TAN	: Arazi Destekli Navigasyon
IMU	: Atalet Ölçüm Birimleri
GNC	: Yönlendirme, navigasyon ve Kontrol
NACA	: Ulusal Havacılık Danışma Komitesi

SEMBOLLER LİSTESİ

ρ : Akışkanın yoğunluğu

t : Zaman

v : Sürekli ortam hızı

τ : Viskoz gerilme

u : Sürekli ortam hızının bileşeni

P : Basınç

f : Bileşke kuvvet

μ : Viskozite

$\bar{u}$: Daimî ortalama hız

u' : Çalkantı bileşeni

μ_T : Türbülans viskozitesi

k : Türbülans kinetik enerjisi

ε : Türbülans yitim hızı

v_T : Girdap viskozitesi

C_μ : Viskozite sabiti

σ_k : Kinetik enerji sabiti

σ_ε : Türbülans yitim hızı sabiti

C_ε : Kinetik enerji sabiti ikinci sabiti

D : Yıkım terimi

P : Üretim terimi

C_μ : Viskozite sabiti

S_{ij} : Ortalama deformasyon oranı

U : Ortalama hız gradyeni

δ_{ij} : Kronecker deltasını

P_k : Türbülanslı kinetik enerjinin üretim hızı

β^* : Model sabiti

A_i^x : İzdüşüm alanı

S_φ : Kaynak terimi

a_P : Düğüm noktası sabiti

b : Düğüm noktası ikinci sabiti

R_T : Toplam direnç

η_D : Genel sevk verimi

$P_{service}$: Servis gücü

P_{max} : Maksimum güç

BÖLÜM BİR
GİRİŞ

1.1 Araştırma Konusunun Tanımlanması ve Önemi

Kıyı ve/veya açık deniz alanlarında, petrol ve doğal gaz kaynakları ile deniz altı boru hatlarında mühendislik projelerinin, kıyı ve/veya açık deniz alanlarında liman, açık deniz ve kıyı yapılarının vb. etüdünün yapılması ve gerçekleştirilmesinde araştırma gemilerinden yararlanılmaktadır. Zorunlu olan bu işlemler yoğun insan emeği gerektirir. Bununla birlikte, bu araştırma prosedürü, işletme maliyetlerini artırması ve ölçümlerin doğruluğunda sorunlara neden olması gibi sakıncaları içermektedir. Ayrıca deniz koşullarından dolayı araştırma sürelerinin uzaması yaygın bir durum olup, çetin hava koşullarında gerçekleştirilecek gemi seferleri, denizde hem can hem de mal güvenliği açısından yüksek riskler taşımaktadır. Bu nedenle, özellikle son yirmi yılda, üniversiteler ve araştırma toplulukları yoğun bir şekilde otonom su altı araçları (Autonomous Underwater Vehicle, AUV) geliştirmektedirler. AUV'ler, denizlerin ve okyanusların derinliklerinde yerinde ayrıntılı oşinografik, jeolojik, jeofizik ve sismik verileri ölçmek ve toplamak için önemli fırsatlar sunmaktadır (Gürsel vd., 2017).

Otonom su altı araçlarından beklenen performans ve gereksinimlere göre, düşük viskozite direnci, yüksek itki verimliliği ve ardından yüksek manevra kabiliyeti ve seyir kabiliyeti en önemli tasarım özellikleri olarak sıralanabilir. Bu kapsamda sevk sisteminin verimini artırmak için AUV'lerin formları üzerinde hidrodinamik iyileştirmeler yapılmaktadır. Bir AUV'nin çalışma rotasını ve çalışma süresini belirleyen en önemli faktör, enerji kapasitesi olduğu için bu enerji gereksinimine göre gövde direncinin tam olarak tahmin edilmesi büyük önem taşır. Güç gereksinimini doğru bir şekilde tahmin edebilmek için gövde direncinin tasarım aşamasında dikkatli ve ayrıntılı bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir (Gürsel vd., 2017) Araçların formu ve konumu, AUV'lerin su altı operasyonlarında ihtiyaç duyduğu enerjiyi belirlemektedir, çünkü AUV'lerin operasyonlar sırasında

harcadıkları enerji, araçların ileri hareketi ve manevralar sırasında ve derinliklerini sabitlerken tüketilmektedir.

Gövde direnci, itme verimliliği ve diğer hidrodinamik özellikler açısından farklı AUV'lerin tasarımı, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Myring'in (1976) çalışmasında, çeşitli gövde formları için elde edilen sayısal analiz sonuçlarını doğrulamak için Royal Aviation Association'ın verilerinden yararlanılmıştır. Bu araştırmada eksenel simetrik akışa maruz kalan gövde formunun direncini belirlemek için bir yöntem geliştirilmiştir (Gürsel et al., 2017). Bu yöntemin uygulanabilmesi için form geometrisi, akış koşulları ve geçiş noktaları gibi kritik parametrelerin itina ile belirlenmesi gerekmektedir.

Joubert (2004), çalışmasında denizaltıların gelişmiş hidrodinamik özelliklerinin ilkelerini tartışmıştır. Pasif sonarın performansını çalışma hızlarına kadar iyileştirecek yeni bir geometrik form tanıtılmış ve diğer önemli direnç kaynaklarının azaltılabileceği gösterilmiştir. Bertram (2011) ise denizaltılar ve takıntıları ile ilgili tasarım problemlerine ve çözüm yaklaşımlarına ilişkin genel ilkeleri açıklamıştır.

Madhan vd. (2006), torpido şeklindeki su altı aracı MAYA'nın hidrodinamik gövde tasarımını, direnç ve tahrik özellikleri ile test sonuçlarını ayrıntılı olarak incelemiştir. Joung, Sammut, He ve Lee (2009), tasarım aşamasındaki bir AUV'ye ait form direncini tahmin etmek amacıyla HAD simülasyonlarını kullanmıştır. AUV gövde profilinin optimizasyonu da bu çalışmada toplam direnci azaltmak için tartışılmıştır.

Husaini, Samad ve Arshad (2009), HAD metodolojisini kullanarak AUV'lerin direnç kuvvetinin davranışını incelemiştir. Direnç kuvvetlerinin değişimini araştırmak için gruplar halinde çalıştırılan AUV'lerin iki farklı çalışma konumu seçilmiştir. Araştırma, önde hareket eden AUV'nin arkasındaki mesafenin, tandem halinde hareket eden aracın direnç kuvveti üzerinde fazla bir etkisinin olmadığını, ancak bu kuvvet için konum düzenlemesinin önemli olduğunu göstermiştir.

Karim, Rahman ve Alim (2008), viskoz dirençlerini belirlemek için Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemlerine dayanan sonlu hacim yöntemiyle DREA adlı bir AUV model serisi üzerinde sayısal analizler yapmışlardır. Model serisi, uzunluk/çap oranı 4 ile 10 arasında olan, eksenel simetrik altı gövdeden oluşmuştur. Çalışmada, gövdelerin etrafındaki ve arkasındaki türbülanslı akışlar, Kayma Gerilmesi Taşınımı k-ω türbülans modeli kullanılarak incelenmiştir. Benzer şekilde, tipik bir Myring formuna sahip AUV'lerde HAD yöntemi aracılığıyla direnç hesaplamalarında kullanılacak uygun türbülans modelleri Song, Zhang, Wu ve Le Wang (2011) tarafından belirlenmiştir. Çalışmalarında farklı AUV modellerinin üç boyutlu viskoz akışının direnç analizi yapılmıştır. Yazarlar, Kayma Gerilmesi Taşınımı k-ω türbülans modelinin, uygulanacak direnç tahmin yöntemi için en uygun algoritma olduğu sonucuna varmışlardır.

Geliştirilmekte olan bir AUV'nin verilen belirli bir hız aralığında gövde direncini belirlemek için HAD analizi kullanan bir prosedür Joung, Sammut, He ve Lee (2012) tarafından tasvir edilmiştir. Yürütülen bu HAD analizinin sonuçları, AUV gövdesi ve pervanesi üzerindeki hız ve basınç alanı vb. dağılımını kapsamaktadır. Ek olarak, AUV'nin maruz kalacağı toplam direnci azaltmak amacıyla AUV profilini optimize etmek için bir yöntem önerilmiştir.

Allotta vd. (2015) bir projede geliştirilmekte olan bir AUV'nin, bu AUV'nin performans ve görev tanımının gerektirdiği özelliklere göre, uzaktan kablo kumandalı aracın (Remotely Controlled Vehicle, ROV) tipik özelliklerine de sahip olması gerektiğini vurgulamıştır. Araç, bir ROV'un yüksek manevra kabiliyeti gibi tipik özelliklere sahip olmalıdır. Birlikte yürütülen ileri arama ve gözetleme görevleri, araç filolarının kullanımı ve kontrolü, karşılıklı lokasyon belirleme ve araçlar arasındaki iletişimin optimizasyonu yapılacak temel görevlerdir. Bu çalışma, ağırlıklı olarak, aracın deniz test faaliyetleri öncesinde farklı tasarım aşamalarında laboratuvarda gerçekleştirilen ön simülasyon ve test sonuçlarından elde edilen verileri ele almaktadır. Allotta vd. (2020) AUV'leri tasarlamak için benimsenen metodolojilere odaklanmıştır. Ek olarak, çalışma, bu araçlar için ön tasarım kriterlerini ve tasarım prosedürlerinin yanı sıra tahrik sistemlerinin testini de

içermiştir. Bu bağlamda THESAURUS projesi için geliştirilen araç formu örneğinde bir AUV'nin kesinlikle düşük viskozite direnci ve yüksek manevra kabiliyeti ile seyir kabiliyeti gibi özelliklere sahip olması gerekliliği vurgulanmıştır.

Won, Kim ve Kim (2015), HAD simülasyonlarını kullanarak çeşitli AUV formlarının optimum form parametrelerini belirlemeye çalışmışlardır. Çalışmaları, tahrik sistemlerinin verimliliğini artırmak için AUV'lerin direnç kuvvetini ve pervane performansını etkileyen çeşitli faktörleri incelemeye odaklanmıştır. Ayrıca HAD analizlerinin performansını artırmak amacıyla Taguchi yöntemi kullanılmıştır.

Sousa, Macedo, Junior ve Lima (2014), enerji tüketimini önemli ölçüde azaltan ve böylece çalışma sırasında etkinliği artıran en iyi gövde geometrisini elde etmek için bir AUV gövdesinin farklı geometrik konfigürasyonlarındaki türbülanslı akışını analiz etmeyi amaçlamıştır. Analiz edilen geometrik parametreler ile sürtünme katsayısı arasında bir ilişki elde edilmiştir.

1998'de Liu ve Huang, Carderock Division Naval Surface Warfare Center (CDNSWC) ve Tracor Hydronautics Ship Model Basin (HSMB) tesislerinde gerçekleştirilen, eklentileri olan ve olmayan eksenel olarak simetrik bir gövde etrafındaki akış alanlarının kapsamlı deneysel ölçümlerini özetlemişlerdir. HAD yöntemiyle diğer denizaltılar ile ilgili akış alanı analizlerinin doğrulanması için gereken deneysel veriler üretilmiştir. Bu nedenle çok sayıda bilimsel makale ve raporda bu veri tabanına başvurulmuştur.

Budak ve Beji (2016) çalışmalarında, Ansys-Fluent ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği kodunun kayma gerilmesi taşınımı SST k-ω türbülans modelini kullanarak DARPA (The Defense Advanced Research Projects Agency) SUBOFF denizaltısının takıntısız gövde formunun ve bu formdan türetilen çeşitli varyantların direnç değerlerini araştırmışlardır. DARPA SUBOFF denizaltı modeli kullanılarak Reynolds Ortalamalı Navier Stokes Denklemleri (Reynolds Averaged Navier Stokes Equations, RANS) yardımıyla gerekli hesaplamalar yapılmış ve daha sonra elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. DARPA SUBOFF takıntısız

gövdesine dayalı olarak farklı üç baş ve üç kıç geometrisi oluşturulmuş ve bu yeni baş ve kıç modellerinden toplam dokuz yeni denizaltı formu elde edilmiştir. Son olarak, yeni oluşturulan geometrik denizaltı varyantları için sayısal direnç hesaplamaları yapılmıştır. Sonuçlar, form varyantlarından birinin en düşük dirence sahip olduğunu ve genel bir modelden bir form ailesi oluşturarak önerilen yaklaşım ile düşük viskoz dirençli başarılı bir form elde edilebileceği gösterilmiştir.

Ayrıntılı bir örnek olarak, Takahashi ve Sahoo (2019), doğrulama için deneysel verilerinin mevcudiyeti nedeniyle DARPA SUBOFF modelini bir kıyaslama aracı olarak incelemişlerdir. Yazarlar, araca etkiyen viskoz direncin, diğer kuvvetlerin ve sabit ötelemede gövdeye uygulanan momentin analizini yaparak deney sonuçlarını doğrulamışlardır. Yayınlanan metodoloji ve prosedüre uygun olarak model ölçeğinde farklı hızlarda çeşitli konfigürasyonlar incelenmiştir.

Primrose (2020) kitabında tasarım aracı olarak biyomimikriyi ele almış ve farklı bilim alanlarına uygulamalarını ayrıntılı olarak açıklamıştır.

Bu çalışmada, denizde 1.000 m derinliğe kadar ulaşabilen ve maksimum 10 kn hızla seyredebilen, mümkün olan en düşük viskoz direnci sağlayan, denizde oşinografik, jeomorfolojik, jeolojik ve jeofizik araştırmalar yapabilecek otonom bir sualtı aracı formunun geliştirilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçların, Liu ve Huang'ın (1998) çalışmasıyla uyumlu olduğu görülmüştür. Bu çalışmadaki analizler, ticari STAR CCM+ yazılımından yararlanılarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra Myring formu aracılığıyla ve biyomimikri yöntemiyle çeşitli AUV formları oluşturulmuştur. Oluşturulan tüm formlar aynı koşullar altında sayısal olarak analiz edilerek en uygun formun belirlenmesi sağlanmıştır.

Genel olarak, bir AUV'nin seyir menzili batarya kapasitesini belirler ve bunun tersi de geçerlidir. Çalışma derinliği, AUV'lerin yapısal dayanımı ile sınırlı iken, cihaz seti ve çeşitli sensörler ile ekipman, iç hacmi belirler. Bir AUV'nin formunu belirlemek için kullanılan birçok farklı yöntem vardır. Bunlardan en etkilisi, hiç kuşkusuz, prensip olarak, üretilmiş AUV'lerin ve/veya inşa edilmiş denizaltıların test

sonuçlarının dizayn sürecindeki analizlerin validasyonu için kullanılmasıdır. Joubert'in (2004) kitabında ifade ettiği gibi, gelecekteki herhangi bir denizaltının tasarım değişikliğinde geçmiş bilimsel çalışmaları ihmal etmek ciddi bir hata olur. Bu anlamda, biyomimikri, bir tasarım sürecini tamamlamak için alternatif ve etkili bir seçenek olarak ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışmada, uygun bir AUV formu geliştirmek için biyomimikri/biyomimetik yönteminden belirli oranda yararlanılmıştır. Biyomimikri yönteminin temeli, doğada hayatta kalmak için çözümler üreten hayvan, bitki ve diğer organizmaların oluşturduğu çözüm yöntemlerinden ilham almaktır. Bu yöntem, bu çalışmada insansız ve/veya otonom su altı aracı için form tasarımına uygulanmıştır. Ancak tasarım ve üretimin neredeyse her aşamasında etkili çözümler elde edilebilir. Doğayı taklit etme kavramı, yalnızca doğal modelleri değil, aynı zamanda doğal sistemleri, oluşum süreçlerini ve bileşenlerini de araştıran, gelişmekte olan bir çalışma alanı olarak kurulmuştur. Bu disiplin, edindiği içgörülerden ilham alarak çok çeşitli sorunlara çözüm üretme potansiyeline sahiptir (Benyus, 1997). Buna karşılık, kökleri biyomorfizme ve doğrudan kullanıma dayanan tasarımlar, genellikle insanların doğal formlarla etkileşiminden kaynaklanan estetik veya pratikliğe öncelik verir.

Doğanın organizmalarında ve sistemlerinde zorluklara karşı bulunan işlevsel çözümlerin temeli, bunların evrimsel süreç boyunca adaptasyonunda yatmaktadır. Bu süreç, kasıtlı ve bilinçli tasarımın olmaması ile karakterize edilir; bunun yerine başarılı varyasyonlar, avantajlı işlevlerini birbirini izleyen nesillere aktararak doğal seçilim yoluyla varlığını sürdürür. Dolayısıyla evrim, sanılanın aksine her zaman doğrudan "gelişme" anlamına gelmez. Esasen evrim, mutasyonların bir dizi varyasyona yol açtığı bir mekanizma olarak işlev görür, ancak yalnızca işlevsel olarak başarılı bireyler doğal seçilim tarafından tercih edilir. Biyomimikri ile dizayn sürecinde diğer tasarım süreçlerine benzer bir dizayn spirali oluşturmak mümkündür.

Bazı kaynaklar biyomimikri ve biyomimetik kavramlarını ayrı ayrı ele alır. Biyomimikri, biyomimetik alanından etkilenir. Her ikisinin de kullandığı terimler,

tanımlar ve araçlar benzerdir fakat biyomimikri bir tasarım konsepti olarak kullanılır (Kuday, 2009).

1.2 Araştırmanın Amacı ve Hedefleri

Bu çalışmada, insansız ve/veya otonom su altı araçlarının hidrodinamik verimliliğini artırmak için bir biyomimikri tasarım stratejisi kullanılmıştır. Yaklaşım, tasarımın amaçlanan işlevselliği ile uyumlu hale getirilmesini ve çeşitli deniz organizmalarının şekillerinin değerlendirilmesini içermektedir. Bu şekilde formüle edilen tüm tasarımlar için Computer Aided Design (CAD) modelleri oluşturulmuştur. Bu modeller üzerinde hidrodinamik analizler yapılmış ve sonuçların kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesinin ardından, otonom su altı aracının optimize edilmiş formu belirlenmiştir.

Tasarlanacak bir AUV, ROV gibi yüksek manevra kabiliyetine sahip olmalı ve bir AUV'nin tipik özelliklerini korumalıdır (Allotta vd., 2015). Viskoz bir sıvıya batırılmış hareketli nesneler, iki bileşenden oluşan viskoz dirence maruz kalır: Her ikisi de Reynolds sayısına bağlı olan viskoz basınç ve sürtünme direnci bileşenleridir. Bu nedenle, hem sürtünme hem de viskoz basınç dirençlerine maruz kalan otonom su altı araçları, uygun hidrodinamik form ve yüzey özelliklerine sahip olmalıdır. Ayrıca bu araçlar, derin sularda görevlerine bağlı olarak kendi yapıları vasıtasıyla yüksek hidrostatik basınç kuvvetlerine dayanmak zorundadır.

Denizel araştırmalar, yerinde ölçüm, tarama ve gözlem için çok çeşitli özel araç ve ekipmanın kullanılmasını gerektirmektedir (Taner ve Gürsel, 2021). Denizlerdeki doğal kaynakların keşfi sırasında yüksek çözünürlüklü görüntüler elde etmek, deniz tabanına yakın tarama için sonar cihazlarının kullanılmasını zorunlu kılar. Genellikle ölçüm araçlarının önemli derinliklere konuşlandırılması gerekir. Ayrıca, 15 metreden uzun araştırma gemilerinin kullanımına olanak sağlamayan sığ sularda, kapsamlı yüzey ve deniz tabanı araştırma çabaları için artan bir gereklilik vardır. Bu nedenle, Şekil 1.1'de görülen ve tam boyları 19m ile 37m arasında değişen Dokuz Eylül Üniversitesi Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü'ne ait nitelikli araştırma

gemilerinin dahi zaman zaman çevresel koşullar ve riskler nedeniyle çalışmaları aksayabilmektedir (DEU-İMST, 2023). Bu noktada otonom yüzey aracı (Autonomous Surface Vehicles, ASV), otonom su altı aracı (Autonomous Underwater Vehicles, AUV) ve uzaktan kablo kumandalı araçların (Remotely Operated Vehicles, ROV) kullanılma zorunluluğu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 1.1 DEÜ Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü'ne ait araştırma gemileri; soldan sağa Koca Piri Reis , Dokuz Eylül 4 , Dokuz Eylül 1 ve Dokuz Eylül 3

Son yıllarda otonom yüzey ve su altı araçlarının gelişiminde dikkat çekici bir ivmelenme gözlenmektedir., Bu araçlardan aşağıdaki sivil alanlarda yararlanılması uygulamaları yaygınlaşmıştır:

- Arama, kurtarma, çalışmaları,
- Oşinografik çalışmalar,
- Biyoçeşitlilik araştırmaları
- Dalga ve akıntıdan faydalanacak enerji santralleri kurulumu,
- Batimetri çalışmaları,
- Korozyon ve katodik ölçümler,
- Su altı arkeolojisi araştırmaları,
- Gemi bordası, pervanesi ve dümenlerin sörveyi,
- Balık çiftliklerinin bakım tutumu,

Bu alanlarda yapılan çalışmaları zorlaştıran temel unsurlar ise aşağıdaki gibi sıralanabilir:

i Denizel ortamdaki çevresel koşulların ağır olması, yani rüzgâr ve dalgaların oluşturduğu yüklerin çok yüksek değerlere ulaşması,

ii. Deniz altındaki basınç ve korozyonun etkisinden dolayı kullanılan malzemelerin dayanım ve yorulma sınırlarının çok yüksek olması zorunluluğu,

iii. Deniz suyunun elektromanyetik dalgalar açısından çok sınırlı ölçüde geçirgen olması ve bu durumun haberleşme/iletişim imkânlarını kısıtlaması.

Bu nedenle mukavemet sınırları çok yüksek olan kaliteli malzeme ile tasarım ve konstrüksiyon, sonar ile haberleşme zorunluluğu, otonom olarak araçların deniz altında gerçekleştireceği görevler için gerekli enerjiyi depolama ve tasarruflu kullanma gerekliliği, su altında çalışabilecek araçların kablosuz olarak tasarımını zorlaştırmaktadır.

Yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı, bu araçların genel olarak yurdumuzda kullanılmaları, özellikle de ticari olarak tasarlanıp üretilmeleri çok sınırlı bir kapsamda gerçekleştirilmektedir. Diğer yandan su üstü araçları ele alındığında, belirli araştırma projeleri kapsamında tasarlanıp üretilmeleri söz konusu olmuştur (Gürsel ve Taner, 2019).

ROV ile AUV tasarımı ve üretimi ise üniversitelerimizle TÜBİTAK ve Savunma Sanayii Başkanlığı'nın desteği aracılığıyla belirli projeler kapsamında gerçekleştirilmiştir. Genel olarak bu tip deniz araçlarını konu alan yayınlarda ayrıntılara yer verilmemektedir.

Ayrıca, bilimsel deniz araştırmaları dışında askeri gözlem, istihbarat ve savunma odaklı olarak tüm bu sistemlerin yurdumuzda akademik ve teknik kadrolar tarafından geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Çünkü bu kapsamda yurtdışında üretilen deniz araçlarına ilişkin tasarım ve işletme tecrübeleri askeri ve/veya ticari nedenlerle tamamıyla gizli tutulmaktadır. Sonuç olarak;

- Araştırma gemilerinin operasyonel kısıtlamalarla karşılaştığı aşırı sığ sularda, kapsamlı deniz araştırmalarının hem su yüzeyinden hem de deniz tabanından yürütülmesi zorunludur.

- Hem yüzey, hem de çok sığ ve derin su ile deniz dibi ve yer kabuğu araştırmalarını bağımsız olarak sürdürecek ve ek olarak da gemileri destekleyecek ve gemilerin de bu deniz aracını destekleyerek sürdüreceği çok kapsamlı projelerde görev alacak şekilde modüler otonom ve gerektiğinde uzaktan kablo kumandalı bir deniz aracının tasarlanarak imali, ülkemizde deniz araştırmaları sürdüren tüm kurumların gereksinim duyduğu, düşük maliyetli bir araştırma platformunun elde edilmesini sağlayacaktır. Şu ana kadar bu tip tasarıma ve özelliklere sahip bir deniz aracı üretilmemiştir.

- Özellikle deniz dibi araştırmaları için tasarlanmış otonom su altı araştırma araçları önemli bir ticari değere sahip olup, üretimleri birkaç ülke ile sınırlıdır. Askeri veya ticari nedenlerle, bu araçlarla ilgili kapsamlı bilgiler nadiren açıklanır. Bu özelliklerin ötesinde, bu araçlar aynı zamanda istihbarat, savunma veya saldırı işlevlerine de hizmet edebilir ve bu nedenle çok çeşitli uygulamalar için potansiyel sunar.

Söz konusu farklı dört denizel ortam için, yani hem çok sığ su ve hem de derin denizlerde su üstü ve su altı deniz ve deniz dibi araştırmaları için çözüm geliştirecek şekilde bir aracın, kompakt-modüler, insansız ve gerektiğinde uzaktan kablo kumandalı bir deniz aracı olarak tasarlanması gerekmektedir.

1.3 Araştırmanın Yöntemi

Bu çalışmada tasarlanan insansız deniz aracının öncelikle İzmir Körfezi ve yakın çevresi gibi sığ bölgelerde gerçekleştirilecek batimetri ölçümleri, sonar ile dip tarama, deniz katmanlarını tarama, sismik ölçümler ve örnek alımları vb. ölçümleri yapacak kapasiteye sahip, hem su üstü ve hem de su altında çalışacak niteliklerde

olması amaçlanmıştır. Bu amaçla literatür analizine ek olarak izlenecek çözüm yönteminde form tasarımı çok geniş bir yer tutacaktır.

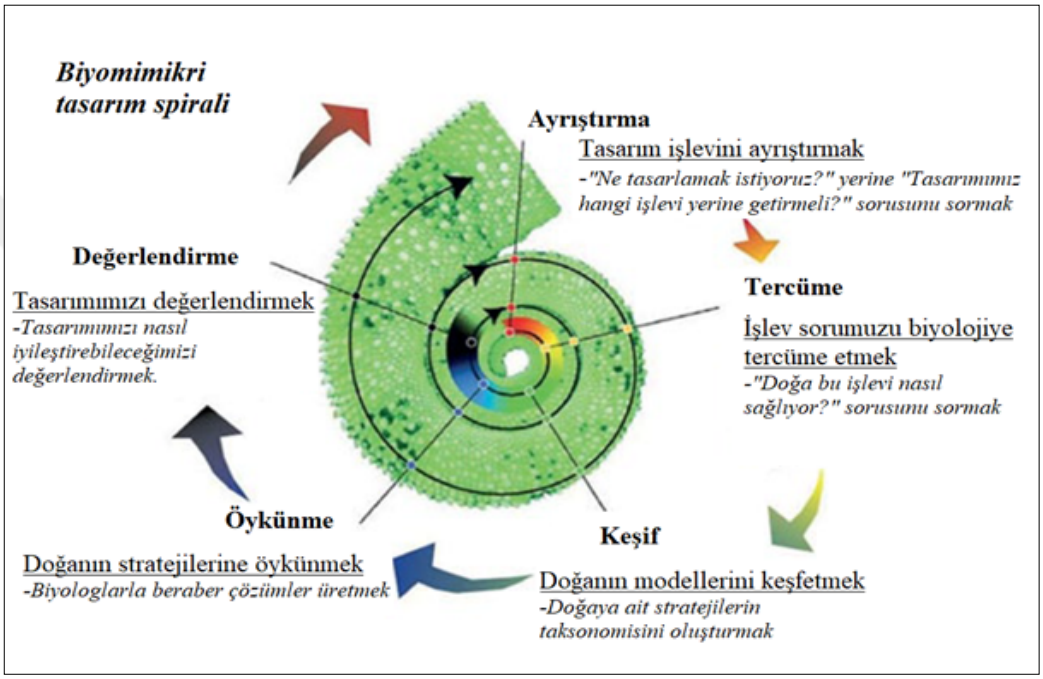
Tezin hazırlıkları aşamasında, bir SWATH gemi modelinin HAD analizi ve bu analizlerle bulunan sonuçların, Begovic, Bertorello ve Mancini (2015) tarafından gerçekleştirilen özdeş SWATH modelinin çekme tankı deney sonuçlarıyla doğrulanması hakkında kapsamlı bir araştırma gerçekleştirilmiştir. STAR-CCM+ yazılımı kullanılarak yapılan simülasyonların, deney sonuçlarıyla başarılı bir şekilde doğrulaması gerçekleştirildikten sonra, tasarımlara yönelik analizlere geçilmiştir.

İki yandan taramalı sonar ve tek ışınlı ses üreticisi ile benzeri batimetri ölçümleri yapabilecek cihazların monte edileceği prototip bir deniz aracı tasarlanmıştır. Bu sistemler, jeolojik ve jeofizik araştırmaları yapmak için kullanılacaktır. Araç karasal bir istasyondan izlenecek, ancak sinyalleri sadece karasal istasyona bağlı kalmak yerine ana gemide bulunan bir veri toplama istasyonuna da iletebilecektir. Tez boyunca deniz aracının gövde tipi tasarımı ve form yapısı ile ilgili detaylı tartışmalar yapılmıştır. Bu tartışmalar, optimum stabilite, hidrodinamik direnç ve tahrik gibi hususları dikkate almıştır. Tasarım sürecine yardımcı olmak için sistematik ön HAD analizleri yapılmıştır. Bu analizler, tek gövdeli deplasman teknesi, çift cidarlı katamaran ve entegre özelliklere sahip farklı form tasarımlarına dayanmaktadır.

Yukarıda belirtilen su altı araçları için Myring (1976) formuna ve torpidoya benzeyen AUV gövdeleri tasarlanmıştır. Daha sonra ispermeçet balinasının (*Physeter Macrocephalus*) formunun örnek alındığı biyotaklit yaklaşımı uygulanmıştır. Ek olarak, gagalı balina (*Ziphius Cavirostris*) ve beyaz köpek balığından (*Carcharodon Carcharias*) yararlanılarak hibrit formlar oluşturulmuştur. Ayrıca ROV görevi yapacak su altı aracının üst modülü, düz sırtlı deniz kaplumbağası (*Natator depressa*) formuna göre modellenmiştir. Bu deniz canlılarının iyi birer yüzücü oldukları ve dalma derinliklerinin 1000 m'den fazla olduğu bilinmektedir (Naughton, 2012).

Biyomimikriyi araştırmasında açıklayan Benyus (1997), insanın, problemlerinin çözümünde bazen esinlenmek veya kopyalamak suretiyle doğal sistemleri ve

süreçleri inceleyip, bunun sonucunda yeni çözümler veya ipuçlarını bulup geliştirdiğini ifade etmektedir. Biyomimikriye ait tasarım spirali Şekil 1.2'de gösterilmiştir (Primrose, 2020). Tasarlanan tüm formlar için CAD modelleri oluşturulmuştur. Kapsamlı hidrodinamik analizler yapılmış ve sonuçların değerlendirilmesinin ardından, optimum özelliklere sahip olan kablo kontrollü su altı aracı ile birlikte modüler su altı ve su üstü araçlarının nihai formları belirlenmiştir.



Şekil 1.2 Biyomimikri tasarım spirali

Tasarlanan modüler Otonom Yüzey ve Su Altı Deniz Aracının sonlu hacimler metodu tabanlı Star CCM+ yazılımı yardımıyla hesaplamalı akışkanlar dinamiği tekniğiyle hidrodinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Görevleri ve görev bölgeleri ile ekipmanları göz önünde bulundurulduktan sonra, tüm modüllerin ayrı ayrı ana boyutları ve formları belirlenmiş, Ansys-Spaceclaim yazılımı yardımıyla üç boyutlu modelleri oluşturulmuştur. Böylelikle modüllerin iç hacimleri, sephiyeleri, ağırlık ve ağırlık merkezleri ile yüzme merkezleri, ıslak alanları, enkesit ve su hattı alanları ile blok ve prizmatik katsayıları, kütlesi ve su hattı alan atalet momentleri gibi temel parametreleri belirlenmiştir. Analizlerde kullanılacak HAD yönteminin formülasyonu ve türbülans modelinin seçimi konusunda ayrıntılı olarak açıklanacak olan SST k-w türbülans modelinden yararlanılmıştır. Bu analizlerin sonucunda

toplam direnç değerleri ile ıslak yüzeyler yani sephiye elemanı, dikmeler ve platform çevresindeki akış hız alanları, basınç dağılımı, türbülans viskozitesi dağılımı elde edilmiştir. Bu veriler sevk sisteminin tasarımı, takıntıların ve dikmelerin yerleşimi ile formlarının belirlenmesinde etkili olan temel hidrodinamik parametrelerdir. Gerçekleştirilen bu analizler sonucunda operasyon hızlarına göre toplam motor gücü ile enerji tüketimini ve bu saptamaların sonucunda da (motor gücü ile birlikte motor ve batarya ağırlığı değiştiğinden) deniz aracının nihai ağırlığını ve ağırlık merkezinin yerini en doğru bir şekilde belirlemek mümkün olacaktır.

Ana boyutlar ile yerleştirilecek ekipmanların boyutları ve ağırlıkları sürekli olarak "tasarla-kontrol et- iyileştir- kontrol et" döngüsü içinde analiz edilerek nihai tasarıma geçilmiş ve Star-CCM+ yazılımı ile hidrodinamik analizler tüm modüller için optimal değerler elde edilene kadar yinelenmiştir.

1.3.1 Araç Tipi Seçimi ve Ön Tasarım

Tasarım sürecinde öncelikle İzmir Körfezi ve yakın çevresi gibi çok sığ bölgelerde gerçekleştirilecek batimetri ölçümleri, sonar ile dip tarama, deniz tabanı katmanlarını tarama, sismik ölçümler ve deniz suyundan örnek alımları vb. ölçümleri yapacak kapasiteye sahip, hem su üstü ve hem de su altında çalışacak şekilde (insansız) otonom bir deniz aracının tasarımı amaçlanmıştır. Bu amaçla literatür analizlerine paralel olarak izlenecek çözüm yönteminde form tasarımı çok geniş bir yer tutmuştur.

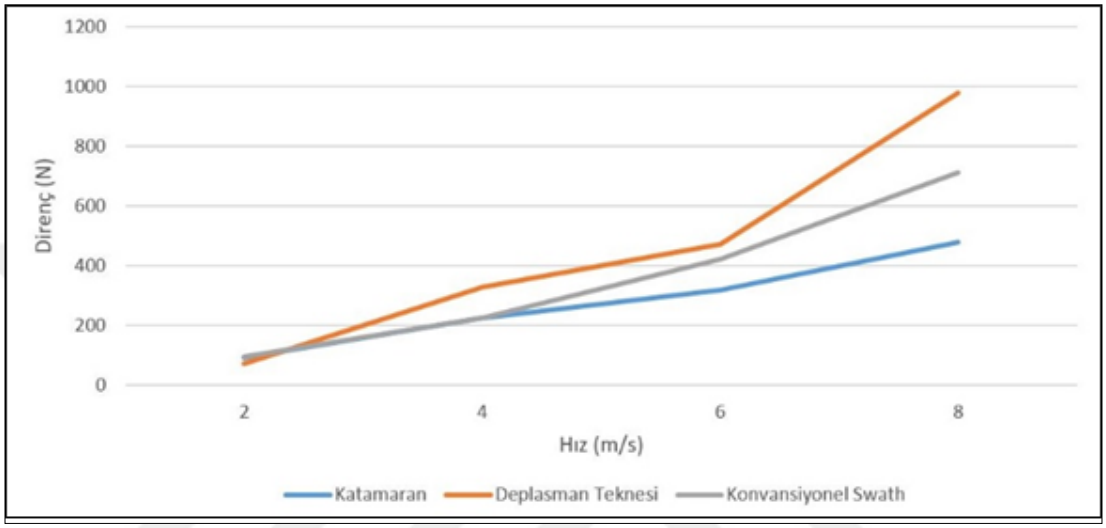
Otonom deniz aracının yürüteceği görevler, operasyon alanları ve taşıyacağı donanım dikkate alındığında optimum uzunluğun 1800 ila 3000 milimetre aralığında olabileceği tespit edilmiştir. Ayrıca, operasyon hızının saatte 5 ila 18 m/s arasında olması gerekmektedir. Bu boyuttaki bir araç için genişlik, su çekimi, C_B blok katsayısı ve derinlik gibi boyutlar, tek gövdeli deplasman teknesi, çift gövdeli katamaran veya SWATH olması durumuna bağlı olarak önemli farklılıklar gösterir. Tasarım aşamasında, aracın nihai form yapısı, tüm bu deniz araç tiplerinin kapsamlı bir şekilde incelenmesi ve analizlerinin ardından belirlenir.

Bununla birlikte, bu aşamada en önemli tasarım önceliği, gövdenin enine stabilitesi ve hidrodinamik direnci ile ilgilidir. Artırılmış stabilite elde etmek için, tasarım sürecinde bir teknenin genişliği artırılmalıdır. Bununla birlikte, teknenin genişliğini artırmak, direnci de önemli ölçüde artırır ve eşdeğer operasyonel hızları sürdürmek için daha fazla motor gücü gerektirir. Sonuç olarak, bu, artan maliyetler ve çalışma sürelerinde sınırlamalar nedeniyle daha büyük akülerin kullanımını gerektirir. Bu bağlamda ilk optimum tasarım seçimi olarak bir katamaran veya SWATH tekne kararlaştırılmıştır. Bu seçim, artırılmış enine stabiliteye, azaltılmış motor gücü gereksinimlerine ve geniş bir güverte alanına öncelik verir. Kuşkusuz bu tekne türlerinin yapımı, deplasmanlı teknelere göre nispeten daha yüksek maliyetler gerektirmektedir (Gürsel ve Taner, 2019).

Begovic, Bertorello ve Mancini (2015) tarafından, bir SWATH gemi modelinin HAD analizi ve daha sonra bu analizlerde elde edilen sonuçların çekme tankı deneyleriyle doğrulanması hakkında kapsamlı bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Özdeş SWATH tekne modeli ile ANSYS / FLUENT yazılımı kullanılarak yapılan simülasyonların bu deney sonuçlarıyla başarılı bir şekilde doğrulaması gerçekleştirildikten sonra, tasarımlara yönelik ön analizlere geçilmiştir.

Bu çalışma kapsamında tasarlanacak prototip bir deniz aracına, jeolojik ve jeofiziksel araştırmalar için gerekli ölçüm cihazlarının monte edilerek, gözlem verilerinin gerçek zamanlı olarak karasal bir istasyondan veya bir gemiden izlenmesi planlanmaktadır. Deniz aracı, uygun tasarım ve donanım ile hem su yüzeyinden hem de deniz dibine yakın noktalardan deniz dibinin ve yerkabuğu katmanlarının üç boyutlu jeolojik ve jeofizik yapısını yüksek çözünürlükte saptayacak ve haritalarını hazırlayacak, deniz yapılarının inşaat ve işletme aşamalarında gerekli kıyı ve deniz araştırmalarını gerçekleştirecek yeteneklere sahip olmalıdır. Bu doğrultuda yapılacak analizlerde, ana hatlarıyla aracın optimum stabilitesi ile hidrodinamik direncini ve sevkini içerecek şekilde ayrıntılı olarak gövde tipi ve form yapısının tasarımı ele alınmıştır.

Modüler özelliklere sahip olacak deniz aracının tek gövdeli deplasman teknesi, çift gövdeli katamaran veya SWATH tekne olması durumlarına göre uygun form tasarımına dayalı olarak sistematik ön HAD analizleri gerçekleştirilmiş ve literatürdeki deneysel sonuçlar kullanılarak, elde edilen analiz sonuçları doğrulanmıştır



Şekil 1.3 Farklı tip tekneler için yapılan direnç analizi sonuçları

Yukarıda belirtilen tekne/araç boyu ve form tipleri göz önünde bulundurulduğunda malzeme seçim sürecinde dikkate alınması gereken özellikler aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

i. Kontrol-iletişim, ölçüm ve tarama sistemlerinin hassasiyeti nedeniyle düşük manyetik özellik,
ii. Hafiflik ve dayanım,
iii. Su geçirmezlik;
iv. Yerli kaynaklardan ve kolay temin edilebilirlik,
v. Kolay şekil alabilirlik ve üretilebilirlik,
vi. Uygun maliyet bileşenleri,
vii. Denizel organizmalara karşı dayanım,
viii. Çevresel yaşlanma koşullarına dayanıklılık.

Genel olarak 1,8-3,0 m boyunda, narin bir forma sahip bir aracın yapımında bu kriterler göz önünde bulundurularak kullanılabilecek malzemeler sırasıyla, alüminyum alaşımları, titanyum alaşımları ve karbon fiber destekli polimer kompozit malzemelerdir.

Çalışmanın hazırlık aşamasında gerçekleştirilen analizlerin sonuçları ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Bunun sonucunda kompakt, modüler ve çok fonksiyonlu (AUV, ASV, ROV) konstrüksiyon yapısına sahip tasarım fikri netlik kazandığından, ve Şekil 1.3'te verilen toplam direnç değerleri incelendiğinde katamaran benzeri tekne elemanlarının formuna ve genel yapısına karar verilmiştir.

1.3.2. Otonom Su Altı Aracının (AUV) Tasarlanması

Çalışmanın ikinci bölümü; çevre denizlerimizde, deniz dibi ve deniz tabanı katmanlarını tarayıp jeolojik ve jeofiziksel araştırmalar için görüntüler alacak, deniz dibinde sismik ölçümler, akıntı vb. ölçümler ile haritalama yapacak kapasiteye sahip bir AUV tasarımını içermektedir. Sinyallerin, bir ana gemiye yerleştirilmiş veri toplama istasyonuna iletilmesi gerekmektedir.

Bu doğrultuda, AUV olarak kullanılacak bu araç formu için, farklı torpido formları ile biyomimikri metodolojisinden yararlanılarak, 3000 m derine dalabilen yüksek omurgalı deniz canlılarına ait formların sistematik olarak nümerik analizleri gerçekleştirilmiş ve literatürdeki deneysel sonuçlar kullanarak, elde edilen sonuçları doğrulamak izlenen temel yöntem olmuştur. Çevre denizlerimizin oşinografik özellikleri ile deniz dip yapısının jeolojik ve jeofizik yönlerinin ve deniz taban katmanları arasındaki maden rezervlerinin araştırılması için uygun bir AUV tasarlanmıştır. Hedef, AUV'den bu görevlerin gerçekleşmesi için yararlanmak ve ilgili prototipin ROV'a dönüştürülmesini sağlayacak uygun özelliklere sahip olacak şekilde tasarlamaktır. STAR CCM+ yazılımı kullanılarak yapılan simülasyonların başarılı bir şekilde doğrulaması gerçekleştirildikten sonra, 3000 m derinliğe dalma ve hızlı yüzme kapasitesine sahip bir gagalı balina (*Ziphius Cavirostris*), bir ispermeçet (*Kaşalot*) balinası (*Physeter Macrocephalus*), beyaz köpek balığı (*Carcharodon*

Carcharias) ve aynı zamanda farklı tip torpido formuna sahip / torpido formuna benzer modeller aynı sınır koşullarında analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında tüm formlar gözden geçirilmiş ve yeterli iç hacme sahip olmayan formlar elenerek daha dolgun formları geliştirilmiştir. Bunların dışında, seyir halinde gövdenin, takılan safralarla ters kanat formuna sahip olması sağlanmış, aracın (üst kısmındaki basıncın, dip kısmındaki basınçtan yüksek olması nedeniyle) bu şekilde nötr stabilite kazanarak düşey eksenli pervanelerin kullanımına gerek duymaması ve enerji tasarrufu sağlanması tasarlanmıştır.

1.3.3. Kablo Kumandalı Su Altı Aracının (ROV) Tasarlanması

Çalışmanın üçüncü bölümü; çevre denizlerimizde gerçekleştirilecek batimetri ölçümleri, deniz dibinden sonar ile dip ve deniz tabanı katmanlarını tarama, deniz dibinden sismik ölçümler ve deniz suyu örnek alımları ile akıntı vb. ölçümleri yapacak kapasiteye sahip ROV tasarımını içermektedir.

Bu tasarıma göre SWATH tipi araçların en büyük dezavantajı, yani araçların ağırlık değişimine aşırı duyarlılığı, avantaja dönüştürülerek, uygun konstrüktif çözümlerle geliştirilen AUV'nin aynı zamanda ROV olarak kullanılması mümkün olabilecektir. Bunun için araç hafif donanımlı iken sephiye elemanına kurşun safra takılarak, ağır cihazlar ile donatılmışken ise platforma plastik sephiye takıntısı eklenerek ağırlık dengelemesi yapılacaktır. Dolayısıyla ağırlık merkezinin mümkün mertebe sephiye elemanının (AUV) boyuna eksenine yakın olması sağlanarak metasantrik yükseklik (GM) arttırılacaktır.

Tez kapsamında öncelikle ROV tipleri incelenmiş, bir AUV'nin ROV olarak kullanılması için gerekli tasarım parametreleri ele alınmıştır. İzleyen aşamada biyomimikri yardımıyla AUV'nin ROV'a dönüşmesini sağlayacak değişiklikler yapılmış ve literatürdeki deneysel sonuçlar kullanılarak, elde edilen sonuçlar doğrulanmıştır.

Bunun için torpido formlu sephiye elemanının (AUV) uygun dikmeler aracılığıyla bağlandığı platforma ait formun belirlenmesinde, genel olarak uygun geometrisi nedeniyle "yassı sırtlı deniz kaplumbağası"nın (Flatback turtle, *Natator depressa*) kabuğundan yararlanılmış ve en düşük direnci oluşturan form geliştirilmiştir. Analiz sonuçları, kenar ve köşeleri yuvarlatılarak hidrodinamik form verilmiş platformun, dikdörtgen prizma platforma oranla çok daha düşük direnç sonuçları verdiğini, ayrıca yassı sırtlı deniz kaplumbağa formunun ise bunlar içinde minimum dirence sahip olduğunu göstermektedir.

BÖLÜM İKİ
TASARIMDA BİYOMİMİKRİ

Biyomimikri yaklaşımının özü, hayvanların, bitkilerin ve organizmaların doğal hayatın zorluklarıyla başa çıkmak için geliştirdikleri çözümlerden ilham almayı içerir. Bu etkili çözümlerin kullanıldığı biyomimikri metodolojisi yenilikçi tasarımlara rehberlik etmeyi amaçlamaktadır. Bu çalışmadaki biyomimikri yalnızca bir insansız deniz aracının form tasarımına uygulanmış olsa da tasarımın çeşitli aşamaları için etkili çözümler sağlayabilecektir. Daha geniş bir perspektiften bakıldığında, biyomimikri, tasarımın çeşitli yönlerinde yeniliği teşvik edebilen yol gösterici bir ilke olarak ortaya çıkmaktadır (Ünsalan vd., 2018). Bu yaklaşım yalnızca doğal modelleri taklit etmekle sınırlı değildir; doğal sistemlerin, gelişim süreçlerinin ve temel unsurların keşfini kapsamaktadır. Doğadan ilham almanın bir sonucu olarak, biyomimikri, çok çeşitli zorluklara çözümler üretebilen bir metot olarak tanımlanmıştır (Benyus, 1997). Bu metodu alternatif dizayn yöntemlerinden farklı kılan şey, canlı sistemlerin geliştirdiği işlevsel stratejileri kopyalamaya odaklanmasıdır. Bunun aksine, kökleri biyomorfizme ve doğrudan kullanıma dayanan tasarımlar, genellikle insanların doğal formlara olan yakınlığından etkilenen estetik kaygılara veya acil pratik kullanıma öncelik verir. Şekil 2.1'de bu yaklaşımların farklılıkları gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Biyomimikri yaklaşımları

Canlı organizmaların ve doğal sistemlerin zorluklara karşı geliştirdiği işlevsel çözümler, temelde evrim mekanizması tarafından yönlendirilir. Esasen evrim mekanizması bir tasarım yaratmaz; bunun yerine, başarılı varyasyonların doğal seçilim yoluyla devam etmesine izin verir, böylece canlı sistemler fonksiyonel avantajlarını sonraki nesillere aktarır. Sonuç olarak, evrim kavramı genel kanının aksine her zaman "ilerleme" veya "gelişme" anlamına gelmez. Bunun yerine, mutasyonlardan kaynaklanan spesifik varyasyonların, işlevsel etkinliği olan bireyleri kayıran, doğal seçilim yoluyla diğerlerinin elendiği bir mekanizma olarak çalışır (Gürsel ve Taner, 2022). Biyomimikri tasarım pratiği ile geleneksel mühendislik tasarımı arasındaki bu öncülden kaynaklanan ayrıma rağmen, tasarım faaliyetlerinin temel aşamalarına alternatif bir bakış açısı benimsenerek biyomimikri tasarım döngüsüne benzer bir yaklaşım oluşturulabilir. Bu araştırma bağlamında, otonom su altı araçlarının sevk verimini artırma çabası, doğadan ilham alan bir dizayn metodu ile karakterize edilmektedir. Bu, tasarımın amaçlanan işlevselliğine uyum sağlamayı, çeşitli deniz organizmalarından ilham alan formları değerlendirmeyi ve geliştirilen tüm tasarımlar için dijital modeller oluşturmayı içermektedir.

Doğal seçilim sürecinin hızı günümüz teknolojisinin temelini oluşturan araştırma geliştirme çalışmalarının hızına kıyasla çok geride kalsa bile doğal seçilim sonucu varlığını sürdüren canlıların ve insanların geliştirdiği teknoloji ürünlerinin maruz kaldığı çevresel zorluklar büyük ölçüde benzerdir. Aynı dünyayı paylaştığımız için bir canlının vücudunu çevreleyen deri/katman ve teknolojik bir ürünün yüzeyi benzer fiziksel ve kimyasal etkilerle sınanır.

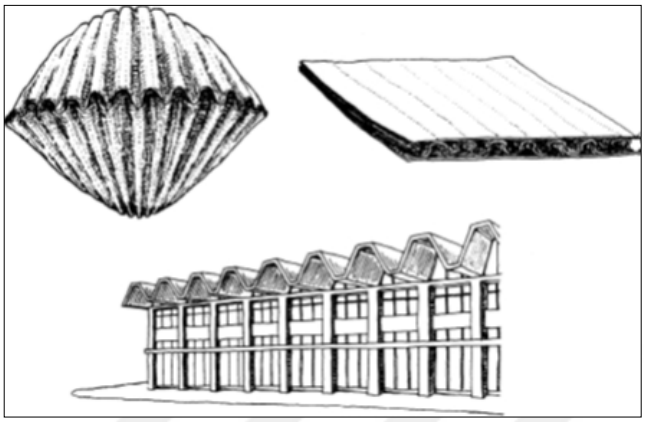
Milyonlarca yıl süren doğal seçilimin bir sonucu olan evrim mekanizmasına benzer yapıda farklı karmaşıklık seviyelerinde birçok teknolojinin ve ürünün vücut bulduğu söylenebilir. Evrim sonucunda meydana gelen teknolojiler ile insan yapımı teknolojilerin olgunlaşma süreçleri keskin farklılıklar içerdiğinden dolayı bu süreçler sonucunda meydana çıkan ürünler de bu farklılıkları yansıtan niteliklere sahip olmaktadırlar. Söz gelimi masalardan binalara, kutulardan televizyon ekranlarına kadar birçok insan yapımı üründe gözlemlenebilecek köşeli, dik açılı tasarımlara doğada çok sık rastlanmaz.

Bununla beraber hem doğanın hem de insan teknolojisinin aynı işlevsel amaca ulaşmak için benzer yapısal tasarımlar kullandığı da görülebilir. Deniz kabuğu yüzeyindeki kıvrımların ve oluklu mukavvanın bu ürünlere dayanım kazandırması, (yüzey atalet momentini yükseltmesi), bu ortak işlevsel amaca aynı stratejiyle ulaşıldığını göstermektedir. Nihai form tasarımlarının yanında hareketli düzeneklerin işleyişlerine dair benzerlikler de bir örümceğin bacağını uzatmak için vücudunda bulunan sıvı basıncını artırması ve bir iş makinasının hidrolik sistem ile çalışması gibi örneklerde karşımıza çıkmaktadır.

Hem evrim mekanizmasının hem de mühendisliğin sonucu olan ürünlerin işlevsellik bakımından benzerliği olsa da evrimsel sürecin bir çeşitlilik yarattığı ve bu çeşitlilik arasından başarılı versiyonların hayatlarını sürdürdüğü, buna karşın mühendislik sürecinin daha ilk adımdan bir tasarım oluşturduğu unutulmamalıdır. Bu nedenle doğadan ilham alınan tasarımlarda birebir doğal formun kopyalanmasından ziyade işlevselliğin kopyalanması önemli bir ayrımdır ve doğal formun incelenmesi özel bir dikkat istemektedir. Şekil 2.2'de deniz kabuğunun kıvrımlı şekli sayesinde kazandığı dayanım işlevinin örnek alınmasıyla tasarlanan mukavva ve çatı görülebilir (Vogel ve Davis, 2000).

Evrimsel sürecin mühendislik sürecine kıyasla avantajlara ve zayıflıklara sahip olmasının altında yatan sebep evrimin doğal seçilim yoluyla işlemesidir. Bilindiği üzere üremek canlıların ortak özelliklerinden biridir ve sınırlayıcı bir faktörün olmaması halinde canlı popülasyonlarının artışı durmaksızın devam eder. Her organizmanın yaşamını sürdürmesi ve üremeye devam etmesi içinse bulunduğu çevrede yaşamsal materyaller tüketmesi gerekmektedir. Bu materyallerin sınırlı oluşu da canlı popülasyonlarının artışını bir noktada sınırlar ve popülasyon ulaşabileceği en büyük boyutta kalır. Bu noktadan sonra çevresel kaynaklar daha fazla organizmaya yeterli gelmeyeceği için popülasyon içindeki bireylerden bir kısmının hayatta kalamaması ve üreyememesi sonucu ortaya çıkar. Hangi bireylerin dezavantajlı olacağını belirleyen faktör de popülasyon içindeki çeşitliliktir. Bazı bireyler farklı özelliklere sahiptir ve bu özellikleri onların beslenme/üreme şansını artırır. Dolayısıyla hayatta kalma şansını artıran bu özelliklerin sonraki nesle aktarılması ile

doğal seçilim gerçekleşmiş olur. Dikkat edilirse bu sürecin hiçbir noktasında bir amaca yönelik tasarım söz konusu değildir. Sadece mutasyonlar ve genetik kombinasyonlar sonucunda çeşitlenme ve elenme gerçekleşmiştir.

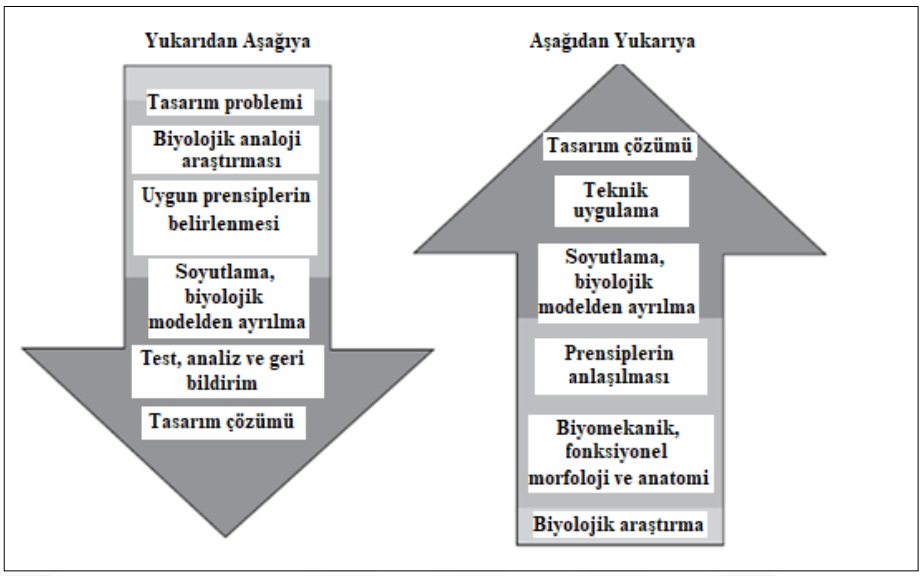


Şekil 2.2 Çatı ve mukavvanın kıvrımlı yapısının örnek alındığı deniz kabuğu

2.1 Biyomimikri Teknolojileri ve Uygulama Alanları

Canlıların biçim ve işlevlerindeki çeşitlilik insan teknolojisi ürünlerin karşılaştığı benzer çevresel zorluklarla etkili bir şekilde mücadele etmelerinden dolayı teknolojinin/mühendisliğin karşılaştığı sorunların çoğuna çözümler geliştirme potansiyeline sahiptir.

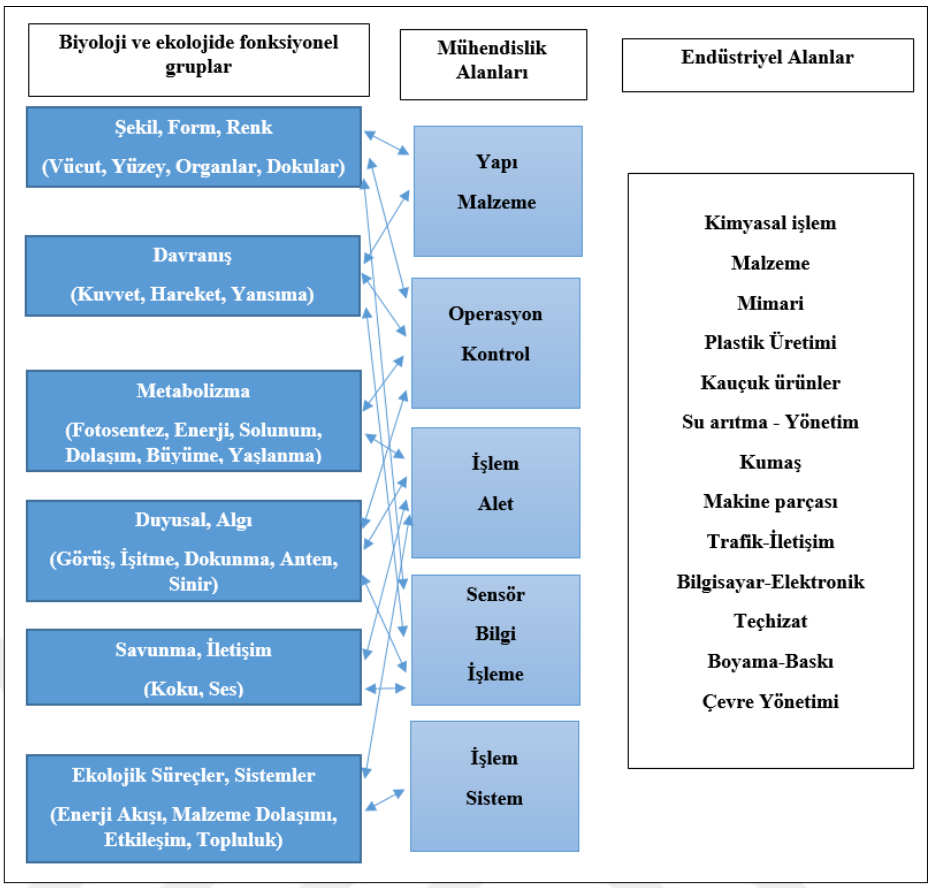
Benyus (1997), "ileri biyomimetik" ve "geri biyomimetik" olmak üzere iki tür biyomimetik yaklaşım olduğuna işaret etmiştir. İleri biyomimetikte doğada gözlemlenen bir mekanizmanın veya sistemin hangi şekilde faydalı bir teknolojiye dönüştürülebileceği konusuna odaklanılır. Geri biyomimetikte ise karşılaşılan bir problemin çözümünün olup olmayacağı ile ilgili doğadaki sistemler araştırılır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Biyomimikri yaklaşımları

Cırt cırtlı yapıştırıcı sistemlerin (Velcro) geliştirilmesi ileri biyomimikriye, Japon "kurşun trenlerin" aerodinamik formunun geliştirilmesi ise geri biyomimikriye örnek verilebilir. Bunun dışında uygulama alanlarına göre yapılan bir sınıflandırma Şekil 2.4'te gösterilmiştir (Bae ve Lee, 2019).

Biyomimetik yaklaşımın sınıflandırılmasından önce bazı temel kalıplara dikkat etmek biyomimikriye daha geniş bir perspektiften bakmak konusunda yardımcı olabilir. Bunlardan ilki doğanın enerjiye yaklaşımıdır. Bol bulunan, yenilenebilen ve organizmanın yakınlarında bulunan enerji kaynakları doğadaki canlılar tarafından tercih edilir. Doğanın bu davranış kalıbını taklit etmek mühendislik uygulamalarını güneş, rüzgar ve dalga enerjisinden faydalanmak doğrultusunda yönlendirir. Öte yandan doğada tüm malzemelerin geri dönüşmesi, bir organizmanın atığının bir başka organizma için beslenme kaynağı olması dikkate alındığında günümüz mühendislik uygulamalarında önem verilen "geri dönüşümün" doğada bir üst seviyede "ileri dönüşüm" olarak karşımıza çıktığı söylenebilir. Bir ağacın "geri dönüşüm" döngüsünün ağaçtan ağaca geri dönüşüm şeklinde doğrudan olmayışı gibi atık yönetimi konusunda ileri dönüşüm (up cycling), aşağı dönüşüm (down-cycling) ve geri dönüşüm (recycling) uygulamaları atık yönetiminde biyomimetik anlayıştan faydalanılabileceğini gösterir.



Şekil 2.4 Biyomimikri uygulama alanları

BÖLÜM ÜÇ
MATEMATİKSEL MODEL

Matematiksel modeller, gerek doğa bilimlerinde gerek mühendislik problemlerinde ve hatta sosyal bilimlerdeki süreçlerin veya sistemlerin bileşenlerini ve belirli özelliklerini matematiksel terimlerle ve kavramlarla ifade ederek bu süreçlerin kavranmasında ve bu süreçlere dair öngörülerin geliştirilmesinde kullanışlı olabilmektedirler. İncelenen olayların matematiksel modelleri diferansiyel denklem formunda olabilir. Diferansiyel denklemlerin çözümleri kimi zaman zorlayıcı olabileceğinden, hesap yükünün azaltılması adına çeşitli matematik teknikleri ve makul kabuller kullanmak gerekebilmektedir. Bu bölümde akışkan hareketini tanımlayan temel diferansiyel denklemler ve hesaplamalı akışkan dinamiği analizini mümkün kılabilmek için bu denklemler üzerinde yapılan matematiksel manipülasyonlar ve basitleştirmeler anlatılacaktır.

3.1. Akışkanlar Mekaniğinin Temel Diferansiyel Denklemleri

Akışkanlar mekaniğinin yönetici diferansiyel denklemleri fiziksel korunum yasalarından türetilmektedir. Bir korunum denklemi türetilirken sonsuz küçüklükte olduğu kabul edilen bir kontrol hacmi kullanılır. Bu hacim üzerinde sürekli ortam mekaniğini yöneten kütlenin ve momentumun korunumu yasaları kullanılarak akışkan alanındaki hız, basınç, yoğunluk gibi fiziksel özelliklerin dağılımının bulunması mümkün olabilmektedir. Akışkan hareketinin karakterini ortaya koyabilecek boyutsuz katsayıların türetilebilmesi de mümkündür. Korunum denklemleri üzerinde çeşitli akış kabulleri ile yapılacak belirli basitleştirmeler hem bu karmaşık diferansiyel denklemlerin sayısal çözümlerine olanak sağlamakta hem de akışın doğasına dair kavrayışı güçlendirebilecek ideal çözümlere ulaşılmasını mümkün kılmaktadır.

3.1.1 Kütlenin Korunumunun Diferansiyel Denklemi

Sonsuz küçüklükteki bir kontrol hacmi düşünülerek türetilen kütlenin korunumunun diferansiyel denklemi Denklem 3.1'de gösterildiği gibi ifade edilebilir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho . u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho . v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho . w) = 0 \tag{3.1}$$

Burada, ρ akışkanın yoğunluğunu, *t* zamanı, *u, v* ve *w* ise sürekli ortam hızının bileşenleridir.

Bu denklemin *V*'nin sürekli ortam hızını gösterdiği kapalı formda gösterimi ise Denklem 3.2'de gösterildiği gibidir:

$$\frac{d\rho}{dt} + \vec{\nabla} . \left(\rho \vec{V}\right) = 0 \tag{3.2}$$

3.1.2 Momentumun Korunumunun Diferansiyel Denklemi

Newton'un ikinci hareket yasasının bir akışkan için uygulanması da mümkündür (Denklem 3.3-3.6). Akışkan üzerine etki eden kütle ve yüzey kuvvetleri hareketi oluşturur. Yerçekimi ve elektromanyetik kuvvetler gibi kütle kuvvetleri tüm kütleyi doğrudan etkilerler. Basınç ve viskoz gerilme kuvvetleri ise yüzey kuvvetleri olup akışkan parçacığını çevreleyen yüzeyleri etkilerler.

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho \vec{V} . \vec{\nabla} \vec{V} = -\vec{\nabla} . \vec{\vec{\tau}} - \vec{\nabla} P + \rho \vec{g} \tag{3.3}$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + f_x \tag{3.4}$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + f_y \tag{3.5}$$

$$\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right)=-\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}+f_z \qquad (3.6)$$

3.1.3 Navier-Stokes Denklemleri

Newton tipi akışkanlar için kayma gerilmeleri şekil değiştirme hızıyla orantılı olduğundan momentumun korunumu denklemindeki gerilme terimleri (Denklem 3.7-3.12) viskozite ve hız terimleriyle de ifade edilebilir. Bu şekilde denklemdeki bilinmeyen sayısı Denklem 3.13- 3.15'te görülebileceği gibi azaltılmış olur.

$$\tau_{xx}=2\mu\frac{\partial v}{\partial x} \qquad (3.7)$$

$$\tau_{yy}=2\mu\frac{\partial v}{\partial y} \qquad (3.8)$$

$$\tau_{zz}=2\mu\frac{\partial w}{\partial z} \qquad (3.9)$$

$$\tau_{xy}=\tau_{yx}=\mu\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right) \qquad (3.10)$$

$$\tau_{xz}=\tau_{zx}=\mu\left(\frac{\partial w}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial x}\right) \qquad (3.11)$$

$$\tau_{yz}=\tau_{zy}=\mu\left(\frac{\partial v}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial y}\right) \qquad (3.12)$$

$$f_x-\frac{\partial p}{\partial x}+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)=\rho\frac{du}{dt} \qquad (3.13)$$

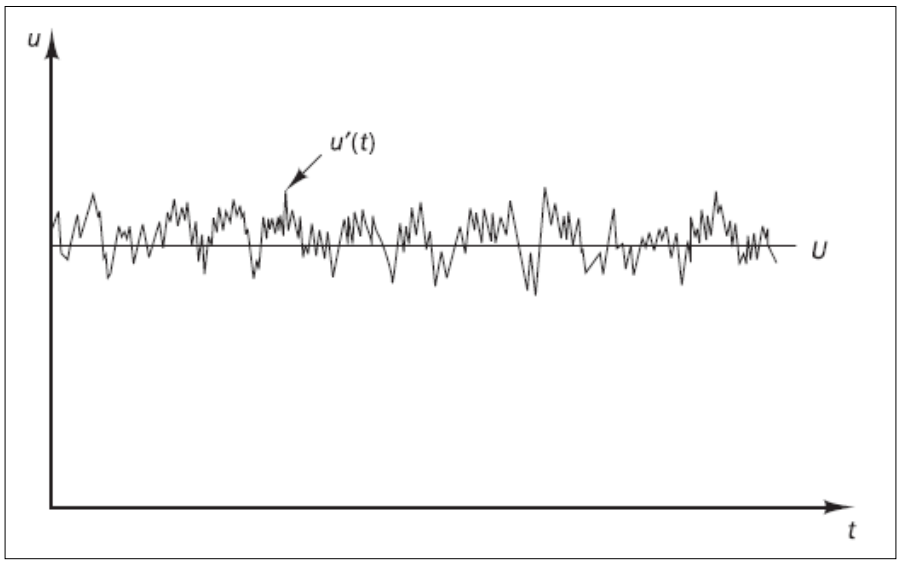
$$f_y-\frac{\partial p}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right)=\rho\frac{dv}{dt} \qquad (3.14)$$

$$f_z-\frac{\partial p}{\partial z}+\mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right)=\rho\frac{dw}{dt} \qquad (3.15)$$

Bu denklemlerde μ dinamik viskoziteyi göstermektedir.

3.2 Türbülans Modelleri

Mühendislik incelemelerine konu olan birçok akış gerek hızın gerekse viskozitenin etkisiyle türbülanslıdır. Türbülanslı akışın etkilerini incelemek hemen her disiplin için kritik bir öneme sahiptir. Laminer akış problemleri için Navier-Stokes denklemlerini analitik yolla çözmek mümkün olsa da (Schlichting ve Gersten, 1961) türbülanslı akışta çözüme ulaşmak için hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri kullanılarak akış probleminin çözümüne sonlu hacimler gibi ayrıklaştırma metotları ve çeşitli basitleştirmeler yapılarak sayısal yolla ulaşılmaya çalışılır. Kaotik ve öngörülemez bir doğası olan türbülansın ortaya çıkışı akımın kendi dinamiklerinden veya yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanabilir. Akışkan üzerine etki eden atalet kuvvetlerinin ve viskoz kuvvetlerin oranı, türbülans fenomeninin başlangıcı üzerinde belirleyici etkiye sahiptir. Bu kuvvetlerin oranını ifade etmek için Reynolds sayısı kullanılır. Viskoz kuvvetlerin daha baskın olduğu küçük Reynolds sayılarıyla tanımlanabilen akışlarda akış içerisinde oluşan düzensizliklerin zamanla sönümlendiği ve akışın laminer formunu koruduğu gözlenmiştir. Atalet kuvvetlerinin daha baskın olduğu yüksek Reynolds sayılarıyla ifade edilen akışlarda ise akış içerisinde oluşan düzensizlikler atalet kuvvetlerinin etkisiyle şiddetlenir ve laminer akış formu türbülanslı akışa dönüşmeye başlar. Bu andan itibaren hızın rastgele değişimi akış hareketini kararsız hale getirir.



Şekil 3.1 Türbülanslı akışta tipik noktasal hız ölçümü

Akışın kararsız hale gelmesiyle hız ve basınç gibi akış özelliklerinin önceki bölümde türetilen denklemlerle hesaplanması olanaksız hale gelebilir. Bu noktada hızı anlık hız olarak ele alma zorunluluğu ortaya çıkar. Bunun sebebi hızın rastgele değişiminin tahmin edilmesindeki zorluktur. Dolayısıyla Şekil 3.1'de gösterildiği gibi hız terimini $\bar{u}$ (daimî ortalama hız) ve u' (çalkantı bileşeni) olarak ikiye ayırarak Denklem 3.16'da gösterildiği gibi ifade etmek gerekecektir.

$$u(t) = \bar{u} + u'(t) \tag{3.16}$$

Türbülanslı akışın analizinde akışa ait hız ve basınç gibi değerleri bu şekilde ortalama değerler ve anlık değerler olarak ayırmak denklemleri manipüle etmek için faydalı bir yaklaşımdır.

3.2.1 RANS Denklemleri

Navier-Stokes denklemlerinin yüksek Reynolds sayılarının söz konusu olduğu türbülanslı akışlar için Doğrudan Sayısal Çözüm (Direct Numerical Solution) yöntemiyle çözülmesi yüksek işlemci gücü gerektirdiği için hali hazırda ticari mühendislik çalışmalarında bir seçenek olmaya uzaktır. Mühendislik çalışmalarında

odaklanılan optimizasyon konusunda ortalama hız ve ortalama basınç değerleri ile pratikte yeterli ve değerli sonuçlara ulaşmak mümkün olduğundan yukarıda bahsedilen hız bileşeninin anlık ve ortalama değerlerine ayrılması Navier-Stokes denklemlerinin çözümü için makul bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu şekilde türetilen Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemleri (Reynold Averaged Navier Stokes, RANS) Denklem 3.17- 3.19'da gösterildiği gibi ifade edilebilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \overline{u})}{\partial x} + \frac{\partial (\rho \overline{v})}{\partial y} = 0 \tag{3.17}$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial (\rho \bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{u} \bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial (\rho \bar{v} \bar{u})}{\partial y} \\ &\quad = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left[\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\mu \frac{\partial \bar{v}}{\partial x}\right] \\ &\quad - \left[\frac{\partial \left(\rho \overline{u'u'}\right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\rho \overline{u'v'}\right)}{\partial y}\right] \end{aligned} \tag{3.18}$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{u} \bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial (\rho \bar{v} \bar{v})}{\partial y} \\ &\quad = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial \bar{v}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial \bar{v}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left[\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\mu \frac{\partial \bar{v}}{\partial y}\right] \\ &\quad - \left[\frac{\partial \left(\rho \overline{u'v'}\right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\rho \overline{v'v'}\right)}{\partial y}\right] \end{aligned} \tag{3.19}$$

Bu denklemlerde $\bar{u}$,$\bar{v}$, $\bar{p}$ ortalama değerler, u', v', p' ise anlık değerlerdir.

Hızın bileşenlerine ayrıldığı bu Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemlerinde karşımıza yeni bilinmeyenler çıkmaktadır. Bunlara Reynolds gerilmeleri adı verilir. Sıkıştırılamaz akış için iki boyutlu süreklilik ve momentum denklemleri korunumsuz olarak Denklem 3.20-3.22'de gösterildiği gibi ifade edilebilir:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{y} = 0 \tag{3.20}$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}\bar{u})}{\partial y} \\ &\qquad = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v\frac{\partial \bar{u}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left[v\frac{\partial \bar{u}}{\partial x}\right] \\ &\qquad + \frac{\partial}{\partial y}\left[v\frac{\partial \bar{v}}{\partial x}\right] - \left[\frac{\partial\left(\overline{u'u'}\right)}{\partial x} + \frac{\partial\left(\overline{u'v'}\right)}{\partial y}\right] \end{aligned} \tag{3.21}$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}\bar{v})}{\partial y} \\ &\qquad = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v\frac{\partial \bar{v}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v\frac{\partial \bar{v}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left[v\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}\right] \\ &\qquad + \frac{\partial}{\partial y}\left[v\frac{\partial \bar{v}}{\partial y}\right] - \left[\frac{\partial\left(\overline{u'v'}\right)}{\partial x} + \frac{\partial\left(\overline{v'v'}\right)}{\partial y}\right] \end{aligned} \tag{3.22}$$

Bu noktada Reynolds gerilmelerine ilişkin terimlerin akış değerleriyle ilişkilendirilmesi durumunda denklemler çözülebilir bir forma dönüşebilir. Reynolds gerilmeleri ortalama şekil değiştirme hızları Denklem 3.23-3.25'te gösterilen şekilde ifade edilebilir.

$$-\rho\overline{u'u'} = 2\mu_T\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \frac{2}{3}\rho k \tag{3.23}$$

$$-\rho\overline{v'v'} = 2\mu_T\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \frac{2}{3}\rho k \tag{3.24}$$

$$-\rho\overline{u'v'} = \mu_T\left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}\right) \tag{3.25}$$

Bu denklemlerde μ_T türbülans viskozitesini, k ise türbülans kinetik enerjisi ifade etmektedir.

3.2.2 k-ε Türbülans Modeli

Launder ve Spalding (1983) tarafından geliştirilen bu model birçok mühendislik problemi için başarıyla kullanılmaktadır. Bu modelde türbülans kinetik enerjisi k ve türbülans yitim hızı ε, girdap viskozitesi v_T ve viskozite sabiti C_μ Denklem 3.26-3.29'da gösterildiği gibi ifade edilebilir:

$$k = \frac{1}{2} u'_i u'_i \tag{3.26}$$

$$\varepsilon = v_T \overline{\left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j}\right)\left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j}\right)} \tag{3.27}$$

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{3.28}$$

$$v_T = \frac{\mu_T}{\rho} \tag{3.29}$$

Temel denklemlerin sıkıştırılamaz akış için ifadesi ise Denklem 3.30-3.32'de verilmiştir.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{3.30}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{\partial (uu)}{\partial x}+\frac{\partial (vu)}{\partial y}$$
$$=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left[(v+v_T)\frac{\partial u}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[(v+v_T)\frac{\partial u}{\partial y}\right] \quad (3.31)$$
$$+\frac{\partial}{\partial x}\left[(v+v_T)\frac{\partial u}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[(v+v_T)\frac{\partial v}{\partial x}\right]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{\partial (uv)}{\partial x}+\frac{\partial (vv)}{\partial y}$$
$$=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\left[(v+v_T)\frac{\partial v}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[(v+v_T)\frac{\partial v}{\partial y}\right] \quad (3.32)$$
$$+\frac{\partial}{\partial x}\left[(v+v_T)\frac{\partial u}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[(v+v_T)\frac{\partial v}{\partial y}\right]$$

Akışkan özelliklerinin değişmesi halinde standart k-ε modeli için ek diferansiyel transport denklemlerinin korunumlu ifadesi Denklem 3.33 ve Denklem 3.34'te gösterildiği gibidir.

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial (\rho uk)}{\partial x}+\frac{\partial (\rho vk)}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\mu_T}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\mu_T}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial y}\right)+P-D \quad (3.33)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial (\rho u\varepsilon)}{\partial x}+\frac{\partial (\rho v\varepsilon)}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right)+\frac{\varepsilon}{k}(C_{\varepsilon 1}P-C_{\varepsilon 2}D) \quad (3.34)$$

Burada σ_k, σ_ε, $C_{\varepsilon 1}$ ve $C_{\varepsilon 2}$ deneysel verilerle belirlenen ayarlanabilir sabitlerdir.

Yıkım terimi Denklem 3. 35'te verilmiştir.

$$D=\rho\varepsilon \quad (3.35)$$

Üretim terimi P ise Denklem 3.36'da gösterildiği gibi formüle edilebilir.

$$P=2\mu_T\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2\right]+\mu_T\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2-\frac{2}{3}\mu_T\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2$$
$$-\frac{2}{3}\rho\mu_T k\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right) \quad (3.36)$$

Akışkan özelliklerinin değişmediği durumda ise transport denklemlerinin korunumsuz biçimi Denklem 3.37 ve Denklem 3.38'de gösterildiği gibi ifade edilebilir:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u\frac{\partial k}{\partial x} + v\frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{v_T}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{v_T}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial y}\right) + P - D \tag{3.37}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v\frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{v_T}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{v_T}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right) + \frac{\varepsilon}{k}(C_{\varepsilon 1}P - C_{\varepsilon 2}D) \tag{3.38}$$

Yıkım terimi Denklem 3.39'da verilmiştir.

$$D = \rho\varepsilon \tag{3.39}$$

Üretim terimi P ise Denklem 3.40'ta gösterildiği gibi ifade edilebilir.

$$P = 2v_T\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2\right] + v_T\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 \tag{3.40}$$

Yukarıdaki denklemlerde beş adet sabit dikkat çekmektedir: C_μ, σ_k, σ_ε, $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$. Bu model sabitlerinin değerleri kapsamlı bir türbülanslı akış veri seti ile Denklem 3.41-3.45'te belirlenmiştir.

$$C_\mu = 0{,}09 \tag{3.41}$$

$$\sigma_k = 1{,}0 \tag{3.42}$$

$$\sigma_e = 1{,}3 \tag{3.43}$$

$$C_{\varepsilon 1} = 1{,}44 \tag{3.44}$$

$$C_{\varepsilon 2} = 1{,}92 \tag{3.45}$$

3.2.3 k-ω Türbülans Modeli

k–ε modelinde kinematik girdap viskozitesi, hız ölçeği ve uzunluk ölçeğinin ürünü olarak ifade edilir. Ancak türbülans kinetik enerjisinin (ε) dağılma oranı, değişkeni belirleyen tek uzunluk ölçeği değildir. k- ε modelinin yanında diğer birçok iki denklem modeli geliştirilmiştir. En belirgin alternatif, Wilcox (2008) tarafından önerilen ve ikinci değişken olarak ω türbülans frekansını kullanan k–ω modelidir. Bu değişken kullanıldığında, girdap viskozitesi Denklem 3.46'da gösterildiği gibi verilir:

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \tag{3.46}$$

Reynolds gerilmeleri, Boussinesq ifadesiyle Denklem 3.47'de görülen iki denklemli modellerde hesaplanır:

$$\tau_{ij} = -\rho\overline{u'_i u'_j} = 2\mu_t S_{ij} - \frac{2}{3}\rho k\delta_{ij} = \mu_t\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\rho k\delta_{ij} \tag{3.47}$$

Burada S_{ij} ortalama deformasyon oranı, U_i ve U_j ortalama hız gradyenlerini, δ_{ij} ise Kronecker deltasını ifade etmektedir.

Yüksek Reynolds sayılarında türbülanslı akışlar için k ve ω için taşıma denklemi Denklem 3.48'de gösterildiği gibidir:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + div(\rho k U) = div\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right) grad(k)\right] + P_k - \beta^*\rho k\omega \tag{3.48}$$

Burada β^* model sabiti olup türbülanslı kinetik enerjinin üretim hızı P_k Denklem 3.49'da gösterilmiştir.

$$P_k = \left(2\mu_t S_{ij}.S_{ij} - \frac{2}{3}\rho k\frac{\partial U_i}{\partial x_j}S_{ij}\right) \tag{3.49}$$

Böylelikle k- ω modeli Denklem 3.50'de görülen son halini alır.

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + div(\rho\omega U) = div\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}\right) grad(\omega)\right] + \gamma_1\left(2\rho S_{ij}.S_{ij} - \frac{2}{3}\rho\omega\frac{\partial U_i}{\partial x_j}S_{ij}\right) - \beta_1\rho\omega^2 \quad (3.50)$$

Model sabitleri σ_k, σ_ω, γ_1, β_1 ve β^* Denklem 3.51-3.55'te gösterilen değerleri alır.

$$\sigma_k = 2{,}0 \quad (3.51)$$

$$\sigma_\omega = 2{,}0 \quad (3.52)$$

$$\gamma_1 = 0{,}553 \quad (3.53)$$

$$\beta_1 = 0{,}075 \quad (3.54)$$

$$\beta^* = 0{,}09 \quad (3.55)$$

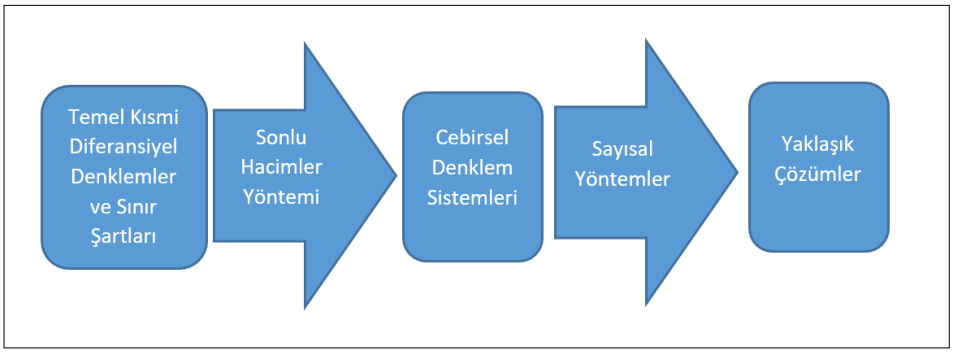
Menter (1993), k-ε modelinin sonuçlarının ters basınç gradyanlarına sahip sınır katmanları için tatmin edici olmadığını kaydetti. Bu, onu cidara yakın bölgede k–ε modelinin k–ω modeline dönüşümünü ve cidardan uzakta tam türbülanslı bölgede standart k–ε modelini kullanan hibrit bir model önermeye yöneltti. Burada Reynolds gerilme hesaplaması ve k-denklemi, Wilcox'un orijinal k-ω modelindekiyle aynıdır, ancak ε-denklemi, Denklem 3.56'da gösterildiği gibi bir ω-denklemine dönüştürülür

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + div(\rho\omega\mathbf{U}) = div\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega,1}}\right) grad(\omega)\right] + \gamma_2\left(2\rho S_{ij}.S_{ij} - \frac{2}{3}\rho\omega\frac{\partial U_i}{\partial x_j}S_{ij}\right) - \beta_2\rho\omega^2 + 2\frac{\rho}{\sigma_{\omega,2}\omega}\frac{\partial k}{\partial x_k}\frac{\partial \omega}{\partial x_k} \quad (3.56)$$

Önceki k-ω denklemi ile karşılaştırıldığında denklemin sağ tarafta fazladan bir kaynak terimine sahip olduğunu görülmektedir. Bu terim ε-denklemindeki difüzyon teriminin dönüşümü sırasında ortaya çıkan çapraz difüzyon terimidir.

3.3 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi

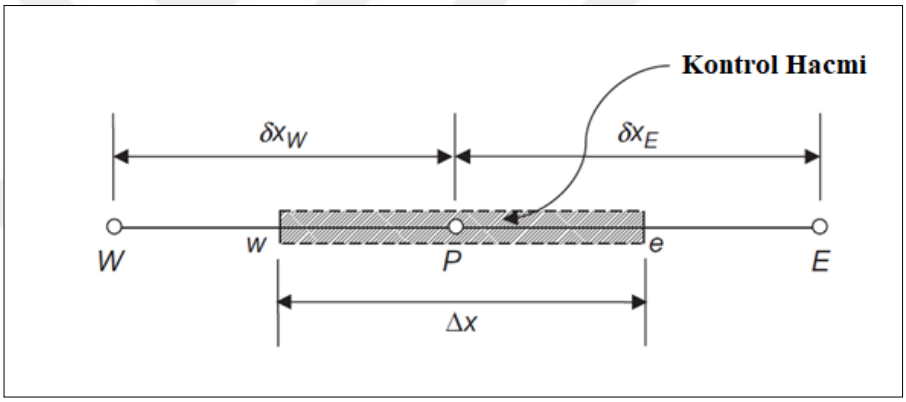
Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yazılımları akışı tanımlayan kısmi diferansiyel denklemlerinin çözümüne ulaşmak için, ilk aşamada bu denklemleri cebirsel denklem sistemlerine dönüştürmektedirler. Bu dönüşüm ayrıklaştırma olarak da adlandırılır. Ayrıklaştırma için sonlu farklar, sonlu elemanlar ve sonlu hacimler gibi yöntemler kullanılmaktadır. Çözüm sürecinin sonraki aşamasında cebirsel denklem sistemleri sayısal yöntemlerle çözülerek yaklaşık sonuçlar elde edilir. Şekil 3.2'de hesaplamalı akışkanlar dinamiğine ait akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Hesaplamalı akışkanlar dinamiğine ait akış şeması

Sonlu hacimler yönteminde akışı tanımlayan denklemlerin integral formu ayrıklaştırılır (Tu, Yeoh, Liu, ve Tao, 2023). Hesaplamanın yapılacağı bölge kontrol hacimlerine bölünür ve bu bölünen her hacimde incenelecek akış özelliğinin korunduğu kabul edilir. Kontrol hacimlerinin yüzeylerindeki değerleri bulmak için bu hacimlerin merkezlerindeki değerlerin interpolasyonu yapılır. Neticede her bir kontrol hacmi için komşu hacimlerdeki değerleri de içeren bir cebirsel denkleme ulaşılmış olur. Bu yöntemin ağ kesişim noktaları yerine hacimler kullanıldığı için hem düzenli hem de düzensiz çözüm ağlarında kullanılması mümkündür.

Sonlu hacimler yönteminin uygulamasını daha sade bir şekilde gösterebilmek için Şekil 3.3'teki gibi bir boyutlu bir bölgede W, P ve E olarak isimlendirebilecek üç düğüm noktasının etrafında kontrol hacimlerine bölünmüş bir alan düşünülebilir.



Şekil 3.3 P düğüm noktası etrafındaki kontrol hacmi

W ile P ve P ile E arası δx_W ve δx_E şeklinde tanımlanmıştır. Buna göre hacim integraline Gauss diverjans teoreminin uygulanmasıyla Denklem 3.57 elde edilebilir.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)=\frac{1}{\Delta V}\iiint\left(\Gamma\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)dV=\frac{1}{\Delta V}\iint\left(\Gamma\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)dA^x \approx\frac{1}{\Delta V}\sum_{i=1}^{2}\left(\Gamma\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)_i A_i^x \tag{3.57}$$

Burada Γ difüzyon sabiti, φ ayrıklaştırma işlemi yapılan parametre, V hacim ve A_i^x izdüşüm alanları A_1^x=-A_W ve A_2^x=A_E olduğu düşünülürse yukarıdaki denklem Denklem 3.58'de gösterilen şekilde yeniden yazılabilir.

$$= \left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_e A_E - \left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_w A_w \tag{3.58}$$

Kaynak terimi S_φ için Denklem 3.59'da gösterilen yaklaşım uygulanabilir.

$$\frac{1}{\Delta V} \iiint S_\varphi dV = S_\varphi \tag{3.59}$$

Bu şekilde ayrıklaştırılmış denklem Denklem 3.60'ta gösterilen son halini alır.

$$\frac{1}{\Delta V}\left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_e A_E - \frac{1}{\Delta V}\left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_w A_w + S_\varphi = 0 \tag{3.60}$$

Bu diferansiyel denklemin cebirsel bir denklem haline gelmesi içinse türev ifadeleri δx_Eve δx_W Denklem 3.61 ve Denklem 3.62'de gösterildiği gibi fark terimleri ile basitleştirilir.

$$\left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_e A_E = \Gamma_e A_E \left(\frac{\varphi_E - \varphi_P}{\delta x_E}\right) \tag{3.61}$$

$$\left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_w A_W = \Gamma_w A_W \left(\frac{\varphi_P - \varphi_W}{\delta x_W}\right) \tag{3.62}$$

Bu ifadeler Denklem 3.60'ta yerine konulduğunda Denklem 3.63 elde edilir.

$$\frac{\Gamma_e A_E}{\Delta V}\left(\frac{\varphi_E - \varphi_P}{\delta x_E}\right) - \frac{\Gamma_w A_W}{\Delta V}\left(\frac{\varphi_P - \varphi_W}{\delta x_W}\right) + S_\varphi = 0 \tag{3.63}$$

Bu denklem yeniden düzenlenirse cebirsel form Denklem 3.64'te gösterilen şekilde yazılabilir.

$$\frac{1}{\Delta V}\left(\frac{\Gamma_e A_E}{\delta x_E}+\frac{\Gamma_w A_W}{\delta x_W}\right)\varphi_P=\frac{1}{\Delta V}\left(\frac{\Gamma_e A_E}{\delta x_E}\right)\varphi_E+\frac{1}{\Delta V}\left(\frac{\Gamma_w A_W}{\delta x_W}\right)\varphi_W+S_\varphi \tag{3.64}$$

Katsayılar düzenlendiğinde ise düğüm noktası sabitleri a_P, a_E, a_W ve b Denklem 3.65 ile ifade edilir

$$a_P\varphi_P=a_E\varphi_E+a_W\varphi_W+b \tag{3.65}$$

Düğüm noktası sabitlerinin cebirsel formu Denklem 3.66-3.69'da gösterilmiştir.

$$a_E=\frac{\Gamma_e A_E}{\Delta V\delta x_E} \tag{3.66}$$

$$a_W=\frac{\Gamma_w A_W}{\Delta V\delta x_W} \tag{3.67}$$

$$a_P=a_E+a_W \tag{3.68}$$

$$b=S_\varphi \tag{3.69}$$

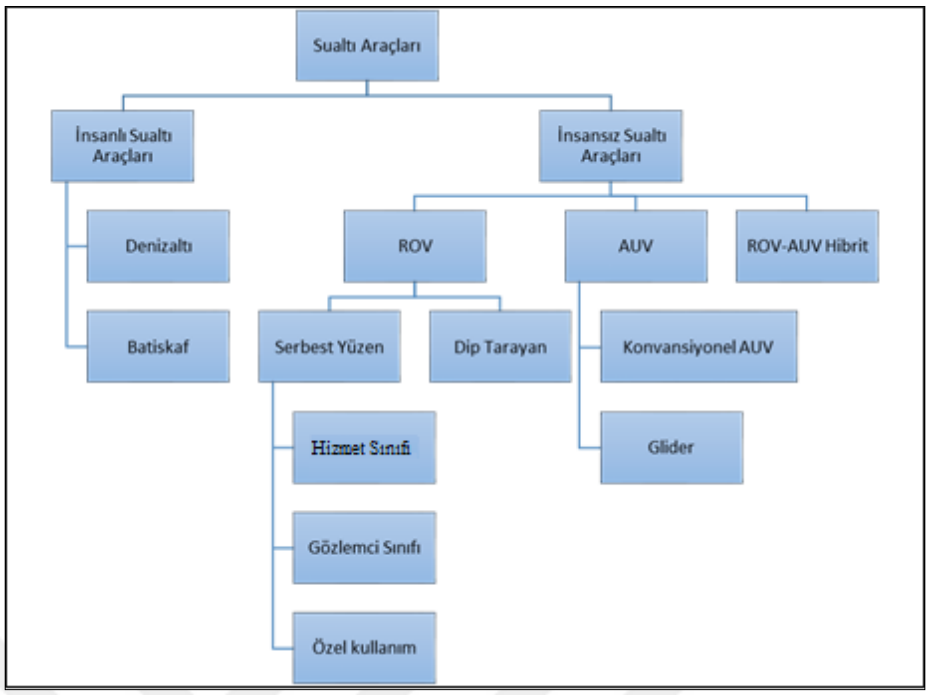
Bu gibi cebirsel denklem sistemleri ise Gauss eliminasyonu gibi doğrudan veya Gauss-Seidel yöntemi gibi iteratif sayısal yöntemlerle çözülebilir. Bu noktada hesap yükünü hafifletmek için iteratif sayısal yöntemler kullanılmakta olup aynı zamanda çözümün yakınsamasını iyileştirme ve iterasyonu hızlandırma konuları hangi yöntemin seçileceği konusunda belirleyici olmaktadır.

.

BÖLÜM DÖRT
İNSANSIZ DENİZ ARAÇLARI VE BİLEŞENLERİ

Günümüzde sualtı araştırmaları çevrenin korunması ve incelenmesi, çeşitli mühendislik projelerinin yürütülmesi gibi amaçlarla hem sivil hem de askeri alanlarda yapılmaktadır. Finansal, operasyonel ve çevresel koşulların zorlayıcılığı nedeniyle bu araçların insan hayatını riske sokmayacak şekilde tasarlanması üzerine yoğunlaşılmıştır. Denizel koşulların etkisiyle su altı araçlarının basınca ve korozyona dayanıklı olması gerekliliğinin yanı sıra su altında haberleşme için elektromanyetik dalgaların kullanımının son derece sınırlı olması, insansız su altı araçlarının tasarımını zorlaştıran başlıca etkenlerdir. Bunların yanında enerji depolama imkânının sınırlı oluşu ve araçlara otonomi kazandırmanın güçlüğü tasarımcıların önündeki önemli zorluklardır. Su altı araçlarının yapısal dayanımları, kontrol ve haberleşme sistemleri, enerji kapasiteleri gibi konuların her biri kendi başına ele alınabilecek araştırma konularıdır.

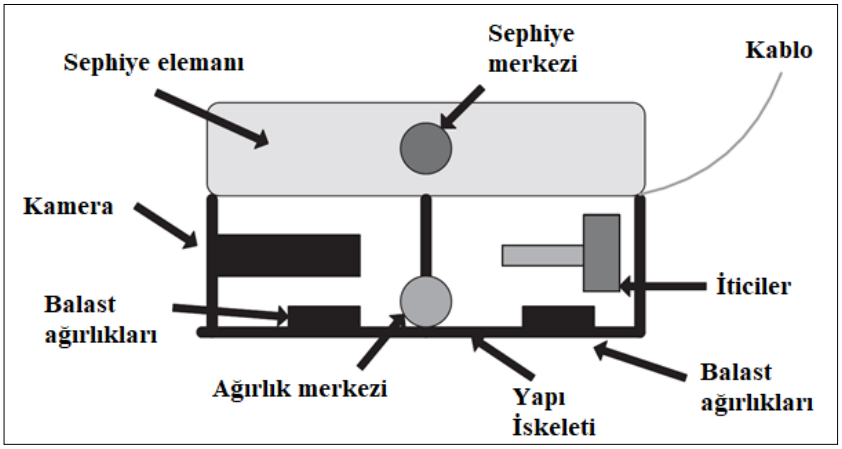
Su altı araçları, insanlı su altı araçları ve insansız su altı araçları olarak iki temel kategoriye ayrılabilir. Bir insansız su altı aracını şu şekilde tanımlamak da mümkündür: Operasyonu ya tamamen otonom (önceden programlanmış ya da gerçek zamanlı uyarlanabilir görev kontrolü) ya da minimum denetim kontrolü altında olan ve muhtemelen fiber optik kablo gibi veri bağlantıları dışında bağlı olmayan kendinden tahrikli su altı aracı. Şekil 4.1'de su altı araçlarının sınıflandırılması gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Su Altı Araçlarının Sınıflandırılması

4.1 Kablo Kumandalı Su Altı Araçlar

ROV (Remotely Operated underwater Vehicle), bir dizi kablo bağlantısıyla veri ve enerji akışı sağlanarak, dolayısıyla bir operatör tarafından kontrol edilerek, su altında değişik amaçlara yönelik ve dalgıçlar için tehlikeli, hatta olanaksız olabilecek bir dizi işlevi yerine getiren bir su altı robotudur. Dolayısıyla bir ROV sistemi; araca monte edilmiş kameralar, robot kollar, çeşitli sensörler, sonar ve ölçüm sistemlerinin yanı sıra sevk ve manevra sistemi ile operatörün bu sistemleri kontrol ettiği kontrol paneli, aracı yüzeye bağlayan kablo ve aracın suya indirilip geri alınmasını sağlayan vinç düzeneklerinden oluşmaktadır. Günümüz teknolojileri göz önüne alındığında uzaktan (remote) kontrolden ziyade "kablo kontrollü araç" (cable operated underwater vehicle) olarak isimlendirilmesi daha doğrudur. Şekil 4.2'de bir ROV'un temel bileşenleri gösterilmiştir (Christ ve Wernli, 2007).



Şekil 4.2 Bir ROV'un bileşenleri

ROV'lar dalgıçların inceleme menzillerinin ötesinde çalışarak bentik çevreyi ve canlı türlerini araştırmak için de etkili bir alternatif sunarlar. Serbest yüzen ROV'lar gerçek zamanlı video ve fotoğraflar aracılığıyla gözlem kapasitesini artırmakta ve reaktif araştırmalar yürütebilmektedirler. Su yüzeyindeki bir gemiye bağlı ve en basit şekliyle ana gövdenin yanı sıra iticiler, kameralar ve ışıklandırma sisteminden oluşan su altı robotları olarak değerlendirilebilirler. Enerji ihtiyaçları ve yönlendirme komutlarını içeren sinyalleri almak için bir kablo/göbek bağı ile yüzeydeki operasyon birimine bağlıdırlar.

ROV sistemlerini Class-I (Gözlem sınıfı), Class –II (Faydalı yük alabilen orta boyutlu) ve Class-III (Büyük boyutlu hizmet sınıfı) olarak üç kategoriye ayırmak mümkündür. Bunlardan boyutça en küçük olan Class-I ROV'lar bir tahrik sistemi, kamera ve sensörlerden ibaret olabilecekleri için "yüzen göz" olarak da tanımlanabilirler. Class-II ROV'lar gözlem sınıfı olanlara göre faydalı yük alabilme ve müdahale ekipmanlarıyla donatılabilme özelliğine sahiptirler. Class-III ROV'lar ise çok işlevli manipülatörler ve hidrolik hareket ekipmanları ile su altı inşaat projeleri için gerekli kabiliyetlere sahiptirler. Şekil 4.3'te bu sınıflandırma soldan sağa Class-I, Class-II ve Class-III olarak gösterilmiştir (Monk vd., 2020).



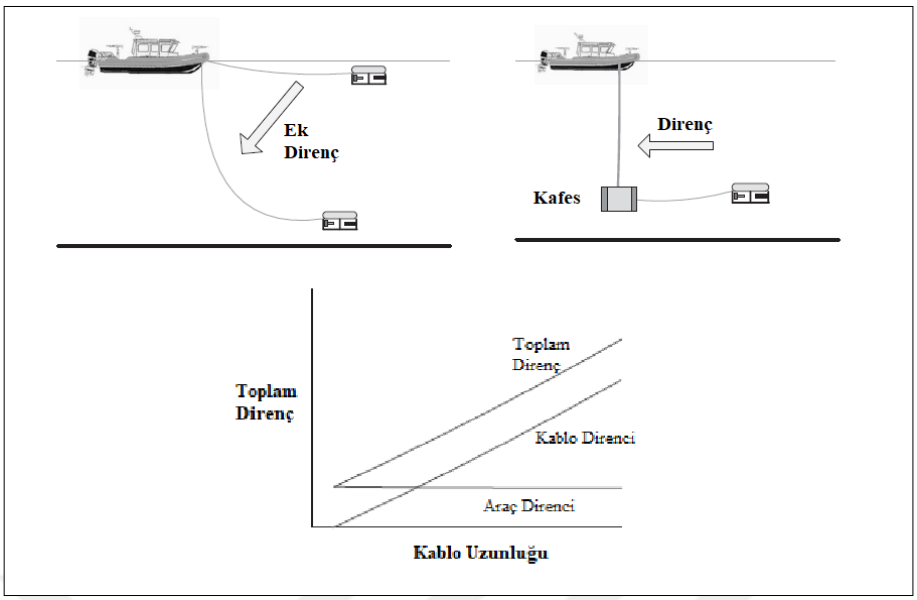
Şekil 4.3 ROV türleri

ROV'lar operasyonel kabiliyetleriyle önemli avantajlar sunmaktadırlar. Bunların başında AUV'lere kıyasla yüksek manevra kabiliyetleri gelmektedir. Bu sayede zorlu arazilerde araştırma yürütebilmektedirler (van Rein, Brown, Quinn, & Breen, 2009). Birbirinden farklı ölçüm, gözlem ve numune alma görevlerini yerine getirebilmek için çeşitli aksesuarların ROV'lara montajı mümkündür. Gözlem yapılan bölgede hem görüntüleme hem de örnek toplama yapabilecekleri için çalışmaların kapsamı daha verimli değerlendirilebilmektedir. Dalgıçlara kıyasla daha derinlere ulaşabilmektedirler (Van Rein vd., 2009). Dalgıçların aksine tekrar tekrar yükselip alçalma ve daha uzun süre görev yapabilme yetenekleri vardır (Boavida, Assis, Reed, Serrão ve Gonçalves, 2016). Biyojenik ve hassas habitatlarda kullanılmaları mümkündür (Cook, Conway ve Burd, 2008). Bu avantajların yanı sıra çeşitli yapısal kısıtları da bulunmaktadır. Birçok bileşenden oluşan karmaşık sistemler oldukları için çeşitli ekipmanların arızalanma riski mevcuttur. Gemilerle çekilen örnek alma düzeneklerine göre daha maliyetlidirler. Gözlemci sınıfı ROV'lar kendi güç modülleriyle hareket ettikleri için çalışma derinliği arttıkça kablo direncinin artması ve su altı akıntıları bu araçların performansını olumsuz yönde etkiler (Boavida vd., 2016). Çalışma esnasında saat başına gözlem yapılan alanlar kıyaslandığında gemiden çekilen kızaklara göre dezavantajlıdırlar (Eleftheriou, 2013). Teknelerin pervaneleriyle temas etme veya kabloların çeşitli engellere takılma riski mevcuttur. Gözlem ve numune alma işlemleri yapabilmek için canlıların doğal yaşam alanlarına ışık ve hareket getirmeleri nedeniyle habitatı etkileme ve sonuçta canlıların yaşamını temsil etmeyen gözlemler yapabilmektedirler (Båmstedt, Kaartvedt ve Youngbluth, 2003).

Su altı araçlarının iletişimini ve veri aktarımını sağlamak için radyo dalgaları suyun enerjilerini zayıflatması nedeniyle kullanılamamaktadır. Radyo dalgalarının suya nüfuz edebilmesi için düşük bir frekansa sahip olmaları gerekmekte, ancak bu da veri iletimini sınırlandırmaktadır. Bu nedenle su altında radyo dalgaları kullanarak telemetri mevcut teknolojilerle mümkün görünmemektedir. Akustik veri iletim hızı ise video aktarımı için yetersizdir. Bu nedenle gerçek zamanlı veri aktarımını sağlamak için ROV'larda kablo kullanımı kaçınılmazdır. Ancak kablo kullanımı Şekil 4'te gösterildiği üzere beraberinde önemli bir direnç yükü getirmektedir. Class-I ROV'lar için batarya ömrünü azaltabilecek bu yük Class-II ve Class-III ROV'lar için daha büyük sorunlara sebep olacağından bu tip ROV'larda Kablo Yönetim Sistemi kullanılarak aracın gemiden bağımsız hareket edebilmesi sağlanmaktadır. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te ROV kablo yönetim sistemi ve bu sistemin olmaması durumunda araca etkiyecek ek direnç gösterilmiştir (Christ ve Wernli, 2007).



Şekil 4.4 ROV ve kablo yönetim sistemi



Şekil 4.5 Kablo direncinin ROV toplam direncine etkisi

4.2 Otonom Su Altı Araçları

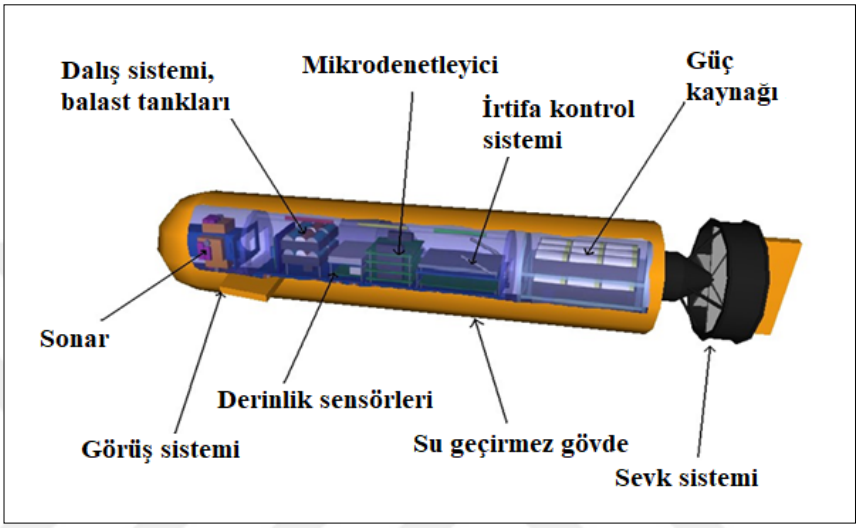
ROV'ların sahip olduğu yapısal dezavantajların denizel araştırmaları kısıtlamasının önüne geçmek için otonom su altı araçları (Autonomous Underwater Vehicles, AUVs) ön plana çıkmaktadır. AUV'ler dâhili sensörleri, navigasyon sistemleri ve diğer faydalı yük ekipmanlarıyla su altı görevlerini yerine getirebilen otonom dalgıç platformlardır. Tasarımları, programlanmaları, üretimleri ve çalışma şartlarının karmaşıklığına rağmen ROV'lara göre önemli avantajlara sahiptirler. Günümüzde AUV'lerin teknik kapasitelerinde ve güvenilirliklerindeki artış, bu araçların hem sivil hem askeri alanlardaki kullanımlarını giderek yaygınlaştırmaktadır. Sualtı robot teknolojisindeki nihai amaç kendi kendine yeten, akıllı, karar veren AUV'ler geliştirmektedir. Bu bağlamda gerek yazılım gerek malzeme gerekse güç sistemleri konularında birçok araştırma yürütülmektedir.

AUV'ler denize bırakılmaları ve geri alınmaları arasındaki zaman aralığında bağımsız çalışarak araştırma gemisinin ve mürettebatın diğer çalışmalarına ayıracakları süreyi üst düzeye çıkarmaktadırlar (Strong, 2015). Yine de balıkçılık ve nakliye faaliyetlerinin olduğu riskli bölgelerde araştırma gemisi tarafından takip edilmeleri gerekebilmektedir. Seyir halinde deniz tabanına yakın olabildikleri için

kapsama alanları düşük de olsa yüksek çözünürlüklü haritalama ve görüntüleme performansı sunmaktadırlar. Gemiden sarkıtılan sistemlere göre daha kesin ve sabit bir irtifada kalarak belirli hızlarda ve açılarda görüntüleme yapabilmekte ve önceden belirlenmiş rotaları takip ederek daha karmaşık sahalarda ölçümler gerçekleştirebilmektedirler. AUV'lerde görüntüleme aygıtları ve sonar aynı anda kullanılabilir, bir arada konumlandırılmış akustik ve görsel veriler üretilerek gerçeğe yakın habitat haritaları oluşturulabilir (Russell B Wynn, 2013). AUV deniz tabanıyla temas halinde olmadığından, örneğin genel olarak deniz koruma alanları ve özellikle kırılgan biyojenik habitatlar gibi aşınmaya duyarlı alanların görüntü araştırmaları için özellikle yararlı örnekleme platformlarıdır (Russell B. Wynn vd., 2014). Küçük AUV'lerin taşınabilir ve küçük gemilerden konuşlandırılabilir olması da araştırma faaliyetlerini kolaylaştıran bir diğer etmendir. Gelgitler sebebiyle oluşan akıntılar ve girdaplar nedeniyle 2 m/s gibi düşük sayılabilecek seyir hızlarında operasyon sürdüren AUV'ler tehlikeye girebilmektedir. Suyun haberleşme ve veri aktarımı için kullanılması gereken yüksek frekanslı radyo dalgalarını geçirmemesi nedeniyle AUV'lerin deniz tabanı araştırmaları yaparken yüzeydeki istasyonla bağlantıları olmaz ve veri aktarımı için aracın yüzeye çıkması beklenir. Bu nedenle muhtemel teknik sorunlardan kaynaklanan veri kaybı veya bozulması ancak görevden sonra anlaşılabilmektedir (Howell, 2014). Ayrıca bu araçların su kolonundan numune alabilmelerine karşılık deniz yatağından numune toplama yetenekleri yoktur. AUV'ler, gemilerle yapılan deniz tabanı haritalama ve profil oluşturma verilerine kıyasla daha düşük uzamsal kapsama alanına sahiptir. Engebeli deniz tabanında çarpışma riskinden dolayı alçak irtifa araştırmaları yapmak için uygun değillerdir. Özellikle kıyı bölgelerinde, balıkçılık faaliyetlerinin yürütüldüğü bölgelerde, deniz trafiğinin yoğun olduğu bölgelerde ve açık deniz yapılarının olduğu yerlerde hasar ve kayıp riskleri mevcuttur. Bir AUV'yi hasar gördüğünde tamir edebilmek için kapsamlı bir teknik destek ekibine ihtiyaç vardır. Son olarak büyük AUV'ler, yeterli çalışma alanı ve gemiye monte fırlatma ve kurtarma sistemi (LARS) olan daha büyük bir gemi gerektirmekte ve bu da yüksek maliyetlere neden olmaktadır.

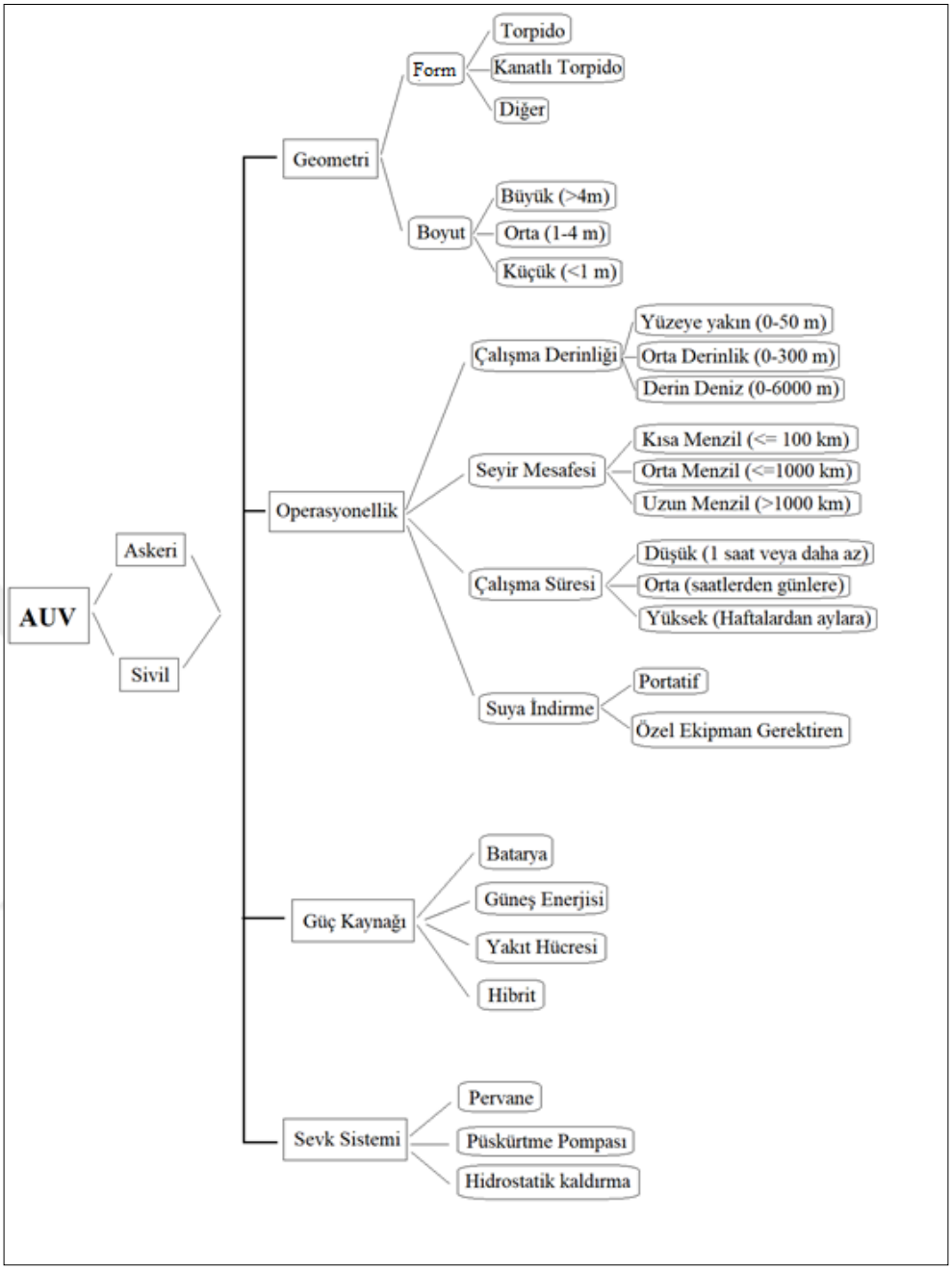
Bir AUV, su altında kendi kendini kontrol edebilmesi ve yönlendirebilmesi için çevresinden konumuna ve pozisyonuna dair gerçek zamanlı veriler elde etmek

zorundadır. Bu verileri çeşitli sensörler ve sistemler aracılığıyla elde etmektedirler. En temel haliyle her AUV, bir kontrol, navigasyon, ölçüm ve tahrik sistemine ve bu bileşenlerin muhafaza edildiği basınca dayanıklı, su geçirmez bir ortama sahip olmalıdır. Şekil 4.6'da bir AUV'nin sahip olması gereken bazı temel bileşenler gösterilmiştir (Gonzalez, 2004).

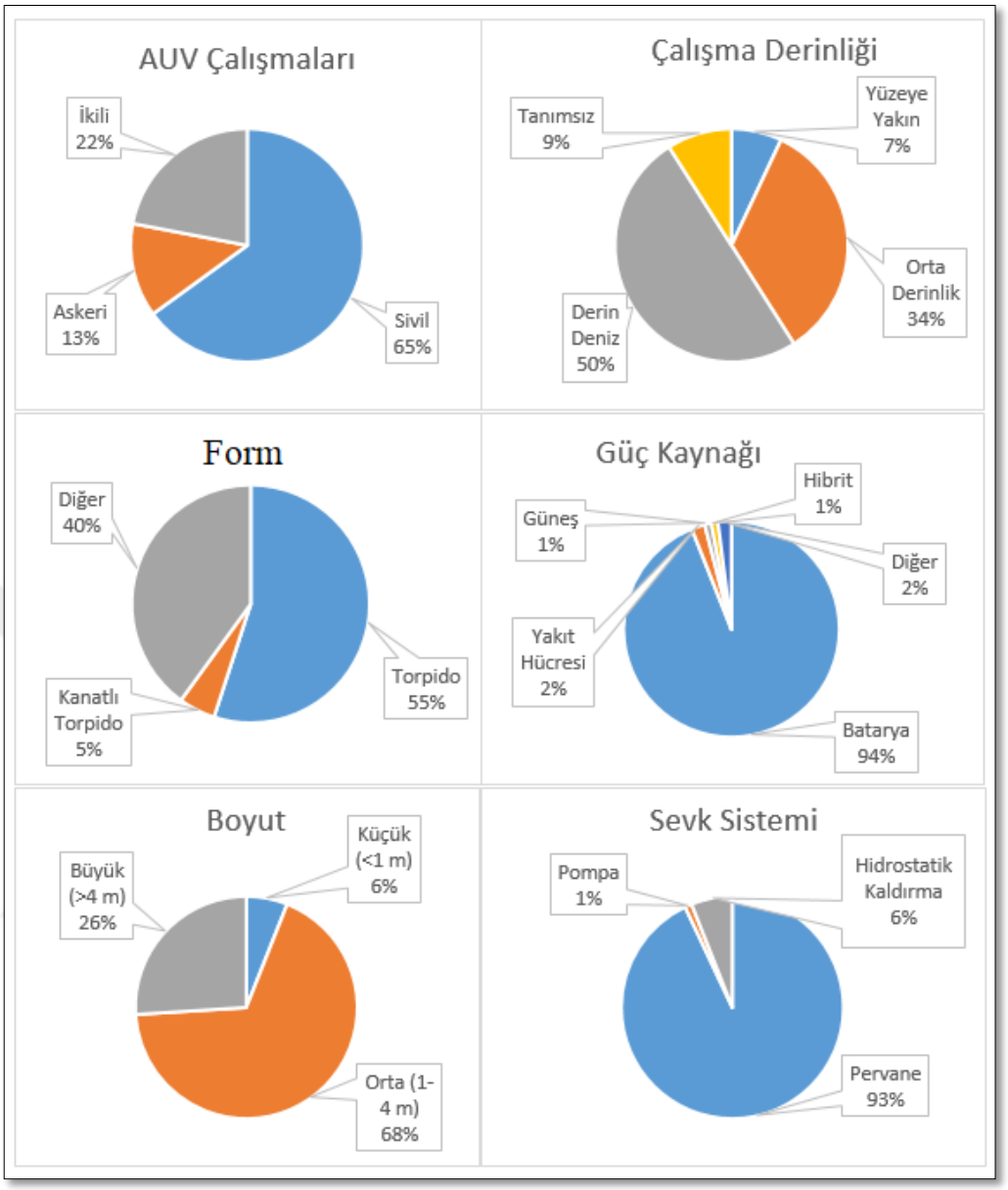


Şekil 4.6 Bir AUV'nin bileşenleri

Geniş uygulama kapsamı, çeşitli formlara, boyutlara, çalışma derinliği sınırlarına, enerji kaynaklarına ve itme araçlarına sahip AUV'lerin geliştirilmesine neden olmuştur. Misyonunun özellikleri aracın bu özelliklerini belirler (Chyba, 2009). Şekil 4.7, şu anda kullanılmakta olan AUV'lerin bir sınıflandırmasını, Şekil 4.8 ise AUV'lerin farklı sınıflara göre kullanım oranlarını göstermektedir (Alam, Ray ve Anavatti, 2014).



Şekil 4.7 AUV'lerin sınıflandırılması



Şekil 4.8 AUV'lerin farklı sınıflara göre kullanım oranları

Bir AUV'nin formu ve boyutu, aracın direnci, akış ayrımı miktarı, stabilitesi ve gerekli donanımı barındırmak için yeterli hacme sahip olması konularında belirleyicidir (Shome, Nandy, Das, Biswas ve Pal, 2008).

4.2.1 Malzeme ve Mekanik Özellikler

AUV'lerin araştırma alanlarından olan okyanusların derinliği 11000 m'ye kadar ulaşabilmektedir. Deniz yüzeyinden sadece 10 m derine inildiğinde bile basınç değeri atmosfer basıncının iki katına çıkmaktadır. Ayrıca AUV'lerin çalışma sahalarından biri olan okyanus ortamındaki kimyasalların aşındırıcılığı AUV için kullanılan malzemelerin seçimini önemli kılmaktadır. Kullanılacak malzemelerin hem mukavim hem de korozyona karşı dirençli olmak durumundadır. AUV bileşenlerinin çoğu, 1 atm basınçta kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Bu nedenle gövdenin içindeki 1 atm ile dışardaki su basıncı arasındaki farkı taşıyabilmeleri için gövdelerin yüksek mukavemete sahip olması gerekir. Mukavim malzemeler arasından yapılacak tercih de bu malzemeler aracın ağırlığını ve boyutlarını etkileyeceği için kritik bir konudur.

4.2.2 Güç Sistemleri

AUV'ler ROV'lar gibi sürekli bir güç kaynağından beslenmedikleri için sınırlı bir enerji taşıma kapasitesine sahiptirler. Güç kaynaklarının kapasitesi, AUV'nin menzilini ve yeteneklerini doğrudan etkilediği için AUV tasarımındaki en önemli faktörlerden biridir. Çeşitli enerji kaynağı alternatiflerini keşfetmek için çalışmalar yapılmasına rağmen, birincil enerji kaynağı olarak piller öne çıkmaktadır. AUV'lerdeki güç depolama sistemleri için önemli tasarım parametreleri arasında spesifik enerji (birim kütle başına depolanan enerji) ve enerji yoğunluğu (birim hacim başına depolanan enerji) sayılabilir. AUV'nin tüm enerjisini sevk sistemi için kullandığı düşünülürse, aracın menzilinin seyir hızının karesiyle ters orantılı olduğu söylenebilir.

AUV'lerde genellikle birincil enerji kaynağı olarak şarj edilebilir piller kullanılır. Bu piller, tahrik sistemini, sensörleri, iletişim sistemlerini ve yerleşik elektronik sistemleri çalıştırmak için elektrik enerjisi sağlar. Lityum-iyon (Li-ion) piller, yüksek enerji yoğunlukları ve hafiflik özelliklerinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bazı AUV'ler elektrik enerjisi üretmek için yakıt hücrelerini kullanır. Yakıt hücreleri, elektrokimyasal bir reaksiyon yoluyla elektrik üretmek için hidrojen ve oksijeni birleştirir. Yakıt hücreleri, hidrojen kaynağına yakıt ikmali yaparak sürekli güç sağlayabildikleri için pillere kıyasla daha uzun dayanıklılık sunar. Ancak, bir hidrojen depolama sistemi ve uygun güvenlik önlemleri gerektirirler.

Yüzey veya sığ su ortamlarında çalışan AUV'ler, güneş ışığından enerji elde etmek için güneş panelleri içerebilir. Güneş enerjisi tipik olarak, daha sonra AUV'nin sistemlerine güç sağlayan yerleşik pilleri şarj etmek için kullanılır. Bu yaklaşım, operasyon süresini artırır ve harici şarj kaynaklarına bağımlılığı azaltır.

Piller, yakıt hücreleri ve güneş panelleri gibi farklı güç kaynaklarının bir kombinasyonu, bir hibrit güç sistemine entegre edilebilir. Hibrit sistemler, her kaynağın avantajlarını kullanarak güç yönetimini optimize etmeyi amaçlar. Örneğin, yakıt hücreleri sürekli güç sağlayabilirken piller veya güneş panelleri en yüksek enerji taleplerinde kullanılabilir.

Belirli senaryolarda, AUV'ler endüktif şarj sistemleri ile donatılabilir. Bu sistemler, AUV'nin bir şarj istasyonuna veya su altı yerleştirme istasyonuna yaklaştığında pillerini kablosuz olarak şarj etmesine olanak tanır. Endüktif şarj, fiziksel bağlantı ihtiyacını ortadan kaldırarak görev molalarında uygun şarj sağlar.

4.2.3 Navigasyon ve İletişim

Ataletsel Navigasyon Sistemleri (Inertial Navigation System, INS): AUV'nin konumunu, hızını ve yönünü tahmin etmek için ivmeölçerler ve jiroskoplar gibi atalet sensörlerinden gelen verileri birleştirir. Ataletsel navigasyon bağımsızdır ve GPS'in kullanılamadığı ortamlarda bile sürekli navigasyon bilgisi sağlayabilir. Ancak, seyir esnasında hatalar birikir ve INS, akustik konumlandırma sistemleri veya GPS gibi harici referanslar kullanılarak periyodik olarak yeniden kalibrasyon gerektirir.

Küresel Konumlandırma Sistemi (Global Positioning System, GPS) alıcıları, su yüzeyine yakın çalışan AUV'lere entegre edilebilir. GPS, bir uydu ağından gelen sinyalleri kullanarak doğru konumlandırma bilgileri sağlar. Bununla birlikte, su altı GPS alımı sınırlıdır ve AUV'ler su altındayken genellikle diğer navigasyon sistemlerini kullanmak zorundadır..

Doppler Hız Kayıt Cihazı (Doppler Velocity Log, DVL), sudaki parçacıklardan yansıyan akustik sinyallerin Doppler kaymasını analiz ederek AUV'nin çevredeki suya göre hızını ölçer. DVL'ler kesin hız bilgisi sağlayarak navigasyona yardımcı olur ve INS kaymasını düzeltmeye yardımcı olur. Alçak irtifalarda veya deniz tabanına yakın çalışan AUV'ler için özellikle yararlıdırlar.

Akustik navigasyon sistemleri, AUV'nin sabit veya mobil işaretlere göre konumunu belirlemek için akustik sinyaller kullanır. Bu sistemler, Uzun Temel Konumlandırma (Long Baseline, LBL) ve Kısa Temel Konumlandırma (Short Baseline, SBL) içerir. LBL, sabit akustik transponderlerin deniz tabanına yerleştirilmesini içerirken, SBL, destek gemileri veya şamandıralar üzerinde hareketli transponderler kullanır. Akustik sistemler, AUV'ler için son derece hassas konumlandırma sağlayabilir, ancak altyapı konuşlandırması veya destek gemileri gerektirir.

Arazi Destekli Navigasyon (Terrain Aided Navigation, TAN), su altı arazi özelliklerini kullanarak harita oluşturmak ve gezinmek için ileriye dönük sonarlar gibi yerleşik sensörler kullanır. AUV'ler, gerçek zamanlı sonar verilerini önceden var olan haritalar veya bilinen özelliklerle karşılaştırarak konumlarını tahmin edebilir ve yörüngelerini buna göre ayarlayabilir. TAN, önemli topografik özelliklere sahip karmaşık su altı ortamlarındaki görevler için faydalıdır.

AUV'ler, navigasyon için kameralar ve görsel odometri sistemleri gibi optik sensörler de kullanabilir. Bu sensörler, AUV'nin konumunu ve yönünü tahmin etmek için ortamdaki görüntüleri yakalar veya görsel özellikleri algılar. Optik sistemler,

yüzeye yakın veya sığ su operasyonları gibi iyi görüş sağlayan ortamlarda özellikle kullanışlıdır.

4.2.4 Sensörler

AUV'ler, su altı navigasyonu, engellerden kaçınma ve haritalama için büyük ölçüde sonar sistemlerini kullanır. Sonar sistemleri, mesafeleri ölçmek, nesneleri algılamak ve su altı ortamının ayrıntılı haritalarını oluşturmak için ses dalgalarını kullanır.

Yandan Taramalı Sonar, deniz tabanının ve okyanus tabanındaki nesnelerin yüksek çözünürlüklü görüntülerini sağlar.

Çok Işınlı Sonar, geniş bir kapsama alanı sunar ve deniz tabanının ayrıntılı üç boyutlu haritalarını üretir.

AUV'ler, deniz tabanından derinliklerini veya yüksekliklerini ölçmek için derinlik sensörleri kullanır. Bu sensörler, operasyonlar sırasında belirli bir derinlik veya yüksekliği korumak için gereklidir.

Basınç Transdüserleri, farklı derinliklerdeki su basıncını ölçer ve hidrostatik basınca dayalı olarak AUV'nin derinliğini tahmin eder.

Atalet Ölçüm Birimleri (Inertial Measurement Unit, IMU), AUV'nin yönünü, hızını ve ivmesini ölçmek için ivmeölçerleri, jiroskopları ve manyetometreleri birleştirir. Navigasyon, stabilizasyon ve kontrol için kritik veriler sağlarlar.

AUV'ler genellikle su altı ortamının görsel verilerini yakalamak için kameralar ve görüntüleme sistemleri içerir. Bu sistemler, su altı denetimi, nesne tanıma ve bilimsel araştırma gibi görevler için kullanılabilir.

AUV'ler, su sıcaklığı, tuzluluk, çözünmüş oksijen seviyeleri ve pH gibi parametreleri ölçmek için çeşitli çevresel sensörler taşıyabilir. Bu sensörler, bilimsel çalışmalar, oşinografik araştırmalar ve çevresel izleme için değerli verilerin toplanmasına yardımcı olur.

Akustik modemlerle donatılmış AUV'ler, akustik sinyaller kullanarak diğer su altı sistemleri veya su üstü araçları ile iletişim kurabilir. Bu, veri aktarımı, uzaktan kontrol ve işbirliğine dayalı operasyonları mümkün kılar.

Bazı AUV'ler, kirleticilerin, çözünmüş gazların veya ilgili belirli kimyasalların varlığı dahil olmak üzere su kalitesi parametrelerini algılamak ve analiz etmek için kimyasal sensörler entegre edebilir.

4.2.5 Bağlanma Sistemleri

Fırlatma ve Geri Alma Platformları, tipik olarak gemilere veya kıyıdaki yapılara kurulur ve AUV'lerin fırlatılması ve kıyıya veya bordaya geri alınması için istikrarlı ve kontrollü bir ortam sağlar. Genellikle vinçler ve konuşlandırma/geri alma mekanizmaları gibi sistemleri içerirler.

A-Çerçeve sistemleri, bir gemi veya sabit bir platform üzerine monte edilmiş "A" harfini andıran büyük bir çerçeve konstrüksiyondan oluşur. A-Çerçeve, AUV'nin kontrollü dikey konuşlandırılmasına ve bordaya geri alınmasına izin veren bir vinç ve bir kablo ile donatılmıştır. Fırlatma ve geri alma operasyonları sırasında stabilite sağlar ve AUV'nin suya girip çıkmasını güvenli bir şekilde gerçekleştirir.

Fırlatma ve Geri Alma Sistemleri (Launch and Recovery Systems, LARS), AUV destek gemilerine entegre edilmiş özel olarak tasarlanmış sistemlerdir. AUV'yi konuşlandırmak ve geri almak için tipik olarak bir köprü veya hidrolik ya da elektrikli vinç sistemine sahip bir yapı içerirler. LARS, genellikle taşıma sırasında AUV'yi güvence altına almak için amortisörler, kenetleme mekanizmaları ve

yerleştirme istasyonları gibi sistemlere sahiptir. Bazı durumlarda, AUV'ler daha büyük gemilerde veya açık deniz platformlarında vinçler kullanılarak fırlatılır ve geri alınır.

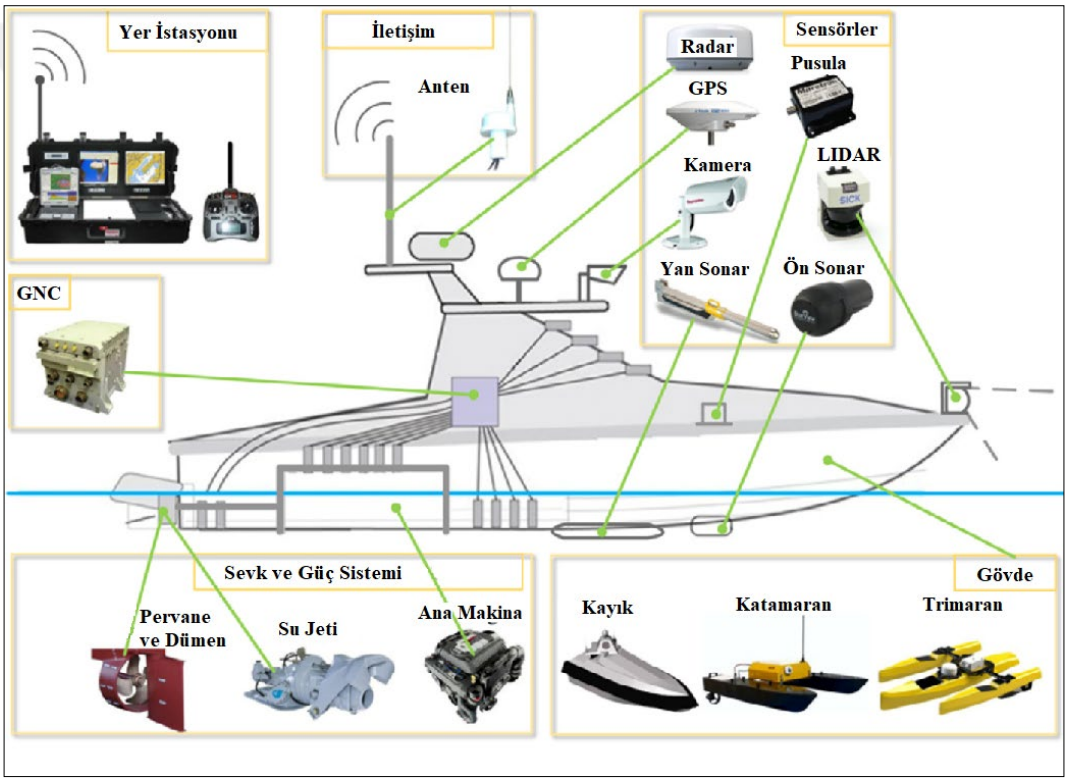
ROV (Uzaktan Kumandalı Araç) Fırlatma ve Geri Alma Sistemleri: ROV sistemleri, özellikle insan müdahalesinin gerekli olduğu durumlarda, AUV'lerin fırlatılması ve geri alınması veya kurtarılması için bazen kullanılmaktadır. ROV'ler suya konuşlandırılır ve özel ROV manipülatör kolları veya yerleştirme istasyonları kullanarak AUV'nin serbest bırakılmasına ve geri alınmasına yardımcı olabilirler.

Fırlatma ve kurtarma sistemleri, AUV'lerin güvenli ve verimli çalışmasını sağlamada çok önemli bir rol oynamaktadır. AUV'yi fırlatma ve geri alma sırasında çarpma veya hasardan korumaya yardımcı olur, dalgalı deniz koşullarında stabilite sağlar ve kontrollü konuşlandırma ve geri alma prosedürlerini etkinleştirir. Bu sistemler genellikle AUV'nin ve operasyonel ortamın özel gereksinimlerine göre özel olarak tasarlanır.

4.3 Otonom Yüzey Araçları

Çevresel incelemeler, ticari ve bilimsel çalışmalar, mühendislik projeleri ve askeri projeler son yıllarda insansız yüzey araçlarının geliştirilmesi konusunda büyük bir talebe yol açmıştır. Tehlikeli denizel şartlar, muhtemel iletişim arızaları ve sensörlerin sınırlı yetenekleri nedeniyle güvenilir navigasyon ve kontrol işlevlerinin yerine getirilmesinde karşılaşılan zorluklar tam otonom yüzey araçları yerine yarı otonom yüzey araçlarının kullanılmasına neden olmuştur. Buna rağmen insan hatasından kaynaklı etkileri en aza indirmek için tam otonom yüzey araçlarının geliştirilmesi gerekmektedir (Wang vd., 2020). ASV teknolojisinin geliştirilmesinin, işletme maliyetlerini azaltması, personel güvenliği, operasyon hızı, artan menzil, ileri düzey otonomi ve zorlu ortamlara uyum sağlamak gibi faydalar getirmesi beklenmektedir.

Uygulama alanlarına bağlı olarak ASV'ler çeşitli formlarda olabilir, ancak her ASV'de bazı temel bileşenler mevcuttur. Bunlar tekne ve yardımcı yapısal parçalar, sevk ve güç sistemi, yönlendirme, navigasyon ve kontrol sistemleri, iletişim sistemleri, veri toplama aygıtları ile yer istasyonu olarak sıralanabilir (Şekil 4.9). Tekne formları şişirilebilir gövdeli, deplasman tipi tek gövdeliler, katamaranlar ve trimaranlar olarak çeşitlendirilebilmektedir (Ødegaard, 2017). Şişirilebilir gövdeler askeri uygulamalar için uygun olabilirken deplasman tipi tek gövdeli araçların üretimi kolaydır. Katamaran ve trimaran gövdeler ise yüksek stabilite ve ek taşıma kapasitesi sağlamaları nedeniyle tercih edilmektedir.



Şekil 4.9 Bir ASV'nin temel bileşenleri

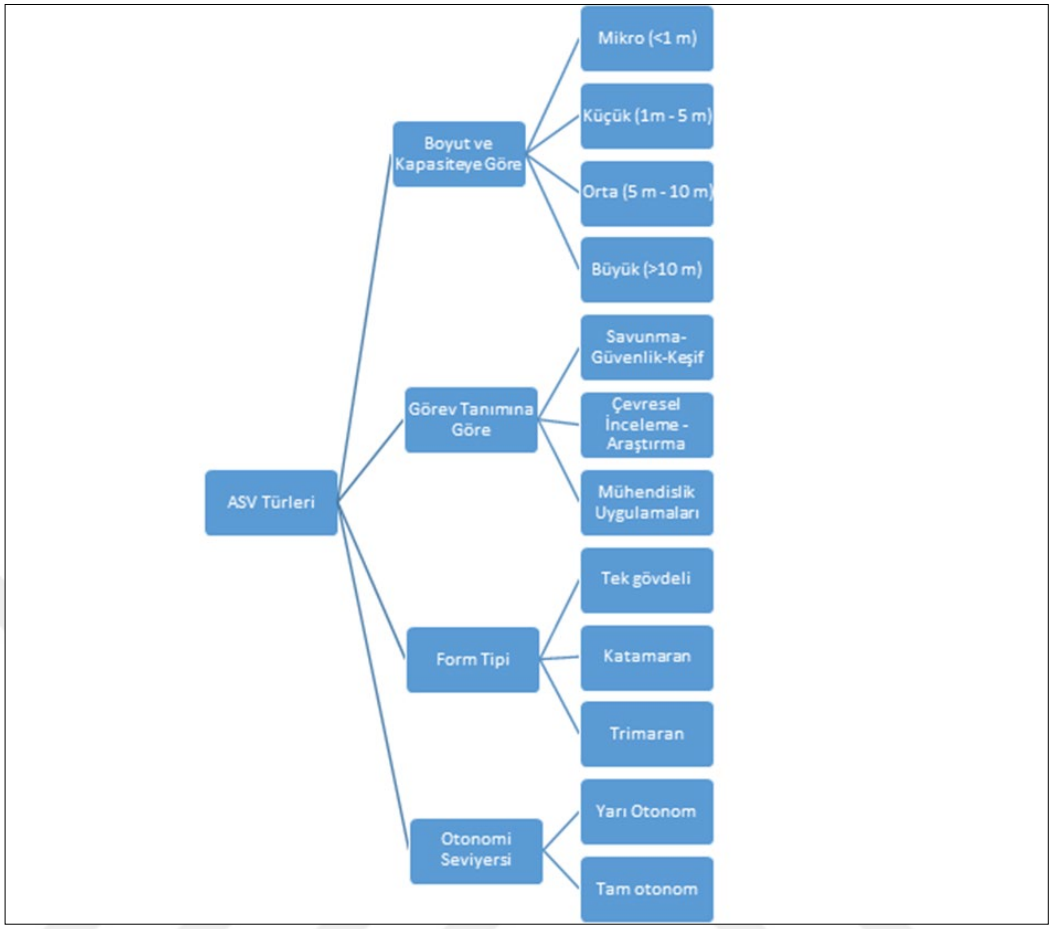
Mevcut ASV'lerin birçoğu dümen ve pervane/su jeti tahrik sistemiyle yön ve hız kontrolü sağlarken çok gövdeli ASV'ler (katamaran ve trimaranlar) iki/üç gövdeye bağlı motorların farklı hızlarda çalışmaları ile yön kontrollerini sağlamaktadırlar. Genellikle baş itici taşımamaları ASV'lerin güvenli ve hassas kontrolü konusunda bir zorluk teşkil etse de maliyetler açısından avantaj sağlamaktadır.

Yönlendirme, navigasyon ve kontrol (guidance, navigation and control, GNC) sistemleri bir ASV'nin en önemli bileşenleri olup tüm sistemin yönetiminden sorumludur. İletişim sistemleri sadece yer kontrol istasyonları ve diğer araçlarla iletişimi değil, aynı zamanda çeşitli sensörler ve ekipmanlarla iletişimi de içerir.

IMU (Inertial Measurement Unit) ve GPS (Global Positioning System) gibi veri toplama ekipmanları ise yukarıda bahsedilen bileşenlerle beraber ASV'nin sağlıklı bir şekilde çalışmasını sağlamak ve performansını artırmak için diğer sistemlerle birlikte kullanılır. Bunların yanında ASV'nin görev tanımına uygun olacak şekilde kameralar, sonar, sıcaklık ve nem sensörleri de araca yerleştirilir.

Son olarak yer istasyonları, karada sabit bir konumda veya mobil bir araçta veya bir gemide bulunurken yönlendirme-navigasyon-kontrol konusunda ASV'ye rehberlik ederler. ASV ve yer istasyonu arasındaki iletişim kablosuz sistemler vasıtasıyla sağlanır. Yer istasyonlarında ASV'nin ve ASV üzerindeki ekipmanların anlık durumuna dair veriler izlenirken yönlendirici komutlar da gönderilebilir.

Şekil 4.10'da ASV'ler için yapılan bir sınıflandırma gösterilmiştir. Bunun yanında Lloyd's Register'a ait otonomi seviyelerine göre yapılan bir diğer sınıflandırma Şekil 4.11'de verilmiştir (Komianos, 2018).



Şekil 4.10 ASV'lerin sınıflandırılması

Otonomi Düzeyi	Karar	Aksiyon	İstisnalar
0	Manuel	Manuel	Manuel
1	Döngüye insan dahil (Araç içi veriler ile)	Manuel	Manuel
2	Döngüye insan dahil (Araç içi ve dışı veriler ile)	Manuel	Manuel
3	İnsan denetimi (Gemi düzeyi)	İnsan denetimi (Gemi düzeyi)	İnsan denetimi (Gemi düzeyi)
4	İnsan denetimi gerektiren (Geniş düzey)	İnsan denetimi gerektiren (Geniş düzey)	İnsan denetimi gerektiren (Geniş düzey)
5	Nadiren denetim gerektiren	Nadiren denetim gerektiren	Nadiren denetim gerektiren
6	Denetim gerektirmeyen	Denetim gerektirmeyen	Denetim gerektirmeyen

Şekil 4.11 İngiliz Loydu'nun otonomi seviyesine göre yaptığı ASV sınıflandırması

BÖLÜM BEŞ
OTONOM DENİZ ARACI FORMLARININ HAD İLE GELİŞTİRİLMESİ

5.1 Giriş

Otonom su üstü araçları (ASV), denizlerin derinliklerinden ayrıntılı oşinografik ve sismik verilerin toplanması için önemli bir fırsat sunmaktadır. Bu ASV'ler için en önemli tasarım faktörleri, direnç kuvvetini azaltmak ve ilgili itme kuvvetini arttırmak, yani sevk verimliliğini yükseltmektedir. Bir ASV'nin form direncinin doğru öngörülmesi, aracın güç gereksinimini ve dolayısıyla aracın operasyon menzilini belirlemek için hayati öneme sahiptir. Diğer bir tasarım amacı, gövdenin düşük maliyetli ve mekanik olarak dayanıklı olmasıdır. Genel olarak, bir sıvıya batırılmış hareketli nesneler, viskoz basınç ve sürtünme direnci olmak üzere iki bileşene ayrılabilen viskoz dirence maruz kalır. Serbest sıvı yüzeyinde yüzüyorlarsa, bu nesneler ayrıca dalga direncini yenmek durumundadırlar. SWATH tekne modeli deniz yüzeyinde yüzdüğü için, bahsi geçen direnç bileşenlerinden eşzamanlı olarak etkilenirler. Dolayısıyla bu tip teknelerin analizi, sıvıya batırılmış nesnelerin simülasyonundan daha karmaşıktır. Bu bağlamda, bu araştırmada gerçekleştirilen HAD analizlerinin doğrulanması için SWATH tekne formu seçilmiş ve aşağıdaki kaynaklardan yararlanılmıştır.

Volker (2000) ve Poehls (1990), gemi direnci ve sevk gücü, manevra, denizcilik yeteneği, gemi titreşimlerinin hidrodinamik yönleri, hidrodinamik özellikler ve yakıt verimliliği seçeneklerinin yanı sıra direnç hesaplama yöntemlerindeki yeni gelişmeleri inceleyerek deneysel ve sayısal yöntemleri ele almışlardır. Teknelerin dayanıklılık ve denizcilik özelliklerine ilişkin veriler bu kaynaklardan elde edilmiştir.

Li ve Bachmayer (2013), Newfoundland ve Labrador'daki kıyıya yakın ve şiddetli okyanus koşullarında operasyon yürütebilecek sağlam, otonom yüzey aracını ayrıntılı olarak tanımlamışlardır. Yerleşik iletişim ve kontrol sistemini oluşturmak için güvenilir Denetleyici Alan Ağı protokolü uygulanmıştır.

Dunbabin, Grinham ve Udy (2009), çeşitli su kalitesi parametrelerinin ve sera gazı emisyonlarının değerlendirilmesi için tasarlanmış yenilikçi bir otonom deniz yüzeyi aracı üzerinde çalışmışlardır. Bu araç ile nehirler, barajlar ve göller gibi ortamları kapsayan iç suların izlenmesi amaçlanmaktadır. Güneş enerjisiyle çalışan bir katamaran olan araç, rotası boyunca su kolonu ölçümlerine ilişkin veri toplayabilmektedir. Çalışma, aracın tasarımı ve operasyonel yönlerinin yanında lazer tabanlı engellerden kaçınma kontrol sistemi gibi özellikleri de barındırmaktadır.

Brizzolara, Bovio, Federici ve Vernengo (2011) tarafından yapılan çalışmada, yeni bir otonom deniz yüzeyi aracı serisi için kavramsal tasarımlar sunulmuştur. Geleneksel olmayan SWATH sınıfının bir parçası olan bu araçlar, yüksek hızlı operasyon sırasında minimum sürtünme katsayılarına ulaşmak için titizlikle optimize edilmiştir. Çalışma, tümü operasyonel hızlar sırasında sevk gereksinimlerini azaltmayı amaçlayan, gemi formlarının şekillendirilmesinde kullanılan hidrodinamik özelliklerin ve optimizasyon tekniklerinin oluşturulmasına odaklanmaktadır.

Bertram'ın "İnsansız su üstü araçları - Bir anket" çalışması (2008), hem insansız deniz araştırmalarını hem de üretilmiş veya üretilmesi amaçlanan USV'leri kapsamaktadır. Bu alandaki çalışmalar genellikle otonomi düzeyleri sınırlı ve kıyı, göl ve baraj gibi sularda seyredecek küçük boyutlu araçlar üzerinde yapılmıştır. ASV'ler üzerinde yoğunlaşan gelişmelerin çoğu ABD kaynaklıdır.

Othman'ın araştırması (2015), insansız su üstü araçlarının çeşitli deniz koşullarında çalışma kabiliyetini ve bu sistemlerin kabul edilmesini sağlayan ileri teknolojileri tartışmıştır. Yazar, USV'leri önceki konseptlerinden mevcut tasarımlarına kadar, işlev ve uygunlukları açısından karşılaştırmıştır.

Molland, Wellicome ve Couser (1994) sakin su koşullarında kapsamlı bir katamaran modeli serisinin test sonuçlarını sunmuşlardır. Bu deneysel program, üç katamarandan üretilen bir dizi modelin incelendiği daha önceki bir çalışmanın devamı niteliğindedir. Bu çalışma ile önceki araştırma belirli genişlik/draft oranları aralığında geniş bir boy/deplasman oranını içerecek şekilde genişletilmiştir.

İnsel, Molland ve Wellicome (1970) Kelvin dalga sistemi ve kanal derinliği ile genişliğinin etkileri de dahil olmak üzere uzak alan dalga katsayılarını lineer teori kullanarak ele almışlardır.

Broglia vd. (2015) yüksek hızlı bir katamaran formu geliştirmiş ve bununla HAD analizleri gerçekleştirmiştir.

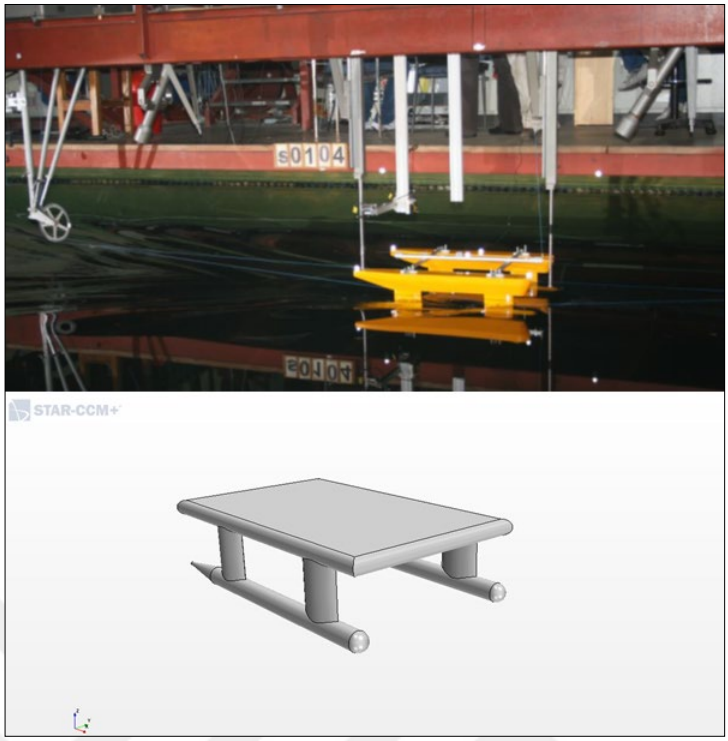
DELFIM, Alves vd. (2006) tarafından oşinografik veri toplamak ve bir denizaltı aracı ile bir destek gemisi arasında akustik geçiş gerçekleştirmek için geliştirilmiş otonom bir deniz yüzey aracıdır. Makale, son kullanıcıların denizde bilimsel görevleri programlamasına olanak tanıyan görev kontrol sistemi ile birlikte aracın navigasyon, yönlendirme ve kontrol sistemlerini açıklamaktadır.

5.1.1 SWATH, Torpido ve ROV Modelleriyle Validasyon Çalışması

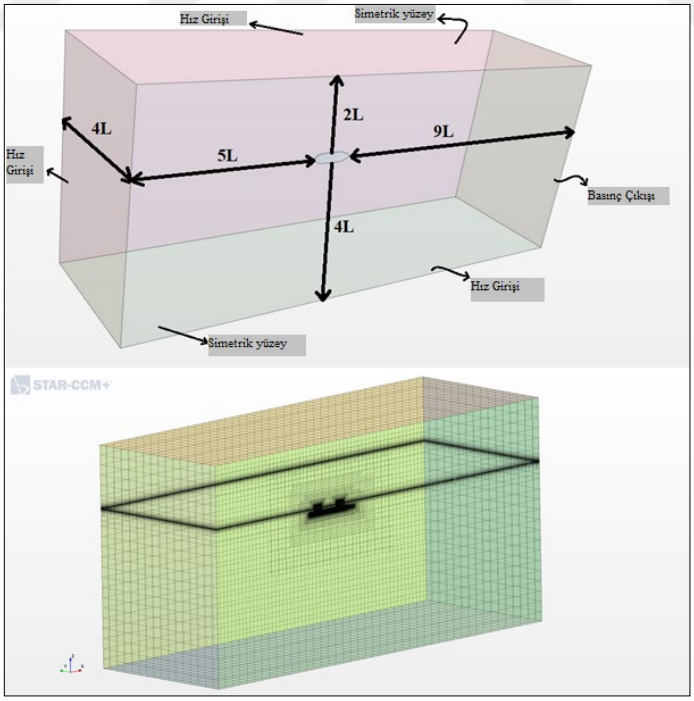
Bu çalışmada yürütülen HAD analizlerinin validasyonu için Begovic vd. (2015) tarafından incelenen SWATH formundaki tekne modellenmiştir. Uygun türbülans modeli ve uygun sınır şartlarının uygulandığı analizde ulaşılan sonuçların daha önce yapılan çekme tankı deneyi sonuçlarıyla örtüştüğü görülmüştür. Bahsi geçen SWATH formundaki modelin boyutları Tablo 5.1'de verilmiştir. HAD analizi için hazırlanan model Şekil 5.1'de, analizin yapıldığı hesaplama hacmi ve ağ yapısı Şekil 5.2'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1 SWATH formundaki modelin boyutları

Boy (m)	0,970
Çap (m)	0,060
Kuyruk Uzunluğu (m)	0,197
Islak Yüzey Alanı (m^2)	0,167
Ayak uzunluğu (m)	0,150
Deplasman (kg)	5,6



Şekil 5.1 Begovic tarafından gerçekleştirilen test ve SWATH formundaki model

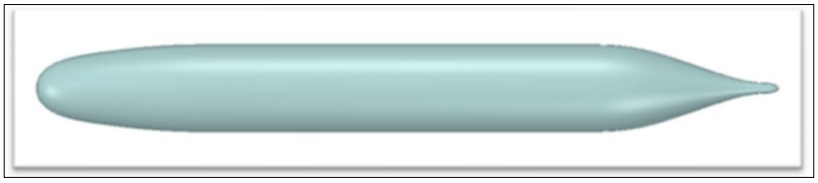


Şekil 5.2 SWATH formundaki modelin HAD analizi için oluşturulan hesap hacmi

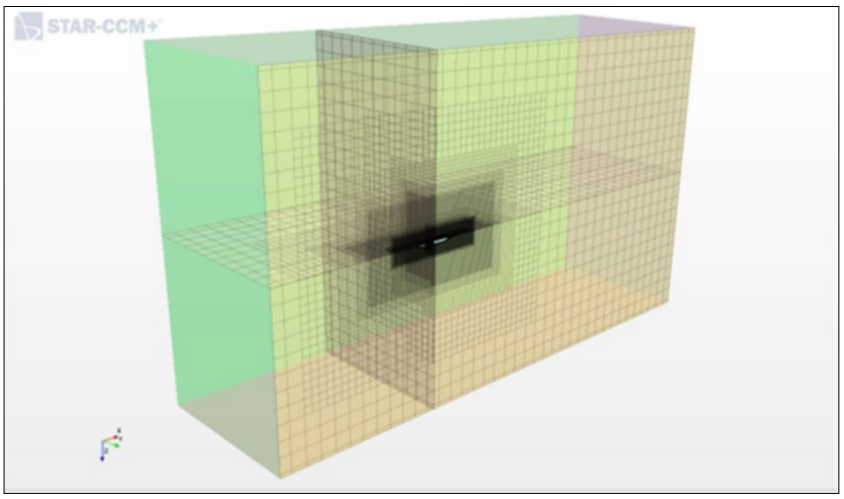
Su altında çalışan AUV'lerin enerji tüketimi, doğrudan araçların formu ve konumu ile ilgilidir, çünkü enerjinin önemli bir bölümü, ileri doğru hareket için itme kuvveti oluşturmaya ve sabit bir derinlikte kalmaya harcanır. AUV'lerin hidrodinamik özelliklerini ele alan çok sayıda makale vardır. Myring (1976), çeşitli torpido formları için gerçekleştirilen sayısal analizleri doğrulamak için çalışmasında deneysel verileri kullanmıştır. Bu kapsamda eksenel simetrik akışta gövde formundan etkilenen direnç kuvvetini belirlemek için bir yöntem geliştirilmiştir (Gürsel vd, 2017). Yukarıda bahsedilen yöntemin uygulanabilmesi için detaylı tekne geometrisi, serbest akış koşulları ve geçiş noktalarının tanımlanması yeterlidir. Karim vd (2008), viskoz sürtünmenin hesaplanması için Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemlerine dayanan sonlu hacim yöntemiyle analizler gerçekleştirmiştir. DREA adlı AUV model serisi üzerinde sayısal analizler yürütülmüş ve gövdelerin etrafındaki ve arkasındaki türbülanslı akış, . k-ω türbülans modeli kullanılarak simüle edilmiştir. Song vd (2011). yaptıkları çalışmada, HAD yöntemini kullanarak tipik bir Myring formuna sahip AUV'lerin direnç tahminleri için uygun türbülans modelini belirlemişlerdir. AUV modelleri için üç boyutlu viskoz akışın direnç analizi, farklı viskoz modellerle RANS denklemleri çözülerek gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlarla yapılan karşılaştırma sonucunda Kayma Gerilmesi Taşınması k-ω türbülans modelinin uygulanacak direnç tahmini için en uygun algoritma olduğu sonucuna varılmıştır. Allotta vd (2015). AUV'lerin tasarımı için benimsenen metodolojileri tartışmıştır. Ayrıca araçlar için ön tasarım kriterleri ve tasarım prosedürleri ile tahrik sistemlerinin test edilmesi anlatılmıştır. THESAURUS projesinin beklenen performansına ve gerekliliklerine göre, bir AUV'nin tipik özellikleri, düşük viskozite direnci ve yüksek manevra kabiliyetinin yanı sıra navigasyon yeteneklerini içermesidir. Won vd (2015). nozullu AUV'lerin çeşitli formları altında ideal tasarımı HAD simülasyonları aracılığıyla belirlemiştir. Bu kapsamda sevk sisteminin verimliliğini artırmak için AUV'lerin direnç kuvvetini ve pervane performansını etkileyen çeşitli faktörler incelenmiştir. HAD analizinin performansını artırmak için Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Joung vd. (2012) çalışmalarında, verilen belirli bir hız aralığında geliştirilmekte olan bir AUV'nin form direncini bulmak için HAD analizini kullanan bir prosedür tanımlamışlardır. HAD analizinin sonuçları, AUV gövdesi ve pervanesi üzerindeki hız ve basınç alanı

vb. dağılımını ortaya çıkarmıştır. Ayrıca, toplam direncini azaltmak üzere AUV profilini optimize etmek için bir metodoloji sunulmuştur.

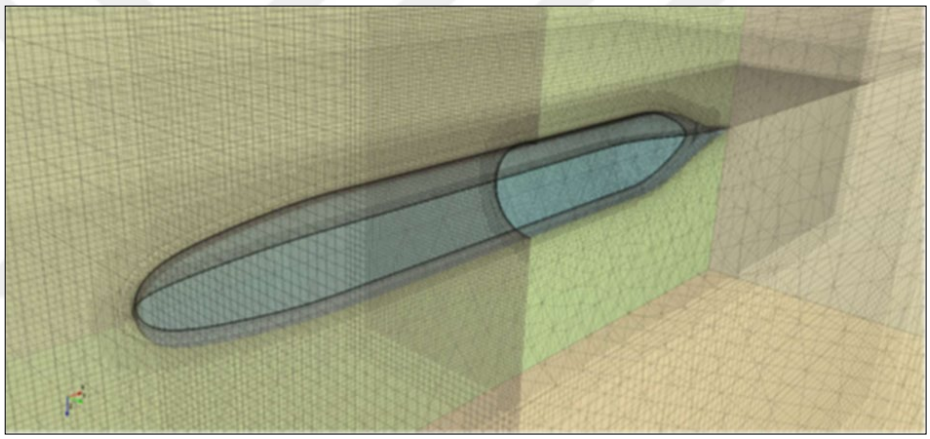
Tasarlanacak AUV formunun gövde direncini tahmin etmek için öncelikle DARPA Suboff modeli (Şekil 5.3) hakkındaki iyi bilinen araştırmalar ayrıntılı olarak incelenmiştir. Şekil 5.4'te hesap hacmi ve Şekil 5.5'te ağ yapısı görülen bu model STAR CCM+ ticari yazılımı aracılığıyla analiz edilmiştir. Daha sonra elde edilen analiz sonuçları fiziksel çekme tankı testleri ile doğrulanmıştır. Daha sonra, belirli torpido şekilleri ve biyomimikri metodolojisi aracılığıyla çeşitli AUV formları üretilmiştir. Bunun için iki farklı balina ve bir köpekbalığı türü seçilerek modellenmiştir. Optimum AUV formunu belirlemek için üretilen tüm modeller sayısal olarak analiz edilmiştir. Bir AUV'nin formunu geliştirmek için birçok farklı yöntem kullanılabilir. Şüphesiz bunlardan en etkili olanı, tercihen mevcut test sonuçları ile inşa edilmiş denizaltı tasarımlarının kullanılmasıdır. Ancak biyomimikri metodolojisini de kullanarak tasarımı çok daha etkili hale getirmek mümkündür. Bu çalışmada incelenen AUV'lerin formları kısmen biyomimikri metodolojisi ile geliştirilmiştir. Bu yeni AUV tasarımı, bir AUV'nin tipik özelliklerini korurken, bir ROV gibi üstün manevra kabiliyeti özelliklerine sahip olmalıdır.



Şekil 5.3 DARPA Suboff denizaltı modeli



Şekil 5.4 DARPA Suboff denizaltı HAD analizi için hesap hacmi

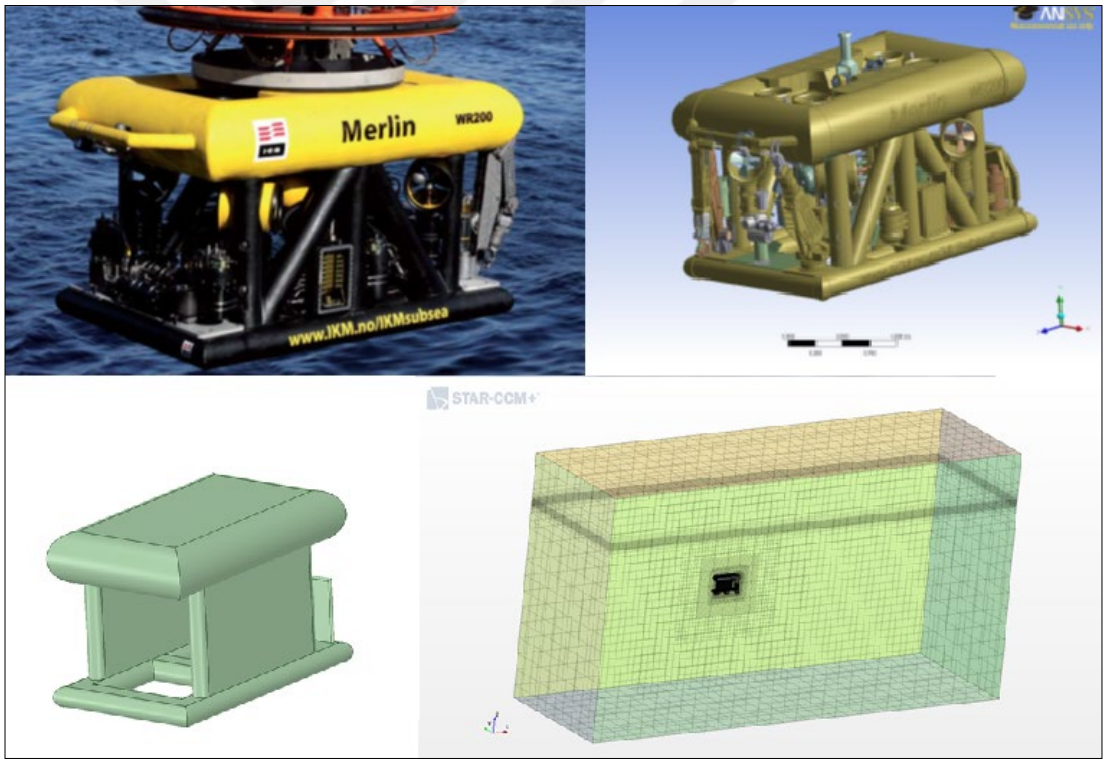


Şekil 5.5 DARPA Suboff gövdesinin ağ örgülü modeli

Uzaktan Kumandalı Araçlar (ROV), farklı denizaltı endüstrilerinde kullanılan insansız su altı araçlarıdır. Özellikle açık deniz hidrokarbon arama ve çıkarma endüstrisinde ROV'lar önemli bir rol oynamaktadır. Araç, bir veri kablosu aracılığıyla bir yüzey aracında bulunan bir operatör tarafından kontrol edilir. Genellikle ROV dikdörtgen bir çerçevenin içine veya etrafına inşa edilmiştir. Daha ağır olan ekipmanlar, ağırlık merkezinin kaldırma kuvveti merkezinden daha aşağıda olması ve dolayısıyla yeterli stabilitenin sağlanması için mümkün olduğu kadar alt çerçeveye yakın yerleştirilir. ROV'lara belirli görevler için farklı araçları taşıyabilen güçlü hidrolik kollar, ışıklar ve kameralarla birlikte monte edilmektedir.

Şekil 5.6'da modeli ve hesap hacmi ile beraber görülen Merlin WR200, hizmet sınıfı ROV olarak tasarlanmıştır. Araç, elektrikli tahrik sistemi ile tüm kontrol ve güç sistemlerinin üst kısma yerleştirilmesi avantajına sahiptir. Bu nedenle daha az bakım, daha fazla güvenilirlik ve güç verimliliği elde edilir. Tamamen elektrikli bir tahrik sistemi, geleneksel ROV'larda ortaya çıkan hidrolik sıvı sızıntısını en aza indirme avantajına da sahiptir. Merlin WR200 ROV'un ana boyutları Tablo 5.2'de verildiği gibidir.

ROV'un basitleştirilmiş bir modeli kullanılarak, ROV'un çevresinden ve içinden geçen akışın davranışını etkileyen kritik parçalar belirlenebilir. Bununla birlikte, modelin kendisi HAD analizi için kullanılamayacak kadar karmaşıktır ve bu nedenle basitleştirilmiş model kullanılmıştır.



Şekil 5.6 MERLIN ROV aracı, aracın modelleri ve HAD analizi hesap hacmi

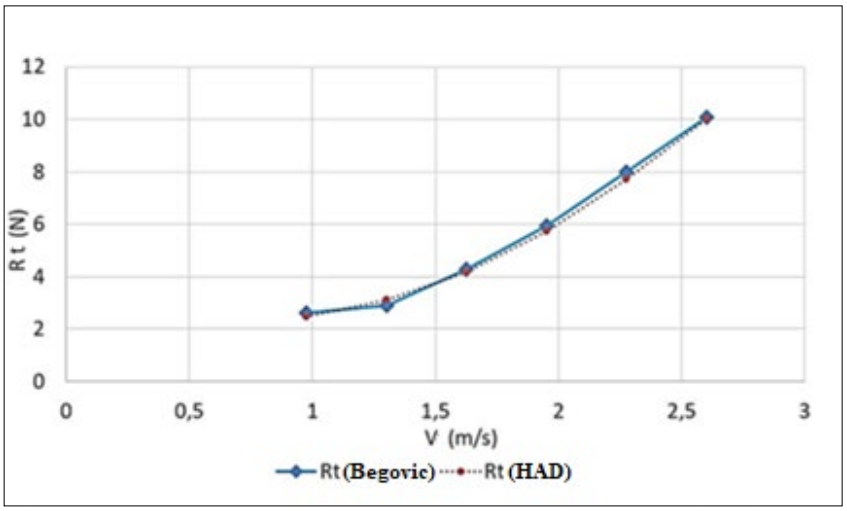
Tablo 5.2 MERLIN ROV aracına ait temel özellikler

Dalış derinliği	3000 m

Boy	2,8 m
Genişlik	1,8 m
Yükseklik	1,7 m
Ağırlik	2800 kg

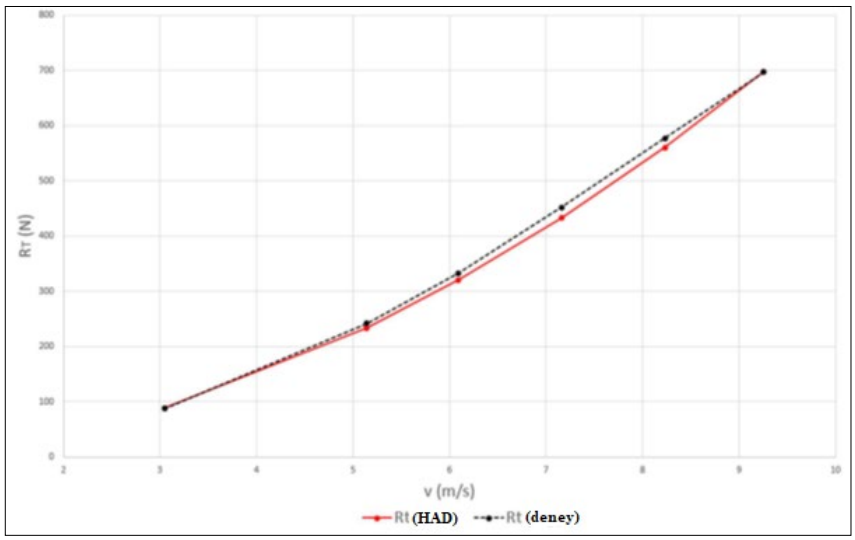
5.1.2 Sonuçların Değerlendirilmesi

HAD analizleri sonunda ulaşılan sonuçların deney sonuçları ile karşılaştırması Şekil 5.7'de verilmiştir. Bu şekilde HAD analizlerinde kullanılan modelin uygunluğu doğrulanmıştır. HAD analizi için seçilen türbülans modeli, StarCCM+ yazılımında bulunan "Kayma Gerilmesi Taşınımı k-ω" modelidir. Bu model, standart k-ω türbülans modellerinde tipik olarak iyi tanımlanmış bir türbülans viskozite formülü kullanarak sadece kayma gerilmesi değerlerini çözmekle kalmaz, aynı zamanda akış ayrılması fenomeninin simülasyonunu da gösterir. Bu geliştirmeye katkıda bulunan bir faktör, türbülanslı viskozite formülündeki ayarlamaların sınır tabakası bölgesiyle sınırlı olmasıdır. Ek olarak model, yüzeyden uzaklaştıkça k-ε modelinden geçiş yaparak karma bir davranış sergiler. Begovic'in (2015) iki serbestlik dereceli bir modelin simülasyonu ile ilgili çalışması bağlamında, modelin stabilitesini v_1 = 1,952 m/s ve v_2 = 2,603 m/s'de kaybettiğini saptamıştır. Bu durum, modelin önemli ölçüde kıç trim yapmasına yol açmıştır. Kıça trim durumu, suyun üzerinde kalması gereken kıç güverte yapısı yüzeyin altına inene kadar devam etmiş ve sonuç olarak bir düzeltme momenti oluşmuştur. Sonuçta aracın baş tarafında hem su üstünde hem de altında yüksek pozitif basınç bölgeleri oluşurken, kıçta pervanenin önünde negatif basınç bölgeleri oluşmuştur. SWATH tekneleri, bu kıç trimine karşı koymak için gerekli olan kaldırma kuvvetinden yoksundur. SWATH, taşıyıcı direkler üzerindeki nispeten küçük su hattı alanları nedeniyle dalga direncine karşı avantaj sağlamasına rağmen, aynı özelliği nedeniyle ağırlık dalgalanmalarına karşı aşırı duyarlı hale gelir. Bu hassasiyet, sık sık ekipman değişikliğine uğrayan, dolayısıyla farklı görevleri yerine getirmek için ağırlığı değişen bir deniz aracı için hızlı paralel alçalma/yükselme ve kaçınılmaz bir trim sorunu gibi zorluklara sebep olur. Bu zorluklar göz önüne alınarak çalışmada SWATH konfigürasyonunun yanı sıra katamaran tekne formunu da incelenmiştir.



Şekil 5.7 HAD analizleri ile çekme tankı deneylerinin karşılaştırılması

Viskoz bir sıvı içinde hareket eden nesneler, viskoz basınç ve sürtünme direncinden oluşan viskoz direnç ile karşılaşır. Bu nedenle insansız su altı araçlarının narin bir forma sahip olması çok önemlidir. Bu çalışmadaki simülasyonlarda uygulanacak HAD yöntemi, esas olarak, ilgili konuda yapılan HAD analizlerinin sonuçlarını doğrulamak için sıklıkla kullanılan DARPA Suboff Denizaltına ait test sonuçları ile doğrulanmıştır. Bu nedenle DARPA denizaltısı, STAR CCM+ yazılımı aracılığıyla modellenmiş ve analiz edilmiştir. Şekil 5.3, DARPA Suboff denizaltısının modelini gösterirken, Şekil 5.4 ve Şekil 5.5 sırasıyla bu sistemin analiz edilen hesaplama hacmini ve ayrıklaştırılmış modelini göstermektedir. Bir doğrulama olarak, Şekil 5.8, bu çalışmada yürütülen HAD analizinin sonuçları ile bu denizaltı modelinin Takahashi ve Sahoo (2019) tarafından yürütülen deneylerinin sonuçları arasında iyi bir uyum olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.8 DARPA Suboff modelinin deneysel verileri ve HAD analizin karşılaştırılması

Aynı ağ oluşturma tekniği ve türbülans modeli yaklaşımı DARPA ve SWATH analizlerinde çok iyi sonuçlar verdiğinden bu tekniğin ROV için de iyi sonuçlar vermesi beklenmektedir.

5.2 Katamaran ve Ponton Bot Modelleriyle Ayrıklık Oranı İncelenmesi

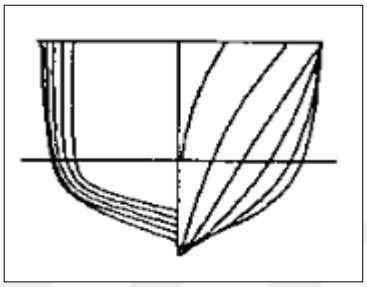
5.2.1 Katamaran Modeli

Hem açık deniz hem de kıyı bölgelerindeki deniz yapıları, boru hatları, limanlar ve yat limanlarıyla ilgili mühendislik çalışmalarının temelini oluşturan temel jeolojik ve jeofizik araştırmalar, geleneksel olarak, kapsamlı bir şekilde donatılmış araştırma gemilerini içeren, emek yoğun insan odaklı etüdlere dayanmaktadır. Ancak bu geleneksel yaklaşım, öngörülemeyen hava koşulları nedeniyle hem maddi hem de hayati riskler barındırmaktadır. İnsansız deniz araçları aracılığıyla denizel jeolojik, jeofizik ve sismik araştırmalar yapmak, işletme ve araştırma giderlerini azaltma imkanı sunmaktadır. Ölçüm hassasiyetinin artması, projelerin hızlanması ve güvenlik risklerinin azalması da bu araçların getireceği çeşitli avantajlardan birkaçıdır. İnsansız deniz araçlarının, yalnızca jeofiziksel verileri değil, aynı zamanda fiziksel, kimyasal ve biyolojik bilgileri de elde edebilen sensör teknolojileriyle donatılması mümkündür. Bu şekilde, geleneksel olarak araştırma gemileri tarafından

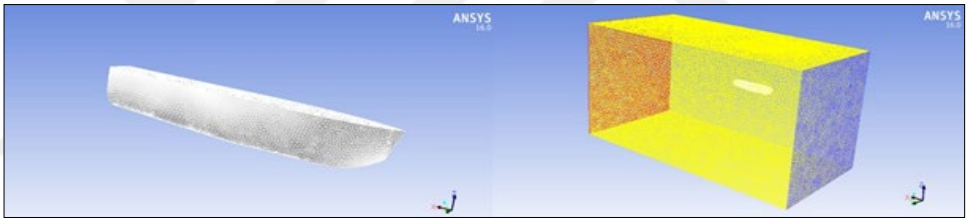
gerçekleştirilen yüksek maliyetli araştırmaların önemli ölçüde daha düşük maliyetlerle ve daha hızlı geri dönüş süreleriyle yapılması hedeflenmektedir. Bu tür araçların kompakt ve portatif doğası, kıyı araştırmalarında ve hatta nehirler, barajlar ve göller gibi iç su kütlelerinde kullanılmalarına olanak tanır. Düşük bakım ve onarım maliyetlerine sahip olan bu deniz araçları, karada tek bir operatör tarafından çalıştırılabilmekte ve mürettebat ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. Uyarlanabilir platformlar olarak da nitelendirilebilecek insansız deniz araçlarının çalışma alanları, jeofizik çalışmalarla sınırlı değildir; ticari balık stoku araştırmaları, balıkçılık yönetimi, su altı arkeolojisi araştırmaları ve gemi enkazı araştırmaları gibi alanlara önemli katkılar sunabilmektedirler. Öngörülen görevlere, operasyon bölgelerine ve insansız bir deniz aracı için gerekli donanıma bağlı olarak, optimum spesifikasyonlar, mevcut literatürde belirtildiği gibi, yaklaşık L_{OA} = 1500-2400 mm'lik bir uzunluk ve V_S = 7-11 knot arasında bir servis hızını içerir. .

Temel akışkanlar mekaniği ilkeleriyle uyumlu olarak, yüzer durumdaki bir deniz aracının pruvası, yüksek bir pozitif basınca maruz kalırken, kıç tarafına doğru bir negatif basınç bölgesi ortaya çıkar. Bu fenomen, geminin yüzme merkezini dikkatlice tasarlayarak ve ayrıca pruva ve kıç formunu uygun bir şekilde oluşturarak kısmen hafifletilebilir. Sevk karakteristiklerini geliştirerek, dengeli bir seyiri kolaylaştıran belirli bir dereceye kadar kıç trimi elde edilebilir. Bununla birlikte, SWATH konfigürasyonunu kullanan deniz taşıtları, doğası gereği, kıç tarafının bu tür bir denge için gerekli olan batmazlık özelliklerinden yoksundur. Sonuç olarak, hız arttıkça deniz aracı, artan boyuna instabilite nedeniyle daha da şiddetlenen kıç trimiyle seyredecektir. Dalga direncine daha az maruz kaldığı için yüksek hız performansıyla tanınan SWATH gemi tasarımı, taşıyıcı ayakların kısıtlı su hattı alanları sayesinde ağırlık değişikliklerine karşı yüksek hassasiyet sergilemektedir. Bu nedenle hafif ağırlık değişiklikleri bile belirgin dalma veya düzeltme tepkilerini harekete geçirir. Bu özellik, sık sık ekipman modifikasyonlarına maruz kalan, dolayısıyla sürekli olarak ağırlık dalgalanmalarına maruz kalan bir tekne için özellikle elverişsizdir. Söz konusu tekne formunun yukarıda belirtilen önemli sakıncalarından dolayı, bu sakıncaları genel olarak yapısında barındırmayan katamaran tekne formunun incelenmesine karar verilmiştir.

Molland vd. (1994) çalışmalarında ürettikleri narin formların analizini yapmış ve geliştirilmiş tekne formlarının analizinden sonra, bunların narin formları sayesinde spor ve gezinti amaçlı yatların tasarımında kullanılabilecekleri anlaşılmıştır (Şekil 5.9). Şekil 5.10'da Molland vd. tarafından geliştirilen tekne formuna ait model ve hesaplama hacmi gösterilmiştir.

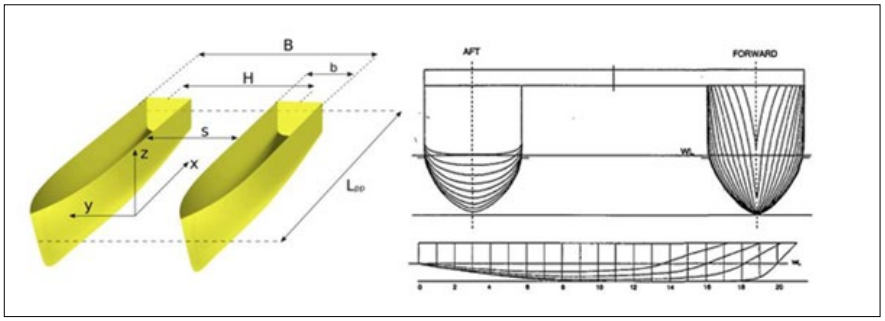


Şekil 5.9 Molland tarafından geliştirilen tekne formu

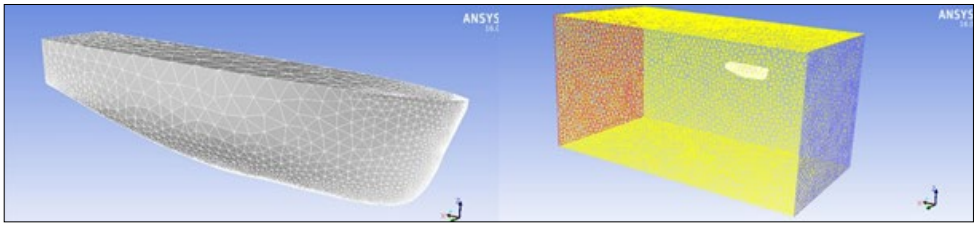


Şekil 5.10 Molland tarafından geliştirilen formun modeli ve hesaplama hacmi

Broglia vd (2015) tarafından geliştirilen katamaran formunun (Şekil 5.11) modellenmesi ve hesap hacminin oluşturulmasından sonra (Şekil 5.12) diğer formların oluşturulması aşamasına geçilmiştir.



Şekil 5.11 Broglia tarafından geliştirilen katamaran tekne formu



Şekil 5.12 Broglia tarafından geliştirilen katamaranın modeli ve hesaplama hacmi

Matematiksel olarak tanımlanmış bir gövde formu olmanın yanı sıra, Wigley tekne formu, özellikle dalga direnci ve sınır tabakası akışlarının hesaplamalarında hesaplamalı akışkanlar dinamiği kodları için test senaryosu olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bunun nedeni, bu gövdenin tam olarak ticari yazılımlarla modellenebilmesi ve modeller etrafındaki akışı açıklayan kapsamlı deneysel verilerin mevcut olmasıdır. Denklem 5.1, modelin su altı gövde şeklini tanımlar.

$$y(x,z) = \frac{B}{2}\left\{1 - \left(\frac{2x}{L}\right)^2\right\}\left\{1 - \left(\frac{z}{T}\right)^2\right\} \tag{5.1}$$

Bu denklemde

x : Gemi ortasından uzaklık (başa doğru pozitif)

y : Yarı genişlik (x, z)

z : Taban çizgisinden ölçülen mesafe (omurga yönünde pozitif)

L : Teknenin boyu

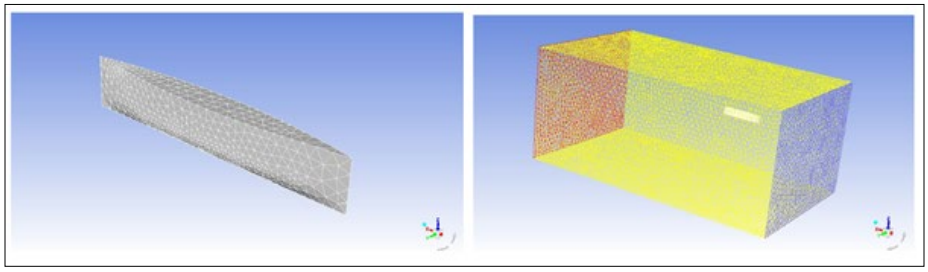
B : Gövde genişliği

T : Teknenin draftı

boyutlarını ifade etmektedir.

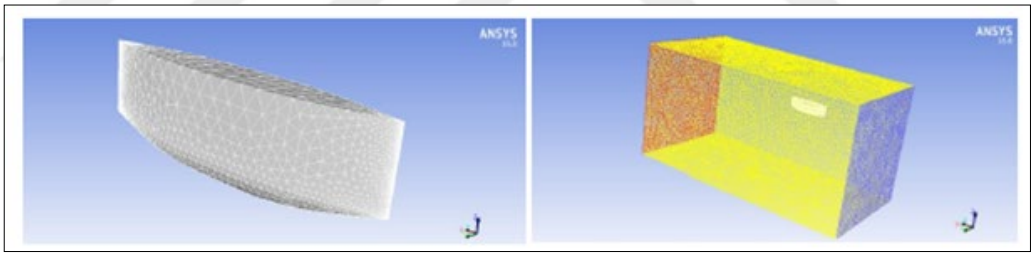
Bu çalışmada ayrıca bir Wigley gövde formu oluşturulmuş ve modelin toplam direnci SST k-ω Menter algoritması kullanılarak belirlenmiştir. Model, diğerlerine göre aynı deplasman ve yükseklikte son derece narin gövde formuna sahip olduğundan, boyu LOA=300 cm olacak şekilde uzatılmış ve hesaplama hacminin boyutları belirlenmiştir (Şekil 5.13). Şekil 5.17'de belirtilen direnç değerleri, son

derece narin gövde formu, özellikle narin pruva ve kıç nedeniyle beklenen aralıktadır.



Şekil 5.13 Wigley tekne formuna ait model hesaplama hacmi

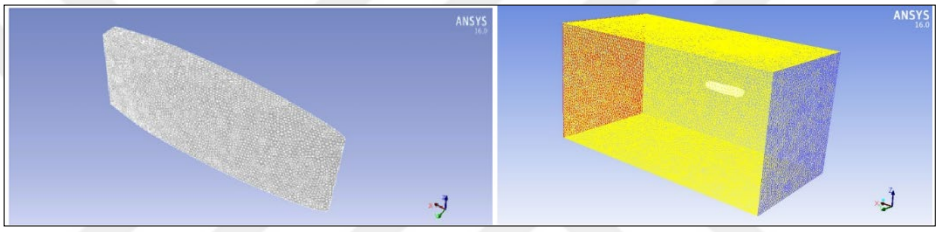
Bu modelin dışında Şekil 5.14'te gösterildiği gibi NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) formları yardımıyla 200 cm uzunluğunda bir katamaran tekne formu (final-1) hazırlanmış ve modeli aynı algoritma kullanılarak eşit deplasmanlarda analiz edilmiştir.



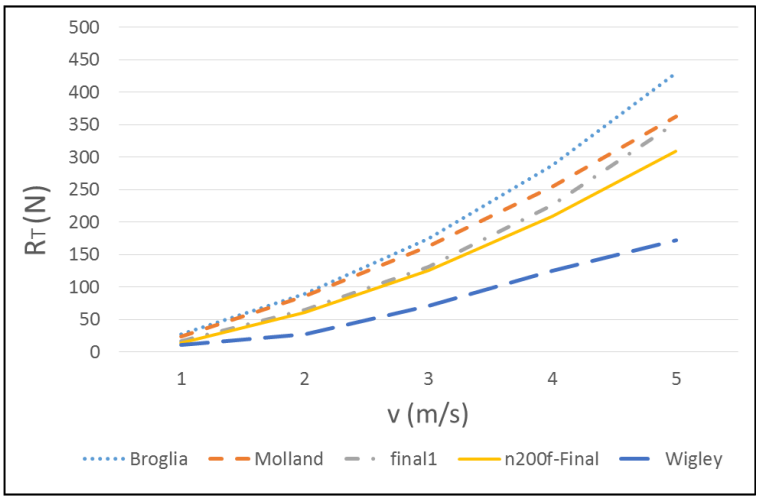
Şekil 5.14 Final-1 tekne formuna ait model ve hesaplama hacmi

Final-1 ve Wigley modellerinde, türbülansa bağlı olarak oluşan akış ayrımları, daha yüksek hızlarda ve kıç omuzlupa ve kıç tarafına yakın olarak daha düşük seviyelerde meydana gelmektedir. Model yüzeylerindeki yüksek basınç alanlarının beklendiği gibi pruva ve ön omuzluklarda yoğunlaştığı görülmüştür. Yapılan değerlendirmeler sonucunda optimum hidrodinamik özelliklere sahip olması, geniş iç hacmi ve basit formu dolayısıyla kolay üretim avantajı sunması nedeniyle "final-1" tipinin formu seçilmiştir. Wigley formu, üretimi zor olan ve kabul edilemeyecek kadar küçük bir iç hacme sahip olan mükemmel derecede narin gövde formu nedeniyle ihmal edilmiştir. Ayrıca, bu analizlerin sonuçlarının direnç değerleri

açısından iki hız bölgesinde değerlendirilebileceğine dikkat edilmelidir: 1-5 m/s ve 10-20 m/s bölgeleri. Prototipin maksimum hız sınırlaması nedeniyle, ASV için 1-5 m/s'lik alt hız bölgesi esastır ve bu da motor ve pervane seçiminde belirleyici olacaktır. İlerleyen adımlarda aracın "final-1" gövde formunda direnç ve sevk özellikleri açısından daha da iyileştirmeler yapılmasına karar verilmiştir. Modelin alt kısmı ile birlikte pruva ve baş bodoslamada ve özellikle kıç bodoslama ve pupa kısmında belirli değişiklikler yapılarak akım ayrılmaları ve girdaplar önlenebilir. Oluşturulan yeni model "n200f-Final" olarak isimlendirilmiş ve modelle hesaplama hacmi Şekil 5.15'te gösterilmiştir. HAD analizleri ile tahmin edilen toplam direnç değerleri diğer modellerle karşılaştırılarak Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'de verilmiştir.



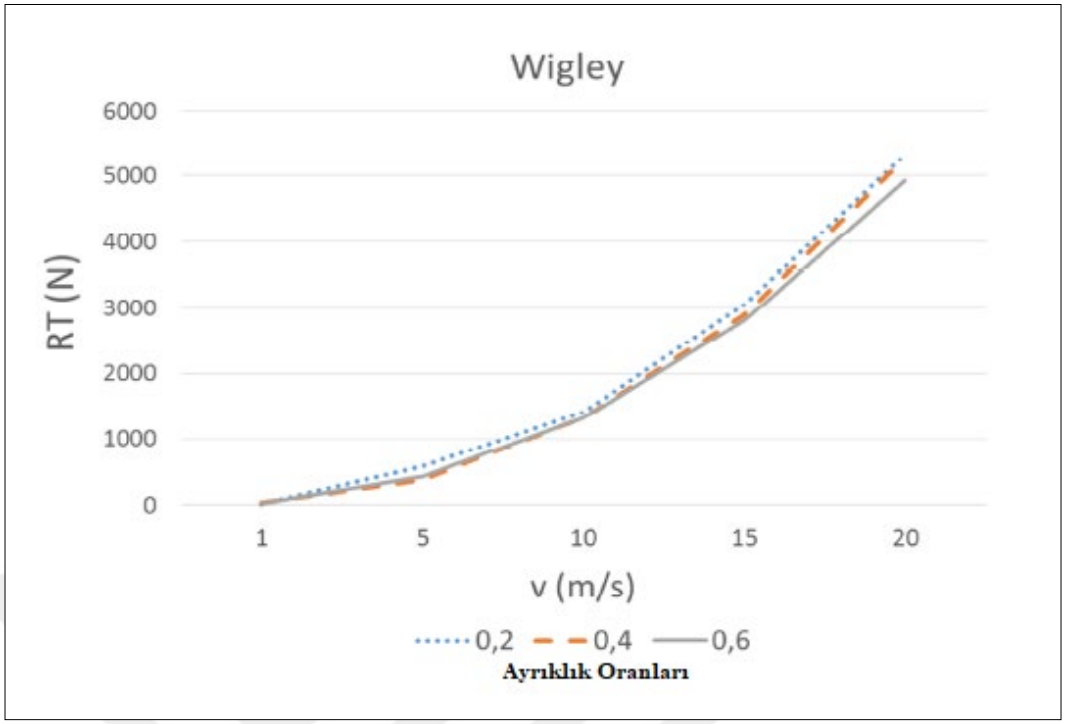
Şekil 5.15 n200f-Final tekne formuna ait model ve hesaplama hacmi



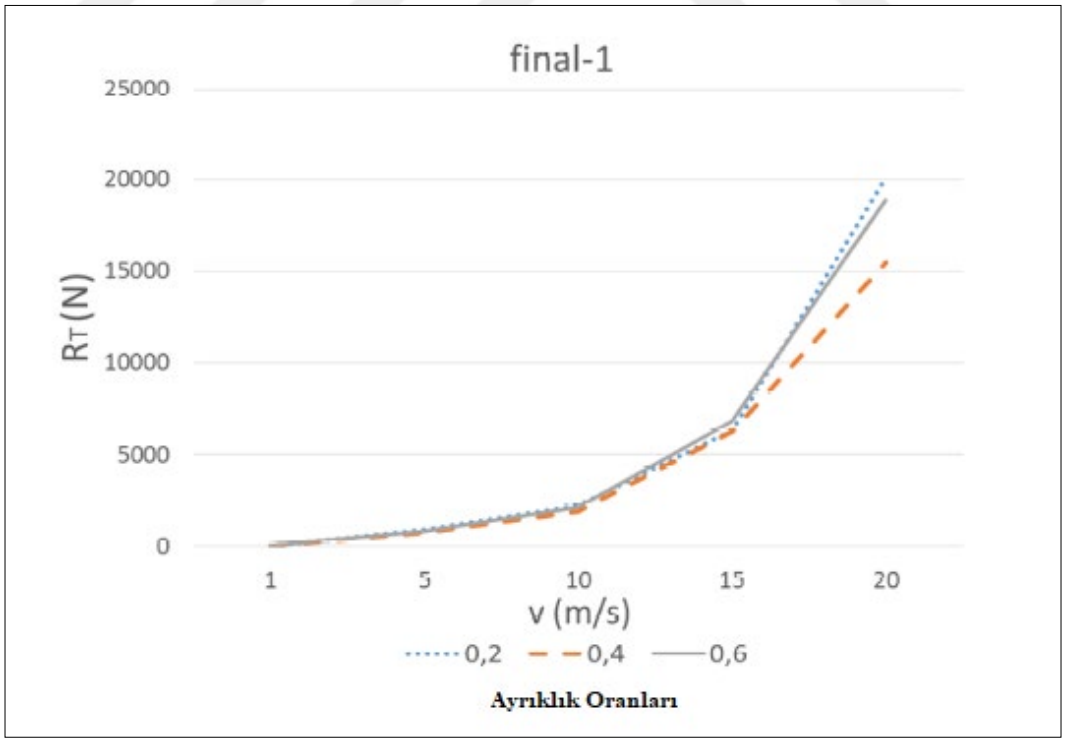
Şekil 5.16 Katamaran modellerinin 1-5 m/s hızları için HAD analizi sonuçları

Genel olarak, katamaran direnci ve pervane verimliliği, gövdelerin ayrılma oranına (enine açıklık), gövde asimetrisine, ana boyut oranlarına ve gövde formuna bağlıdır. İki gövde arasındaki viskoz direnç girişiminin hızdan nispeten bağımsız olduğu ve her bir yarı gövdenin uzunluk/genişlik, genişlik/su çekimi ve uzunluk/deplasman oranına bağlı olduğu bulunmuştur. Optimum bir ayrıklık oranı bulunarak dalga ve viskoz dirençlerinde önemli bir azalmanın sağlanabileceği açıktır. İki gövde arasındaki dalga girişimi, katamaranların tipik dalga sistemini oluşturur ve bozulan dalgalar dalga paterni direncini meydana getirir.

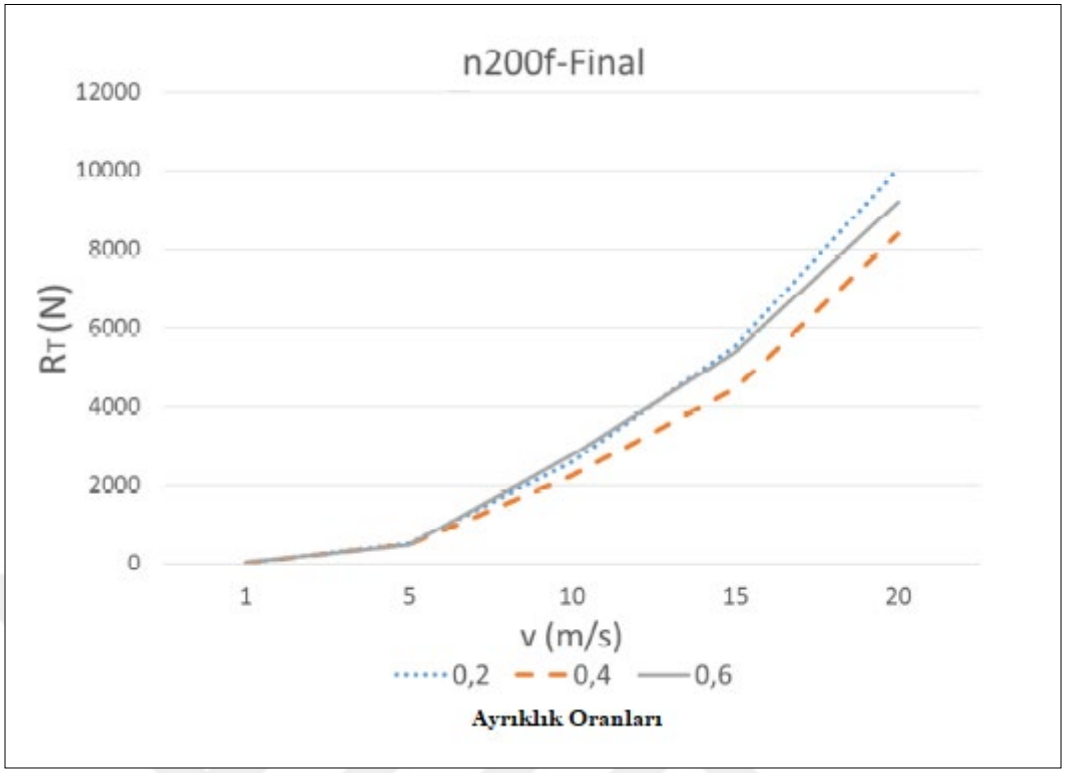
Her bir yarı gövde tarafından üretilen dalga sistemlerinin etkileşiminden kaynaklanan bu dalga girişimi etkisinin, gövde ayrımının optimizasyonu ile en aza indirilmesi mümkündür. İkiz gövdenin varlığı, iç bölgedeki (gövdeler arasındaki) dalga paterni üzerinde güçlü bir etkiye sahipken, dış bölgedeki bu etki oldukça küçüktür. Bir katamaranın direnci, belirli Fn sayısı aralıklarına ve ayırma oranına bağlı olarak iki yarı gövdesinin toplamından küçük, eşit veya büyük olabilir. Bu oran, yarı teknelerin bireysel dalga sistemlerinin girişim etkisinden dolayı katamaranların hız seviyelerine bağlıdır. Hız, yüksek hız aralığına doğru artarsa, minimum dalga oluşturma direnci elde etmek için gövde ayrımı daralır. Katamaranların dalga sisteminin girişim ile dalga oluşturma direnci açısından ayrılma oranına bağlı olarak Fn=0,25 ile Fn=0,50 arasında uygun Froude sayı aralığı ortaya çıkabilir. Ayırma oranının toplam dirence etkisini araştırmak için final-1, n200f-Final ve Wigley gövde formları seçilerek 0,2 0,4 ve 0,6 ayırma oranları ile analiz edilmiştir. Şekil 5.18, Şekil 5.19, Şekil 5.20 ve Şekil 5.21’de verilen sonuçlar, ayırma oranı 0,4'ün diğer her iki formda özellikle n200f-Final ve final-1'de 5 m/s ve 15 m/s'den ayırt edildiğini göstermektedir. Ayrıca optimum ayırma oranının yaklaşık 0,4 olduğu belirlenmiştir.



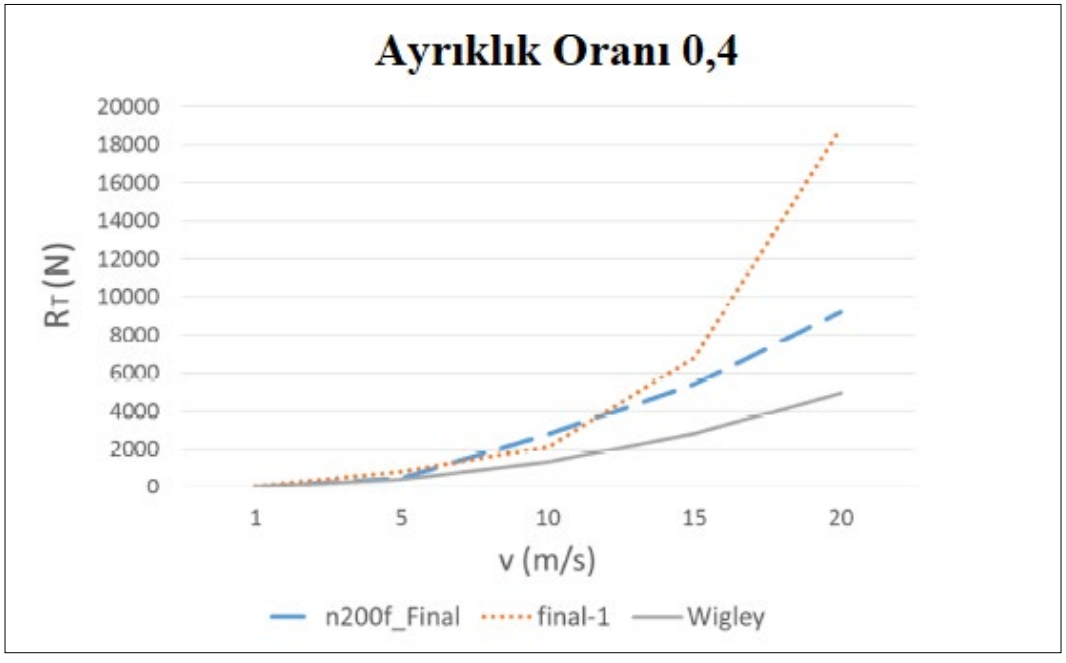
Şekil 5.17 Wigley formundaki katamaranların çeşitli hızlarda ayrıklık oranları karşılaştırması



Şekil 5.18 Final-1 formundaki katamaranların çeşitli hızlarda ayrıklık oranları karşılaştırması



Şekil 5.19 n200f-Final formundaki katamaranların çeşitli hızlarda ayrıklık oranları karşılaştırması



Şekil 5.20 Optimum ayrıklık oranı için form dirençlerinin karşılaştırması

5.2.2 Ponton

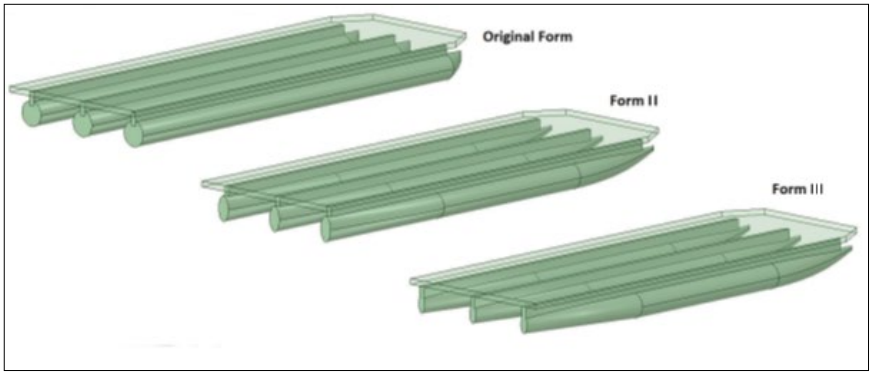
Ponton tekneler genellikle basit tasarım ve konstrüksiyonlara sahip olduklarından, uygun malzeme ve düşük adam-saat üretim süresi ile nispeten düşük maliyetlerle üretilebilirler (J.D. Power, 2023). Bu nedenle son zamanlarda bu tür tekneler diğer segmentlere göre pazar payını önemli ölçüde artırmıştır. Amerika Birleşik Devletleri (ABD) sularında bulunan kayıtlı teknelerin %95'i 8,00 metreden kısadır. Bu tekneler römorklarla kıyı ve iç su yollarına taşınabilirler ve düşük bağlama maliyetleri ile marinalarda konuşlandırılabilirler (Larson, 2016). ABD'de yaklaşık 12 milyon kayıtlı tekne vardır ve bu, küresel eğlence teknesi pazarının yaklaşık dörtte üçünü oluşturur (Larson, 2016). ABD'de sürat tekneleri popüler olmaya devam ederken, ponton teknesi segmenti, son on yılda, özellikle 2007-2009 durgunluğundan bu yana eğlence teknesi endüstrisini ileriye taşımıştır. Kullanılan tahrik ve motor türleri ne olursa olsun, ponton tekne segmentinin pazar payının artmasının nedeni, bu teknelerin konforu, stabilitesi ve çok yönlülüğü ve benzerlerine kıyasla uygun fiyatları ile açıklanabilir. Ponton teknelerin sahibi olunması, binmesi ve inmesi kolay, yanaşması kolay ve bakımı kolay tek güverte düzenine sahip olduğundan, segmentin popülaritesi hem yaşlı nesil hem de giriş seviyesindeki tekneciler arasında artmaktadır. Diğer satış verileri, ponton tekne sahiplerinin diğer birçok segmentteki oranlardan daha yüksek oranlarda ikinci teknelere sahip olduklarını ve ponton teknelerini sosyal etkinlikler için ana gemi olarak kullandıklarını göstermektedir. Diğer tekneler daha çok amaca yönelik olsa da pontpn tipi yat, balıkçılık, kayak, gezi ve su sporları için çok amaçlı bir platformdur ve bu nedenle ikinci el pazarlarında kolayca satılabilir (J.D. Power, 2023). Bu teknelerin diğer özellikleri, tekerlekli sandalyeyle erişilebilirlik, su üzerinde harika bir "oturma odası" ve daha yüksek motor güçleri kullanma olasılığı ile konforlu oluşlarıdır (Şekil 5.22). Güverte altı konaklamaya ihtiyaç duymayan alıcılar için özellikle ilgi çekicidir, çünkü bunların %10'dan azının gecelerini teknelerde geçirdiği ve kamaraların daha çok mal ve alet depolamak için kullanıldığı tespit edilmiştir (Larson, 2016).



Şekil 5.21 Üç silindirik sephiyeli ponton tekne

Önceki bölümde gösterildiği gibi SWATH botu modelinin fiziksel çekme tankı testleri ve HAD analizlerinin direnç sonuçlarında iyi bir uyum elde edilmişti.

Ticari yazılım olan ANSYS/FLUENT V16.0 kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonların başarılı uyumundan sonra geliştirilen silindirik ve hidrodinamik olarak iyileştirilmiş sephiye elemanlarına sahip ponton modelleri aynı şekilde HAD analiziyle incelenmiş ve bulunan sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. İyileştirilmiş sephiye elemanlarına sahip tekneler, yine de önemli potansiyel hidrodinamik iyileştirmeler gösterebilir (Şekil 5.23).



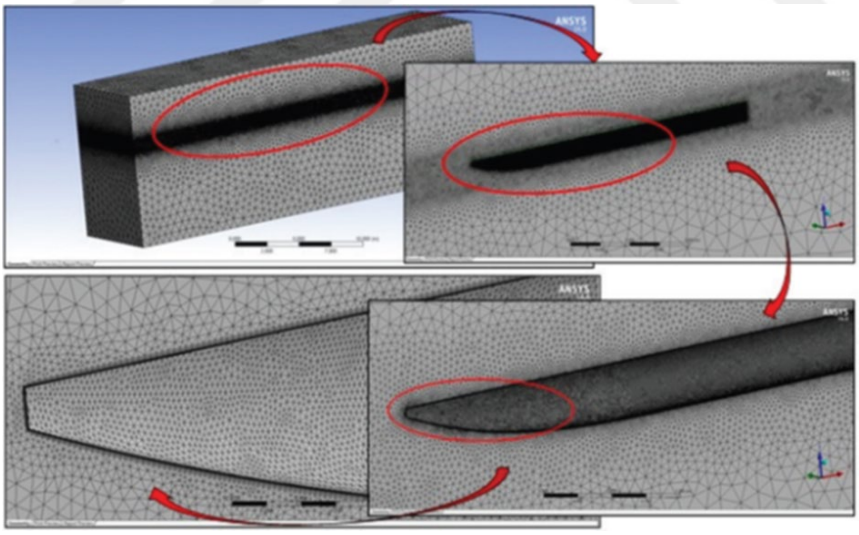
Şekil 5.22 Silindirik ve hidrodinamik olarak iyileştirilmiş sephiye elemanlarına (Orijinal-Form, Form-II ve Form-III) sahip ponton teknelerin modelleri

Ponton teknenin ön tasarım aşamasında, bir literatür taraması yapılmış ve daha önceki benzer tekne tasarımlarından elde edilen deneyimler toplanmıştır (Begovic vd., 2015; Brizzolara vd., 2011; Volker, 2000). Kıyı ve iç su yollarında çalışacak, treyler ile kolay taşınabilen, imalat maliyeti düşük ponton bot tasarım çalışmalarına başlanmıştır. Tekne deplasman tonajı yaklaşık Δ=2,00 ton olarak belirlenmiştir. Diğer ilk tasarım verileri şu şekilde sonuçlandırılmıştır: Toplam uzunluk L_{OA} = 8,25 m ve 22-25 knot servis hızı ve maksimum hız 35-40 knot. Genel olarak, bu aşamada dikkate alınması gereken ilk tasarım hususu, teknenin görevi ve tekne formuna karar vermeden önce donatılacak sevk sistemleri göz önünde bulundurularak aracın stabilite ve güç gereksinimleridir. Bu iki talep birbiriyle çelişen özelliklere sahiptir. Stabil bir tekne elde etmek için ön tasarım aşamasında aracın genişliğinin arttırılması gerekir; ancak daha büyük araç genişlik değerleri, Froude sayısı ile doğrusal olmayan direnç artışı nedeniyle aynı servis hızları için daha fazla motor gücü gerektirir.

Bu nedenle ilk tasarımın, yüksek enine stabilite sunan ve çok narin gövdesi nedeniyle aynı servis hızlarında daha düşük motor gücü gerektiren, ancak aynı zamanda mobilya, ekipman ve sosyal etkinliklerin düzenlenmesi için geniş bir "yaşayan" güverte alanı sağlayan bir tekne olması gerekliliği göz önünde bulundurulmuştur. Teknelerin taşıma kapasitelerine göre çapları D=60-90 cm aralığında olan üç silindirik sephiye elemanı esas alınarak hem stabilite hem de güverte alanı dikkate alınarak teknenin genişliği ihtiyaca göre arttırılabilmektedir. Bu tekne türleri prensip olarak trimaran teknelerine benzediğinden ve sephiye elemanlarının sabit çapından dolayı her bir teknenin su hattı genişliği sabit olduğundan, ilgili teknelerin ağırlıkları değişmediği sürece teknenin toplam su hattı genişliği sabittir. Ayrıca bu tip araçların imalat ve işçilik maliyetleri, tekne yapısı ve elemanlarının daha basit olması nedeniyle deplasmanlı teknelerine göre daha düşük maliyetlidir. Yukarıda belirtilen form tipleri ve tekne boyutları dikkate alındığında, gerekli olan düşük yoğunluk, yeterli yapısal dayanım, uygun maliyetli imalat ve bakım onarım kriterlerini sağlayan yapı malzemeleri; korozyona ve deniz organizmalarına ve ayrıca çevresel yaşlanma koşullarına karşı iyi direnç gösteren, ağırlıklı olarak alüminyum, kompozit ve termoplastik malzemelerdir.

İzleyen bölümde ele alınan ponton tekne modellerinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinde, ANSYS/FLUENT V16.0 “Kayma Gerilmesi Taşınımı k–ω algoritmasının (SST k-ω) türbülans modellemesi uygulanmıştır. Bu modellemenin seçilmesinin nedeni, genellikle yüzen solid bir gövde üzerindeki ters basınç gradyanları altında akış ayrımının başlangıcının ve boyutunun doğru tahminini vermesidir. SST k- ω modeli, ana türbülanslı kayma gerilmesinin taşıma etkilerini hesaplamak için değiştirilmiş bir türbülanslı viskozite formülasyonu içerir. Model, cdara yakın bölgede standart k-ω, cidardan uzak alan bölgelerinde değiştirilmiş k-ε modelini etkinleştiren bir fonksiyona sahiptir (Menter ve Rumsey, 1994). Kayma Gerilimi Taşınımı k-ω modeli, önceki bölümlerde sunulan denklemlerden görülebileceği gibi iki denklemli bir türbülans modelidir.

Seçilen türbülans modeline göre öncelikle sephiye elemanlarının etrafındaki ağ elemanlarının seçimi yapılmalıdır. Türbülans modeline uygun olarak sephiye elemanlarının yanında prizmatik kama elemanların kullanıldığı yapılandırılmış bir ızgara uygulanmıştır. Dış bölgede dörtyüzlü elemanlar yerleştirilmiştir (Şekil 5.24).

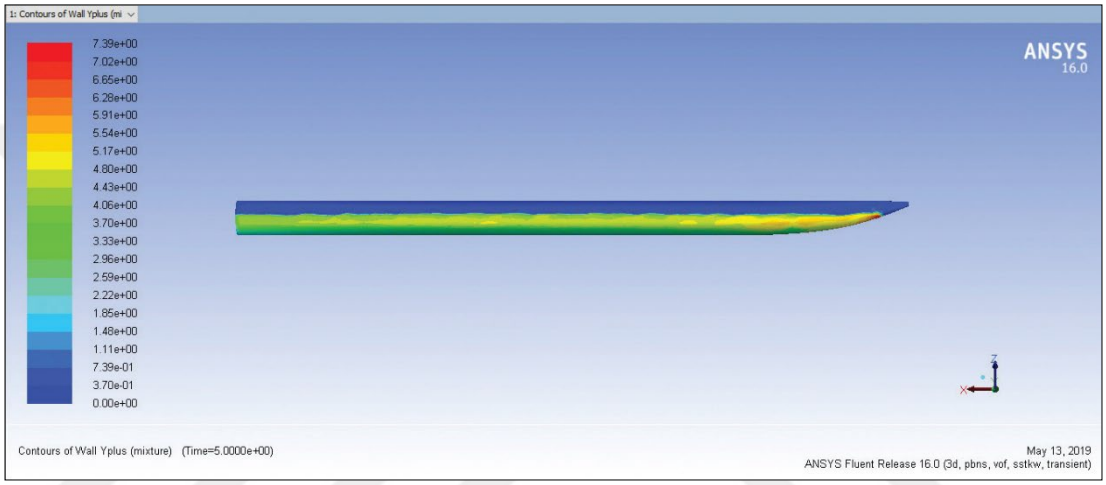


Şekil 5.23 Sephiye elemanlarının yakınındaki alan da dahil olmak üzere tüm akışkan alanındaki ağ yapısı.

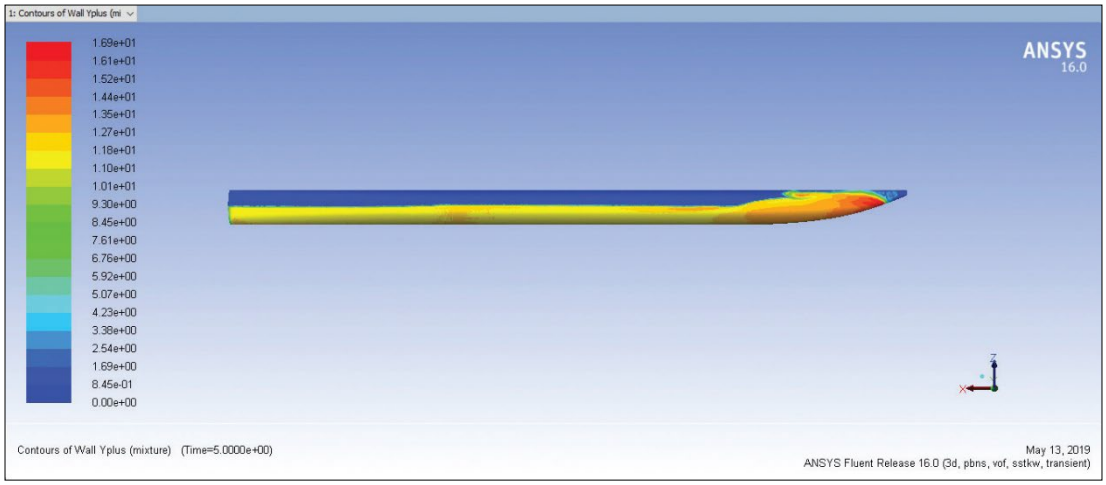
Bunun dışında, uygulanan türbülans modelleri genellikle, genişletilmiş Denklem 5.2’de verilen y+ duvar fonksiyonunun belirli bir aralığında çalışır:

$$y^+ = \frac{\rho y \sqrt{\frac{\mu}{\rho}\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{y=0}}}{\mu} \tag{5.2}$$

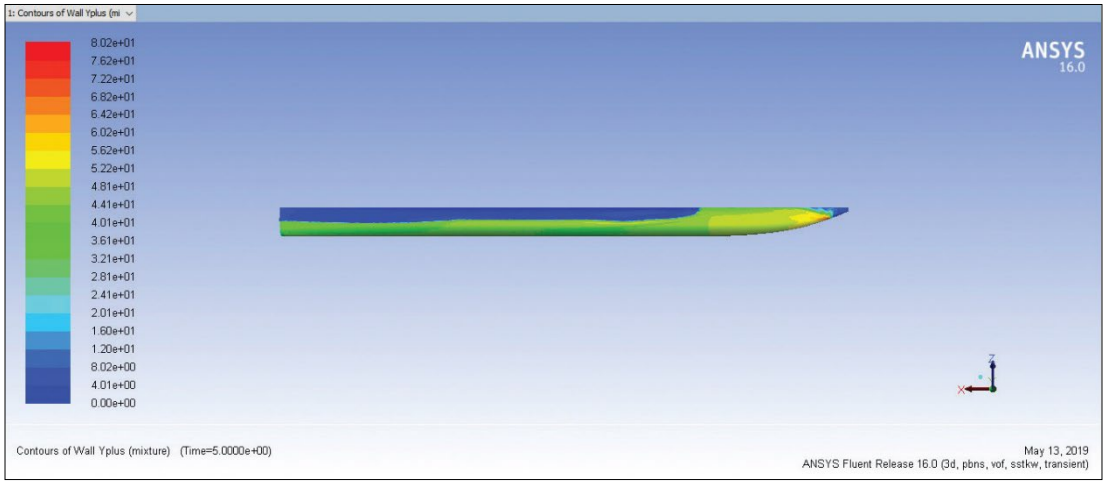
Ponton gövdesinin bir sınır tabakasındaki y+ varyasyonları, sırasıyla 1, 5 ve 10 m/s hızlar için Şekil 5.25, Şekil 5.26 ve Şekil 5.27'de verilmiştir, bu değerler 0<y+< 80 olacak şekilde değişmektedir.



Şekil 5.24 Ponton botların v= 1 m/s hızdaki direnç analizlerinin tahmini sırasında ağ yapılarında elde edilen duvar fonksiyon değerleri



Şekil 5.25 Ponton botların v= 5 m/s hızdaki direnç analizlerinin tahmini sırasında ağ yapılarında elde edilen duvar fonksiyon değerleri



Şekil 5.26 Ponton botların v= 10 m/s hızdaki direnç analizlerinin tahmini sırasında ağ yapılarında elde edilen duvar fonksiyon değerleri

Elde edilen duvar fonksiyonu değerleri, sınır tabakası modellemesinin kabul edilebilir kalitesi ve hesaplama süresi arasında bir uzlaşma için yeterli bir yaklaşım olarak kabul edilmiştir. Bu bölümdeki simülasyonlardan elde edilen direnç sonuçları, Begovic vd. (2015) tarafından yürütülen tekne modelinin fiziksel çekme tankı testleri ile doğrulanmıştır. Ek olarak, yüksek hızlarda sınır tabakalarda meydana gelen güçlü ayrışmalar ve ters akışlardan kaynaklandığına dikkat edilmelidir. Ponton botların direnç analizlerinin tahmini sırasında ağ yapılarında elde edilen y+ duvar fonksiyonunu göstermek için sephiye elemanlarına yakın bölge de dahil olmak üzere tüm akışkan alanındaki ağ örgüsü eleman sayısı sırasıyla Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3 Uygulanan ağ yapılarında elde edilen duvar fonksiyon değerleri y+

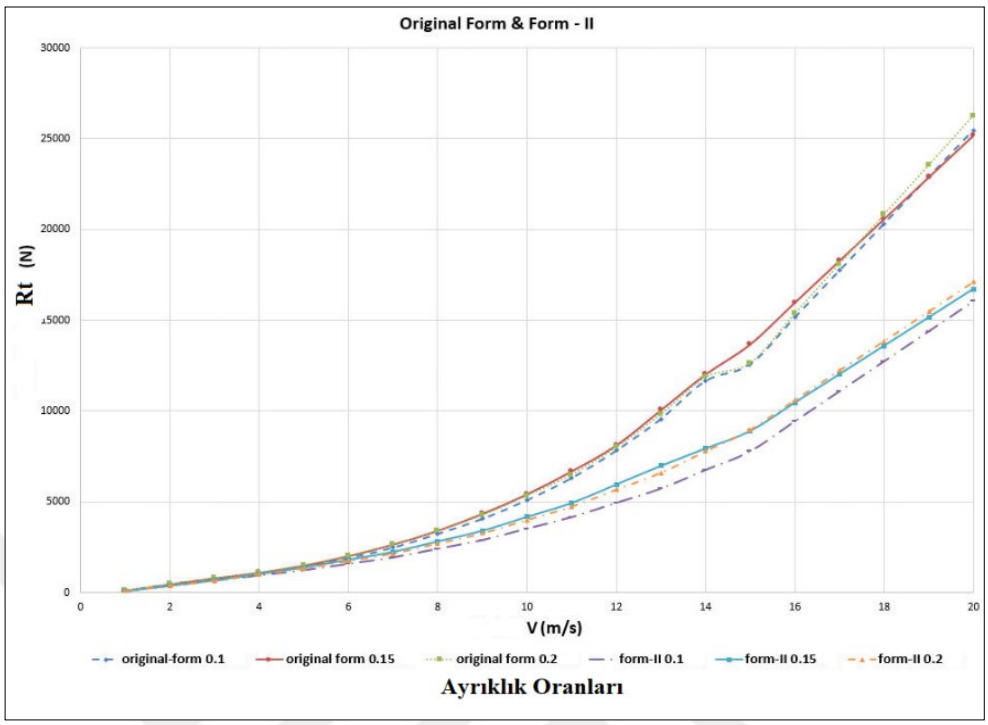
Hız (m/s)	1	5	10	18
y+	7,39	16,9	80	122
Ağ örgüsü eleman sayısı	3316619	3316619	3316619	3316619

Direncin üç bileşeninin tümü, yani viskoz basınç, sürtünme ve dalga direnci bileşenleri, SWATH tekneler için eşzamanlı olarak ortaya çıkar. Bütün simülasyonlarda kullanılacak türbülans modelini valide etmek amacıyla yapılan analizlerde bir SWATH tekne formu seçilmiştir. Sonuçlar, fiziksel çekme tankı

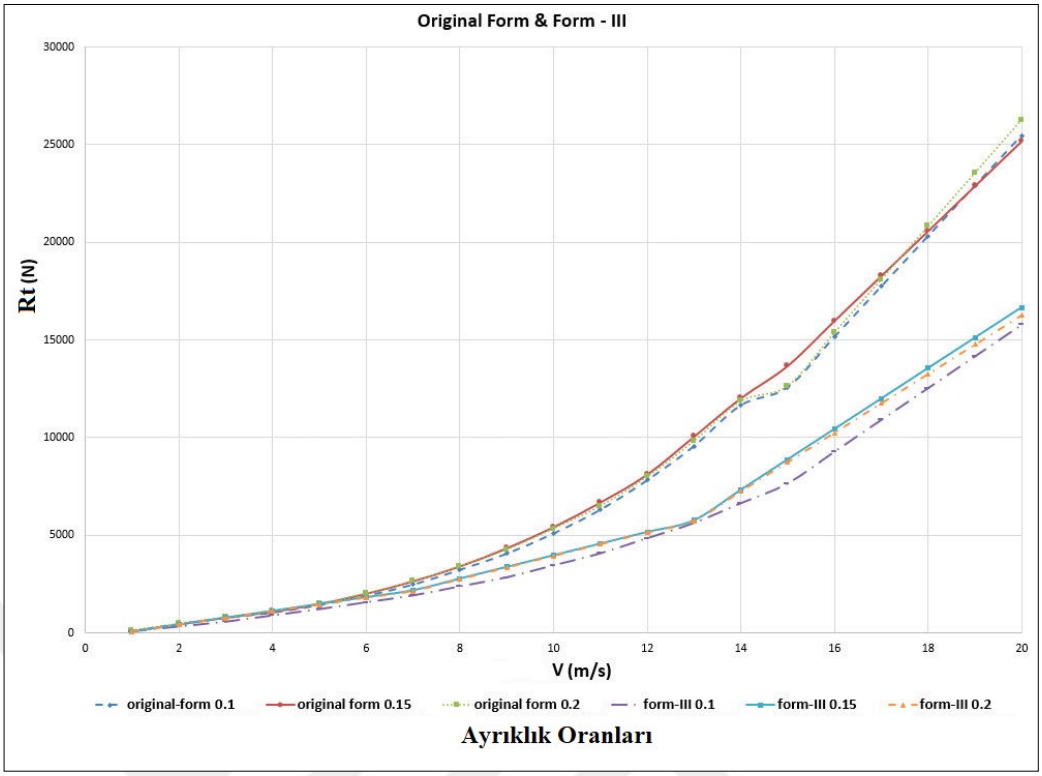
testleri ile doğrulandıktan sonra, bir platform ana güvertesi ve üç silindirik sephiye elemanından oluşan bir ponton teknenin hesaplamalı hidrodinamik analizleri yapılarak tekne direnci buna göre belirlenmiştir. Akış ayrılmalarının çoğu, beklendiği gibi, bu modellerin kıçlarına yakın yerlerde yüksek hızlarda meydana gelmiştir. İncelenen ponton teknenin maksimum hızı, ekonomik ve teknik nedenlerle yaklaşık 35 knot ile sınırlandırılmıştır. Bu sınırlama esas olarak direnç değerlerinin aşırı artışını sınırlamak ve ayrıca yüksek hızlarda sıklıkla meydana gelen kıç triminin artmasıyla boyuna stabilitenin azalmasını önlemek içindir.

Yukarıda ifade edilen valide edilmiş algoritma ve simülasyon sistemi kullanılarak, üç silindirik sephiye elemanına (Orijinal-Form) sahip ponton tekne, 1-20 m/s hız aralığında HAD analizlerine tabi tutulmuş ve bu hız aralığındaki ilgili toplam direnç değerleri ve gerekli motor güçleri karşılık gelen hız seti belirlenmiştir.

Dirençteki artışın hızların ikinci kuvvetiyle orantılı olmadığı, beklenmedik şekilde daha düşük ve çift doğrusal (bilinear) olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, teknenin silindirik sephiye elemanlarının, pruva ve kıç bölümleri hidrodinamik özelliklerini optimize etmek için geliştirilmiştir (Form-II). Form-III için tekneye ait sephiye elemanının kıç tarafının alt kısımlarında ek iyileştirmeler yapılmıştır. Form-II ve Form-III modellerinin her ikisi de Orijinal-Form modeli ile aynı şekilde analiz edilmiştir. Bahsi geçen analizler her form için 0,1-0,15-0,2 ayrıklık oranları ve 1-20 m/s hız aralığında yapılmıştır. Her iki form için de orijinal formunkinden önemli ölçüde daha düşük olan benzer direnç değerleri elde edilmiştir (Şekil 5.28 ve Şekil 5.29). Bu, aynı hızlar için önemli ölçüde yakıt tasarrufu sağlanabileceği sonucunu vermektedir. Son olarak, bu segmentin tipik özelliklerini taşıyan bu teknelerin, ANSYS/FLUENT V16.0 yazılımı kullanılarak direnç değerleri tahmin edilerek servis ve maksimum hızlar için motor güçleri hesaplanmıştır. Sevk özellikleri, üç farklı sephiye formu için tahmin edilirken, genel sevk verimi $0,4 < \eta_D < 0,65$ arasında değişebileceğinden $\eta_D = 0,5$ olarak kabul edilmiştir. Motor milindeki güç (Fren Gücü), teknenin toplam direnci (R_T), hızı (v) ve genel tahrik verimi (η_D) kullanılarak ve şanzıman kayıplarının $\eta_{tr} = 0,97$ olduğu varsayılarak Denklem 5.2 ile hesaplanmıştır.



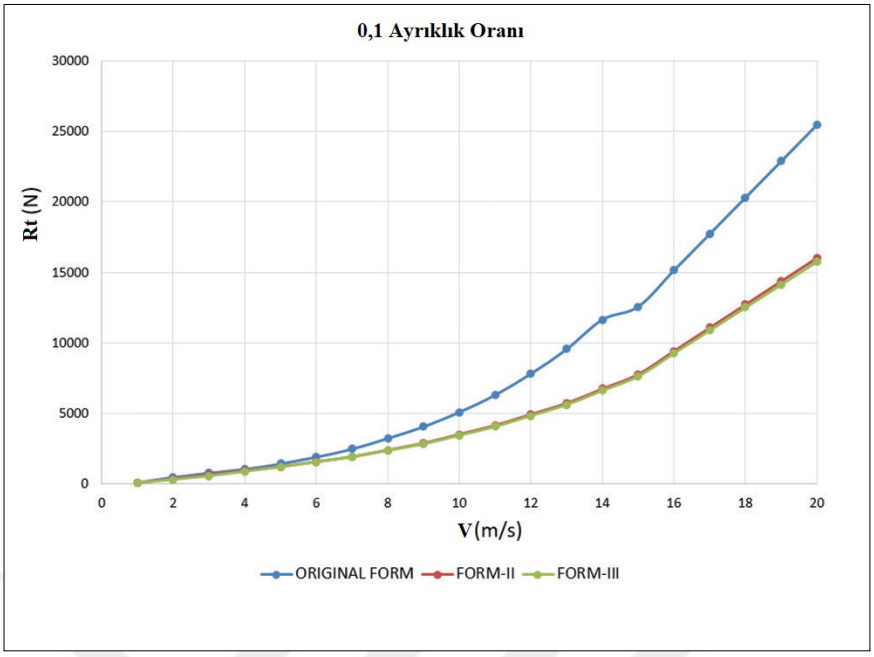
Şekil 5.27 0,10- 0,15- 0,20 ayırma oranları ile "Orijinal-Form ve Form-II" modellerinin CFD analizlerinin direnç sonuçları



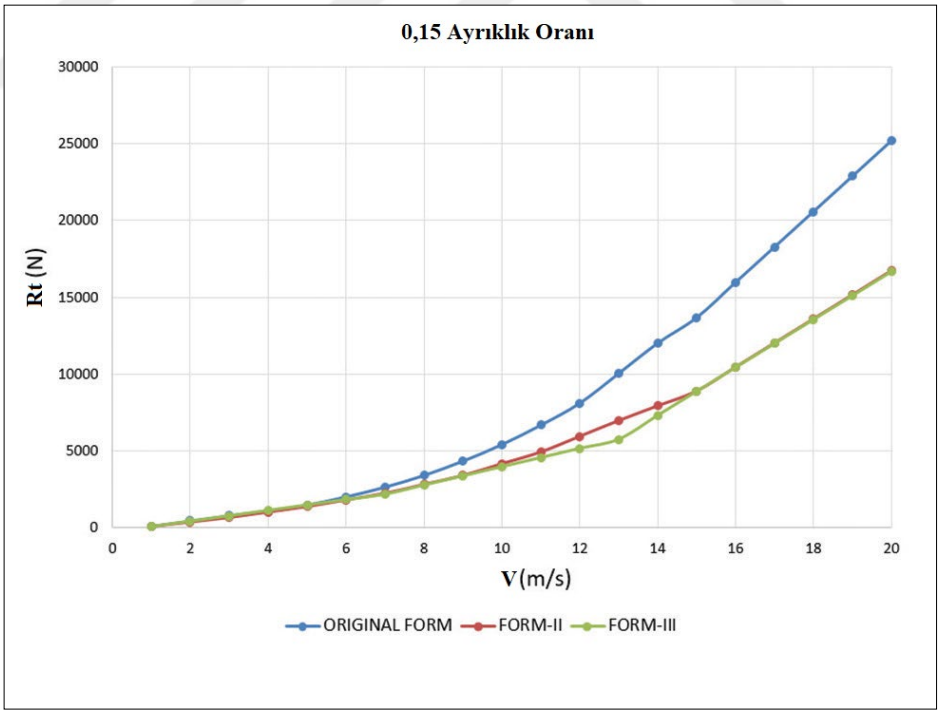
Şekil 5.28 0,10- 0,15- 0,20 ayırma oranları ile "Orijinal-Form ve Form-III" modellerinin CFD analizlerinin direnç sonuçları

$$P_B = \frac{R_T v}{\eta_D \eta_{tr}} = 2{,}062.10^{-3}.R_T v[kW] \tag{5.3}$$

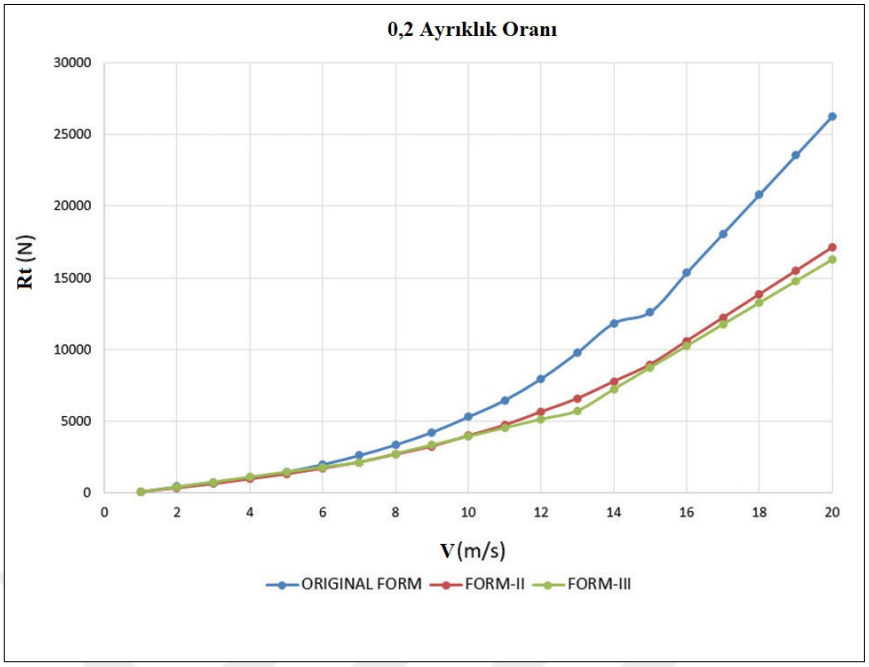
Teknenin her bir sephiye gövdesi tarafından üretilen dalga sistemlerinin etkileşiminden kaynaklanan dalga girişim etkisinin, gövde ayrımının optimizasyonu ile dalga direncini en aza indirmek için kullanılabilmesi olasılığı vardır. Üç gövdenin varlığı, gövdeler arasındaki dalga paterni üzerinde güçlü bir etkiye sahipken, dış bölgedeki bu etki oldukça küçüktür. İki ve/veya üç sephiye elemanlı ponton teknenin direnci, Froude sayısına ve ayırma oranına bağlı olarak iki ve/veya üç gövdenin direnç toplamından küçük, eşit veya büyük olabilir. Çünkü bu oran, bu iki ve/veya üç gövdenin tekil dalga sistemlerinin girişim etkisinden dolayı büyük ölçüde araçların hız seviyelerine bağlıdır. Ayırma oranının ponton teknelerin toplam direncine etkisini araştırmak için tüm tekne formları 0,10-0,15 ve 0,20 ayırma oranları ve 1-20 m/s hız aralığında analiz edilmiştir.



Şekil 5.29 Ayrılma oranı 0,10 olan "Orijinal-Form, Form-II ve Form-III" modellerinin HAD analizlerinin direnç sonuçları.

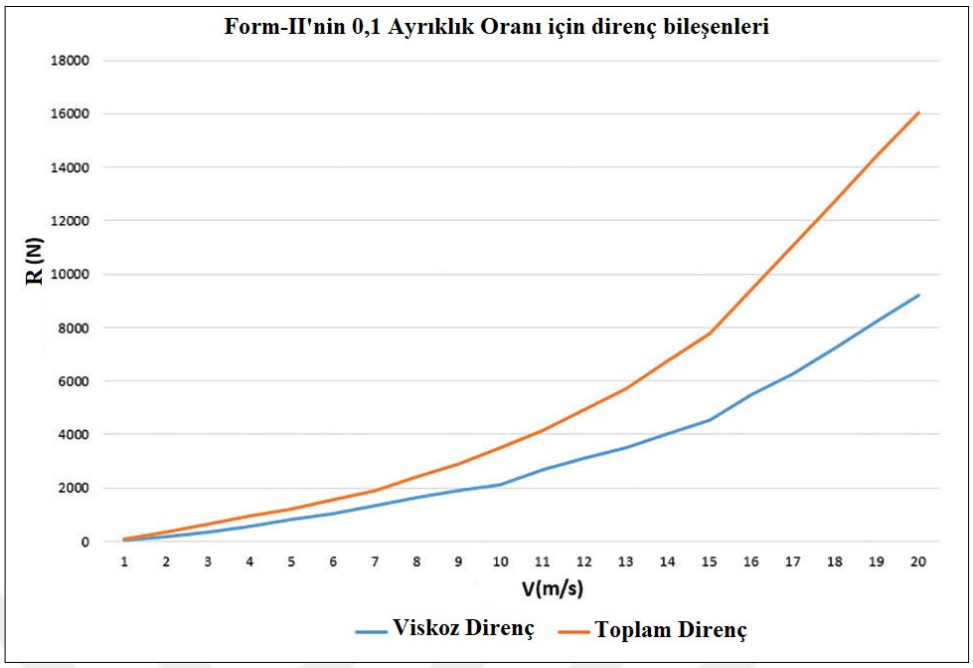


Şekil 5.30 Ayrılma oranı 0,15 olan "Orijinal-Form, Form-II ve Form-III" modellerinin HAD analizlerinin direnç sonuçları.



Şekil 5.31 Ayrılma oranı 0,20 olan "Orijinal-Form, Form-II ve Form-III" modellerinin HAD analizlerinin direnç sonuçları.

Şekil 5.30, Şekil 5.31ve Şekil 5.32'de görülebileceği üzere 0,10 civarında ve özellikle 9-20 m/s hız aralığında optimum ayrıklık oranının olduğu, tüm ayrıklık oranlarında teknelerin direnç sonuçlarının 1-5 m/s hız aralığında birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. Ayırma oranı 0,1 olan Form-II'nin direnç bileşenlerinin payları Şekil 5.33'te verilmiş olup, bunların bileşimleri analiz edilen hızlara göre beklentilere uygundur.



Şekil 5.32 Ayrıklık oranı 0.1 olan Form-II'nin direnç bileşenlerinin payları

Dalga direnci oranlarının payı nispeten düşüktür. Bunun nedeni teknelerin sephiye elemanlarına ait formların dalga direnci açısından geometrik olarak çok uygun özelliklere sahip olmasıdır. Orijinal Formun direnç değerlerinde farklı ayırma oranlarında büyük farklılıklar gözlenmemiştir. Ayırma oranları 0,10, 0,15 ve 0,20 olan Form-II ve Form-III'ün direnç değerleri, Orijinal-Form'a kıyasla önemli ölçüde azalmıştır. Bunun nedeni, yüksek hız aralığında hidrodinamik olarak geliştirilmiş sephiye elemanlarının kıç tarafında türbülans viskozitesindeki etkili düşüştür.

Bu tür tekneler için gerekli olan direnç değerlerinin ve/veya motor gücünün optimum ayırma oranı ile Form-II örneğinde %38'e kadar azaltılabilmesi hidrodinamik açıdan kesin olarak mümkündür.

Form-II ponton tekneleri, sırasıyla Vservice=25 knot ve Vmax =35 knot seyir hızlarında Pservice=150 kW ve Pmax=475 kW güç sağlayabilen nispeten daha küçük bir motora ile sevk edilebilecektir.

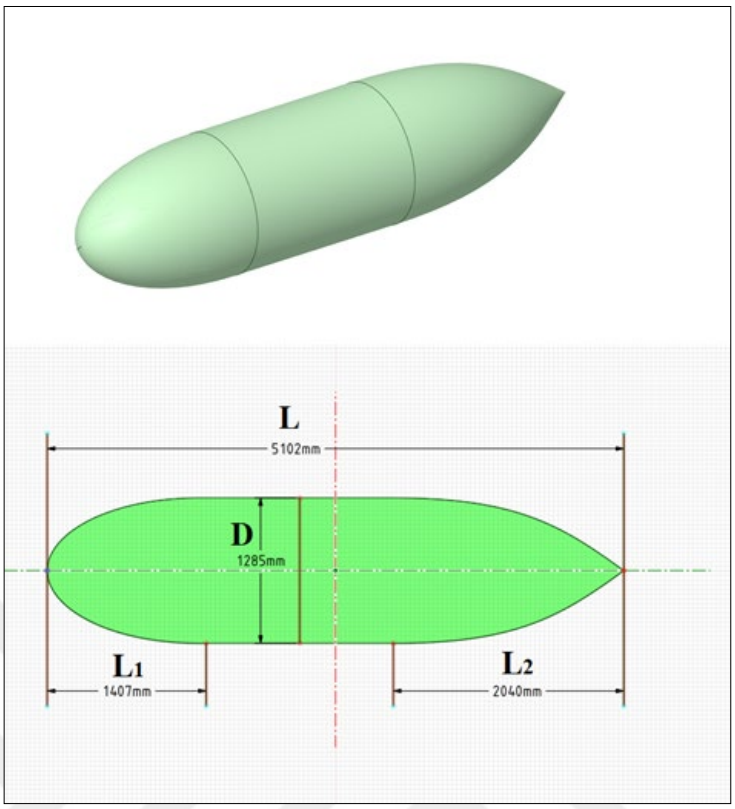
Sonuç olarak, bu yeni formlara sahip teknelerin, silindirik sephiye elemanlarına sahip teknelerden önemli ölçüde daha iyi hidrodinamik özelliklere sahip olduğu

görülmektedir. Düşük üretim maliyetleri nedeniyle, optimum ayırma oranının tahmini için Form-II seçilmiştir. Bu formun yapılan analiz sonuçları, 0,10'luk ayırma oranının optimal olduğunu ve Form-II'nin direnç ve güç gereksiniminin Orijinal-Form'a göre %38'e varan oranlarda azaldığını göstermiştir.

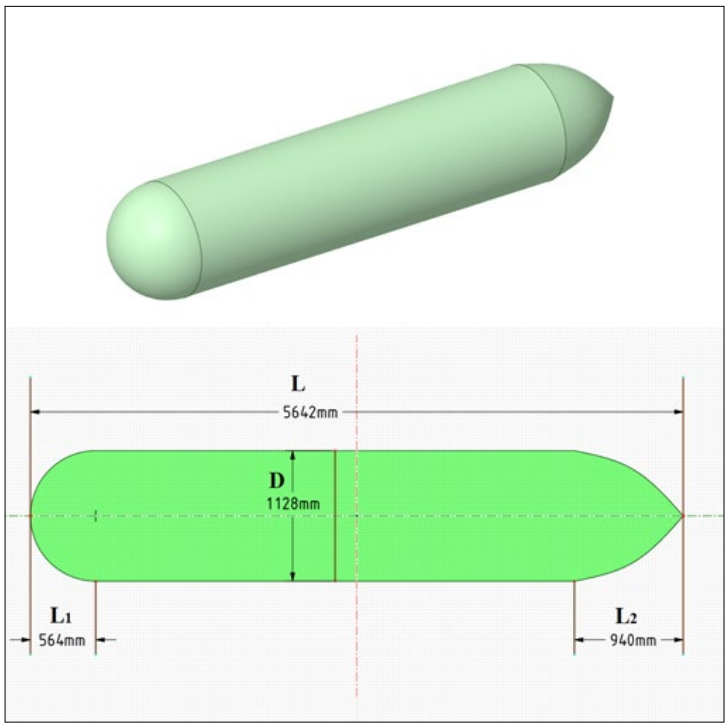
5.3 AUV, ROV ve ASV Formlarının Geliştirilmesi

5.3.1 AUV, ROV ve ASV Formlarının CAD Geometrilerinin Oluşturulması

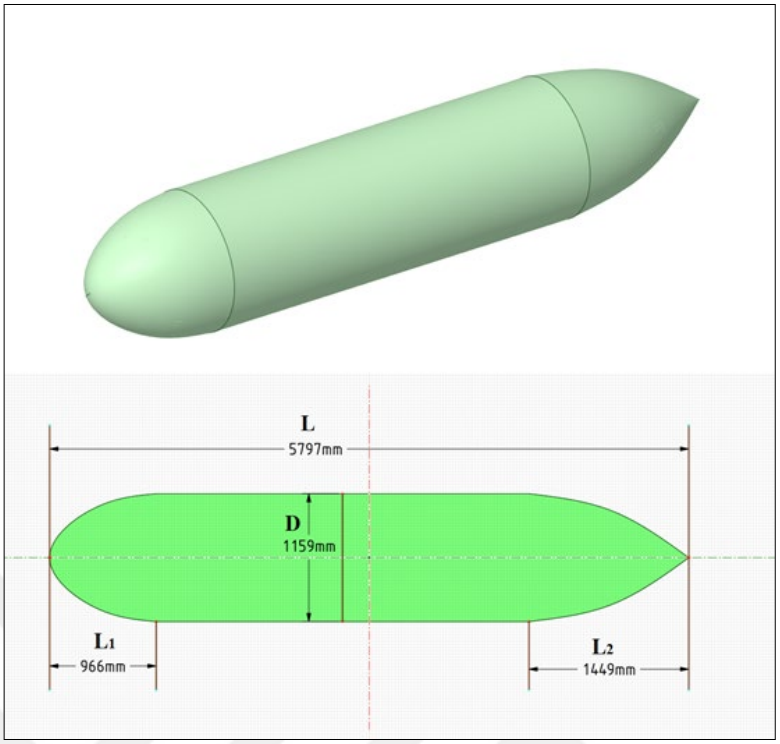
AUV-0, genellikle AUV'lerin tasarımında ve bunların viskoz direnç seviyelerinin temel bir form olarak tahmin edilmesinde kullanılan Myring formundan türetilmiştir (Şekil 5.34). Diğer iki AUV formu, aynı koşullar altında analiz edilmek üzere bir torpido formuna benzer şekilde geliştirilmiştir. Biri küre başlı, diğeri ise elipsoid başlı ve daha narin kıç formuna sahip olacak şekilde modellenmiş, sırasıyla AUV-1 ve AUV-2 olarak adlandırılmıştır (Şekil 5.35 ve Şekil 5.36). Ayrıca, AUV-2'nin paralel gövdesi ve kıç kısmı çıkarılmış ve gövdenin bu elipsoid başı koni formunda uzun bir kıç ile birleştirilmiş ve bu forma AUV-3 adı verilmiştir (Şekil 5.37). Bu kavramsal formu oluşturmanın amacı, AUV-1 ve AUV-2'nin direnç değerlerini çok büyük ölçüde azaltabilmektir.



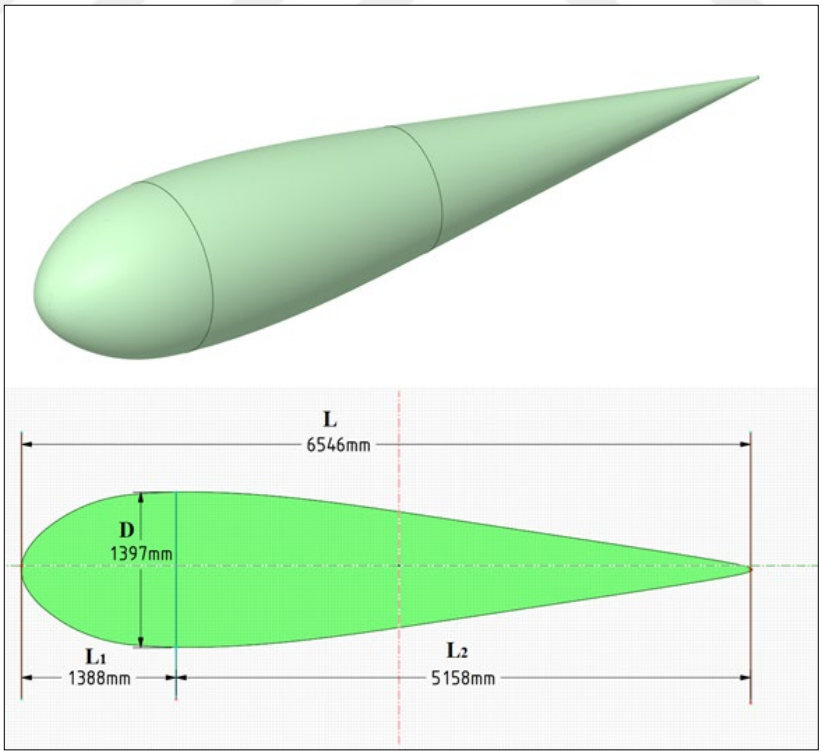
Şekil 5.33 AUV-0 modeli ve boyutları



Şekil 5.34 AUV-1 modeli ve boyutları



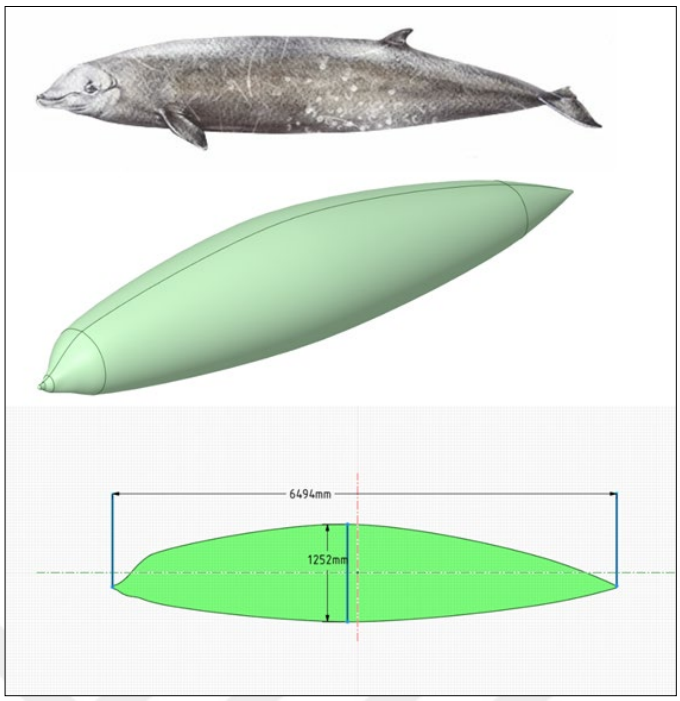
Şekil 5.35 AUV-2 modeli ve boyutları



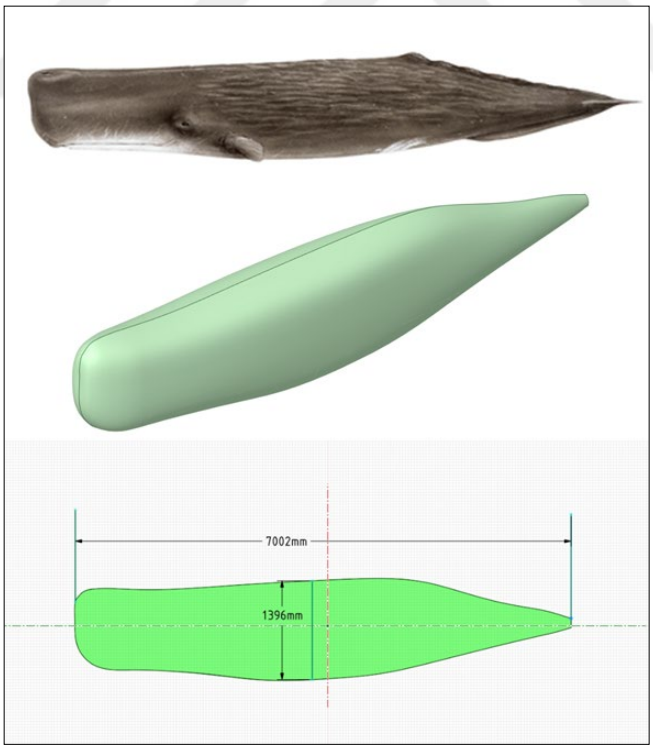
Şekil 5.36 AUV-3 modeli ve boyutları

Biyomimikri metodolojisi, tasarım sürecini tamamlamak için alternatif bir yaklaşım olarak bilinmektedir. Bu çalışmada, bir Otonom Su Altı Aracına (AUV) uygun bir form oluşturmak için kısmen biyomimetik yöntem kullanılmıştır. Özünde, biyomimikri yöntemi, doğal yaşamın getirdiği zorlukların üstesinden gelmek için hayvanlar, bitkiler ve organizmalar tarafından geliştirilen yaratıcı çözümlerden ilham alır. Bu yöntem, bu araştırma kapsamında yalnızca otonom su altı aracının form tasarımına uygulanmış olsa da, daha geniş bir bakış açısı, tasarım sürecinin neredeyse her aşamasında değerli yenilikler sunan yol gösterici bir ilke olarak kabul edilmesi gerektiğini göstermektedir. Aslında biyomimikri, yalnızca doğal modelleri keşfetmeyen, aynı zamanda doğal sistemleri, oluşum süreçlerini ve temel unsurları da araştıran yeni bir bilimsel disiplin olarak resmen kabul edilmektedir (Benyus, 1997).

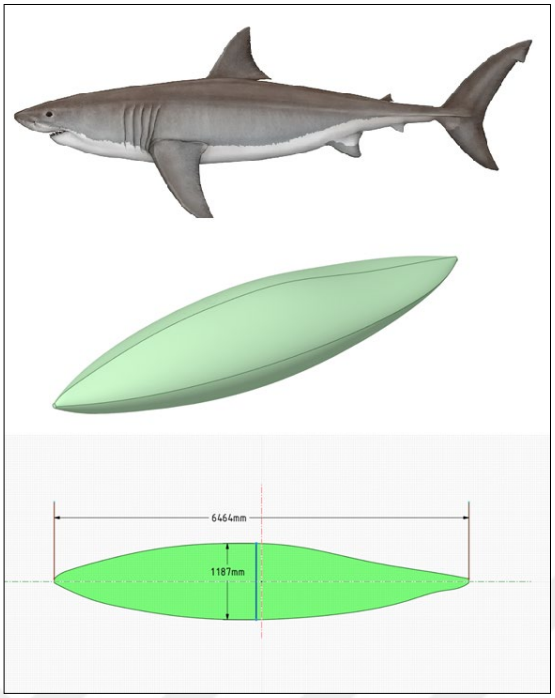
Bu çalışmada tasarlanan modüler su altı araçlarının AUV'ye benzer alt modülleri, Myring formu ile torpidoya benzer formdan yararlanılarak geliştirilmiştir. Bunun dışında biyomimikri metoduyla öncelikle gagalı balina (*Ziphius Cavirostris*) formundan (Şekil 5.38) faydalanılmış, akabinde belirli oranda ispermeçet balinası (*Physeter Macrocephalus*) (Şekil 5.39) ve beyaz köpek balığının (*Carcharodon carcharias*) (Şekil 5.40) formlarından da esinlenilerek hibrit formlar da tasarlanmıştır. Ayrıca, yassı sırtlı deniz kaplumbağası (*Natator depressa*) formundan (Şekil 5.41) yararlanılarak su altı aracının üst modülü dizayn edilmiştir.



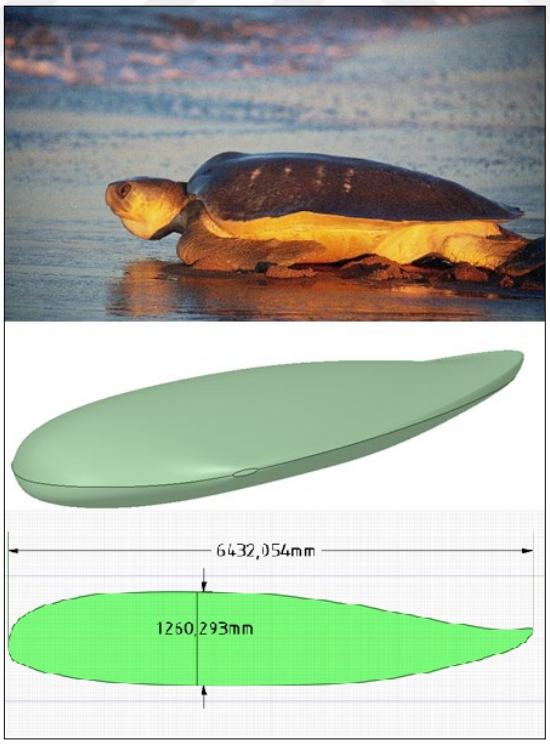
Şekil 5.37 Gagalı balina, model ve boyutları



Şekil 5.38 İspermeçet balinası, model ve boyutları

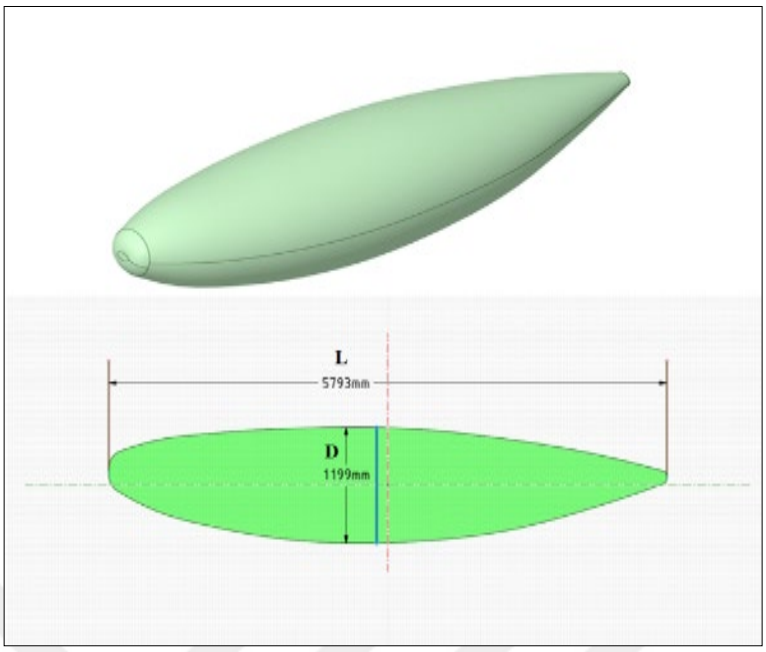


Şekil 5.39 Köpek balığı, model ve boyutları

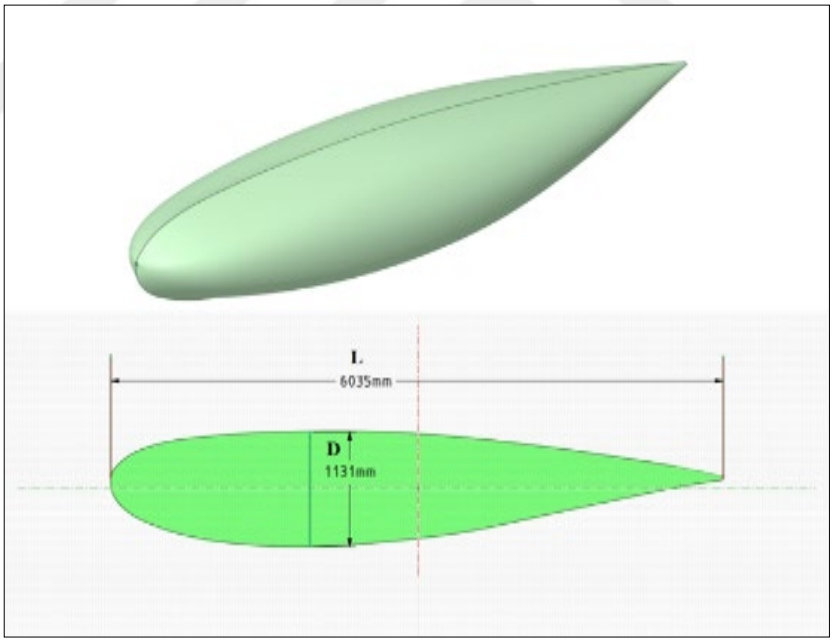


Şekil 5.40 Yassı sırtlı deniz kaplumbağası, model ve boyutları

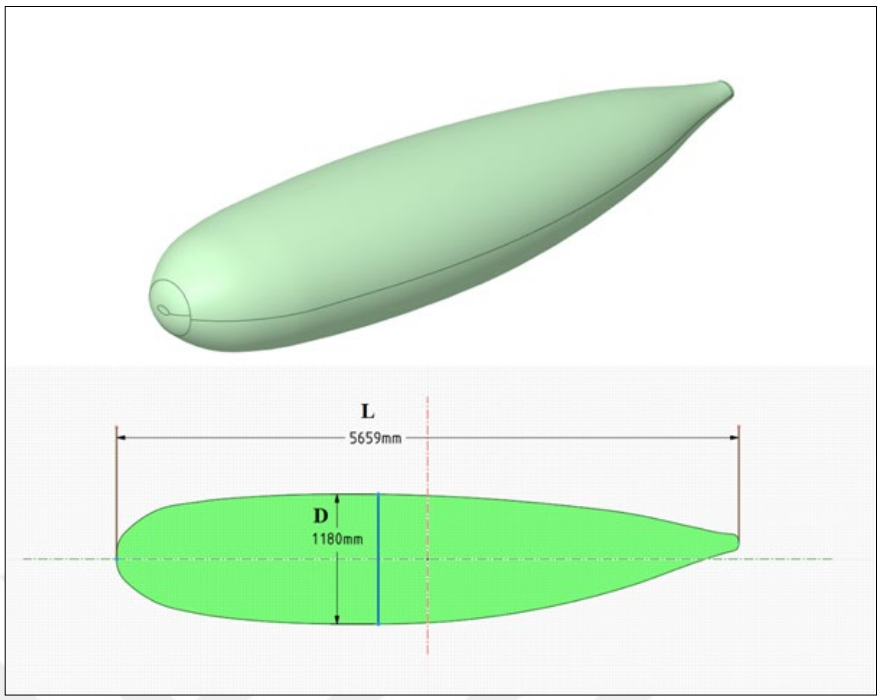
Hibrit modellerin, yani AUV-4-7'nin biyomimikri metodolojisi aracılığıyla, oluşturulması planlanmıştır. Tüm su altı araçları, enerjileri tükendiğinde ve/veya herhangi bir elektromekanik arıza nedeniyle sistemleri çalışmadığında kendi kendilerine su yüzüne çıkabilmeleri için pozitif sephiye, yani kaldırma kuvvetine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu nedenle denizde sabit bir derinlikte kalabilmeleri için mutlaka dikey eksenli motorların ve pervanelerin itme kuvvetine ihtiyaçları vardır. Bu durum enerji tüketiminde önemli bir artışa neden olduğu için su altı operasyonlarının süresi de oldukça kısıtlı olabilmektedir. Dolayısıyla AUV-4, AUV-5, AUV-6 ve AUV-7'nin formları "spoiler" e göre oluşturulmuş, böylece bu formlar ters kanat formunu kazanmıştır. Bu nedenle, bu AUV'ler yalnızca araçların ileri hareketinde oluşan form geometrisinin oluşturduğu aşağı doğru itme nedeniyle nötr stabilite kazanacak ve böylece önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlayacaktır. Ayrıca bu son dört modelin formları gagalı ve ispermeçet balinası modelinden ve köpekbalığı modelinden daha sade üretilebilmektedir. Modellenen AUV-4'ün baş kısmı AUV-3'ünkinden, orta gövdesi ve kıç kısmı ise biyomimikri prensibiyle boylamasına eksen etrafında 180 derece döndürülmüş, baş kısmı olmayan gagalı balinadan oluşmaktadır. Böylelikle AUV-4 olarak adlandırılan bu formun, araç altında oluşan negatif basınç alanı nedeniyle ileri doğru harekette aşağı doğru bir itme kuvvetine ihtiyaç duymaması için bir spoiler formu elde edilebilmiştir. Daha sonra, olgun bir gagalı balina ve uzunlamasına eksen etrafında 180 derece dönen ispermeçet balinasından ilham alınarak AUV-5'in formu oluşturulmuştur. İspermeçet balinasının modeli, AUV-6 olarak adlandırılan tamamen yenilenmiş baş şekli ile oluşturulmuştur. Gagalı balinadan ilham alınarak oluşturulan AUV-7 ise gagalı balinanın boyuna eksen etrafında 180 derece döndürülmesi ve köpekbalığının formuna göre değiştirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu formun ve diğer özelliklerinin 2021 yılında Türk Patent ve Marka Kurumu aracılığıyla patenti alınmış ve buluş için Patent Anlaşmaları İşbirliğine (PCT) başvurulmuştur. Şekil 5.42, Şekil 5.43, Şekil 5.44 ve Şekil 5.45'te tüm AUV'lerin modelleri ve boyutları, Şekil 5.46'da ise hibrit platform ve boyutları gösterilmiştir.



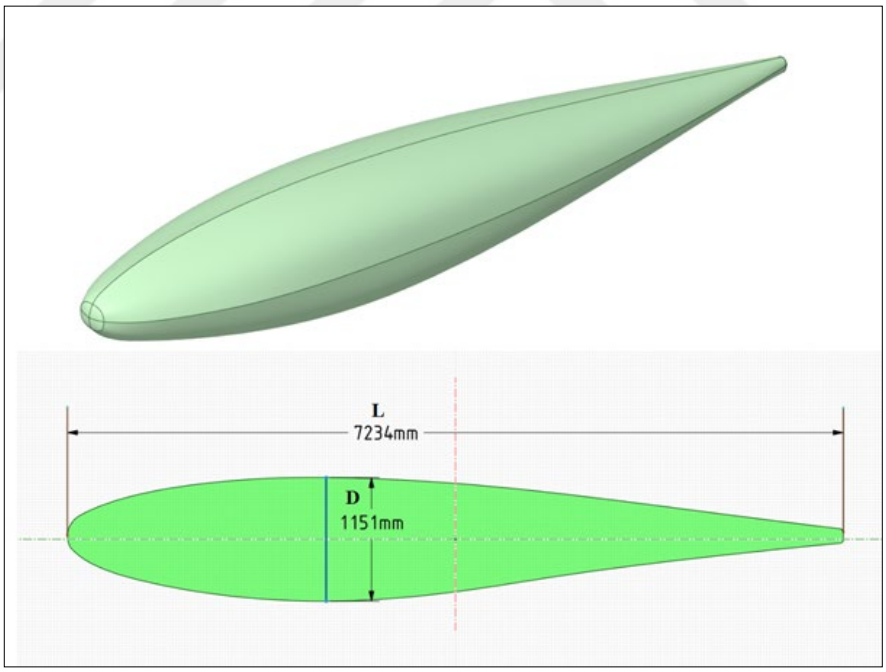
Şekil 5.41 AUV-4 ve boyutları



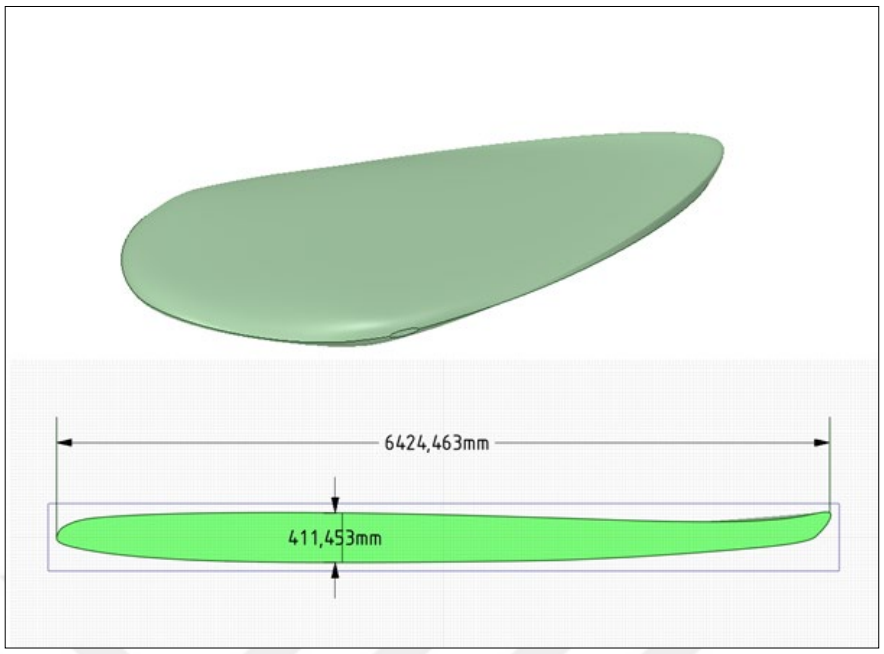
Şekil 5.42 AUV-5 ve boyutları



Şekil 5.43 AUV-6 ve boyutları

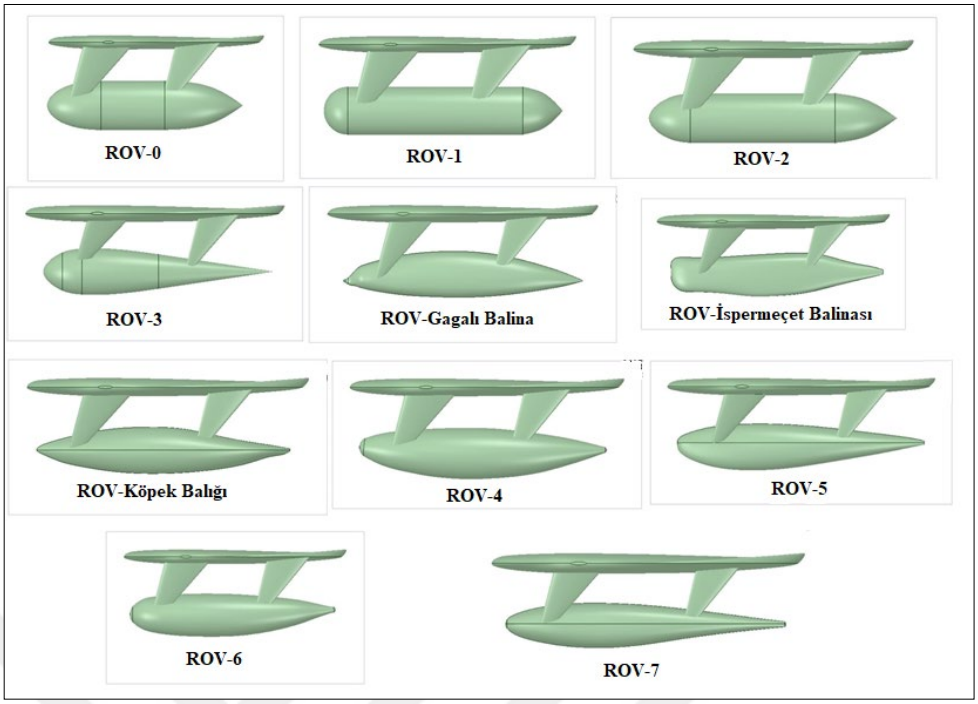


Şekil 5.44 AUV-7 ve boyutları

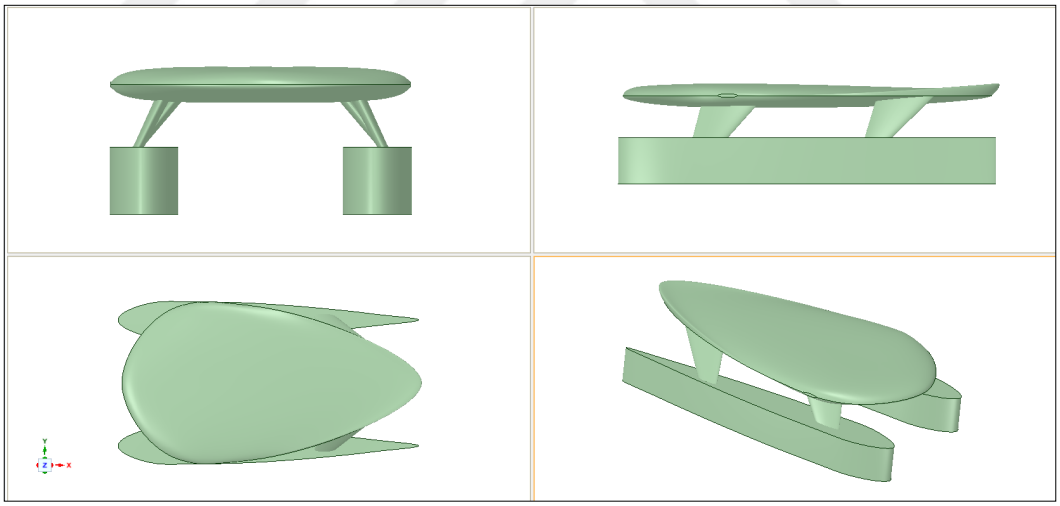


Şekil 5.45 Hibrit platform ve boyutları

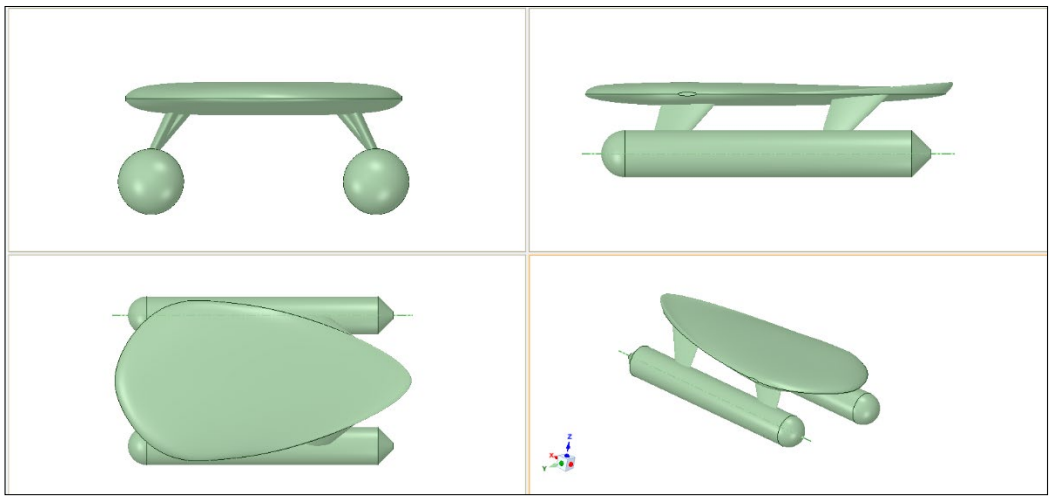
Bu tez kapsamında AUV formları ile platformların birleştirilmesi sonucu ROV formları oluşturulmuştur (Şekil 5.47). Şekil 5.48 ve Şekil 5.49'da ise sırasıyla NACA profilinden türetilen sephiye elemanına sahip ASV ve ponton sephiye elemanına sahip ASV verilmiştir.



Şekil 5.46 ROV- formları



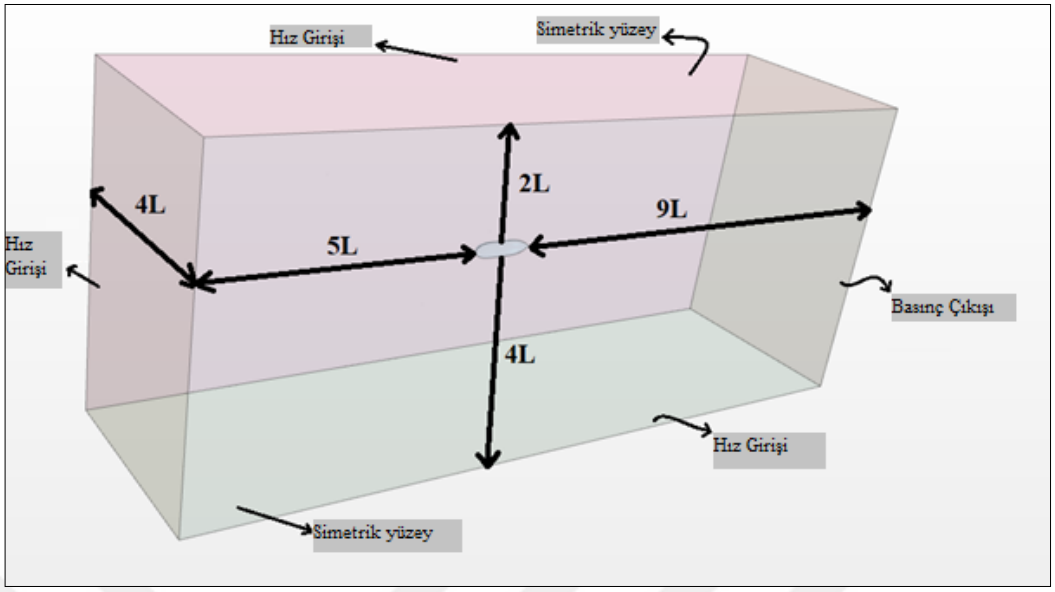
Şekil 5.47 NACA profilinden türetilen sephiye elemanına sahip ASV



Şekil 5.48 Ponton sephiye elemanına sahip ASV

5.3.2 Hesaplama Hacimleri ve Sınır Şartlarının Tanımlanması

Sayısal benzetimlerde hesaplama hacimleri ve ağ boyutları L=5,102 m ile L=7,234 m olan modellerin uzunluğuna göre ayarlanmıştır. Hesaplama hacmi, ITTC (2011) tarafından yayımlanan kılavuza göre oluşturulmuş ve modelin önünde 5L, arkasında 9L, yanda 4L ve altında 4L uzanacak şekilde hazırlanmıştır. Modelin üzerindeki mesafe ise 2L'dir. Modeller etrafındaki akış, gövdenin merkez hattına göre simetrik kabul edilmiştir. Bu nedenle hesaplama alanının yalnızca yarısı modellenmiştir ve sonlu hacim eleman sayısı makul bir düzeyde tutularak hesaplama süresi önemli ölçüde azaltılmıştır. Hesaplama hacmi sınırlarının belirtildiği Şekil 5.50, akışın 'hız girişinden' verildiğini ve hesaplama hacminin sonunun 'basınç çıkışı' sınır koşulu olarak tanımlandığını göstermektedir. Üst ve alt sınırlar da 'hız girişi' olarak tanımlanmıştır. Modellerin yüzeyi ise ‘duvar’ olarak tanımlanmıştır. Bu koşul için akışın boylamasına yatay ve dikey düzlemlere göre simetrik olduğu varsayılmaktadır. Bu, hesaplama alanının diğer yarısını doğru bir şekilde simüle etmeyi sağlayan 'simetri düzlemi' sınır koşulu kullanılarak elde edilir. AUV ve ROV modelleri tamamen su altında kabul edilir, bu da serbest yüzey etkilerinin ihmal edildiği anlamına gelir. Ancak ASV analizlerinde iki fazlı akış kullanılmıştır.



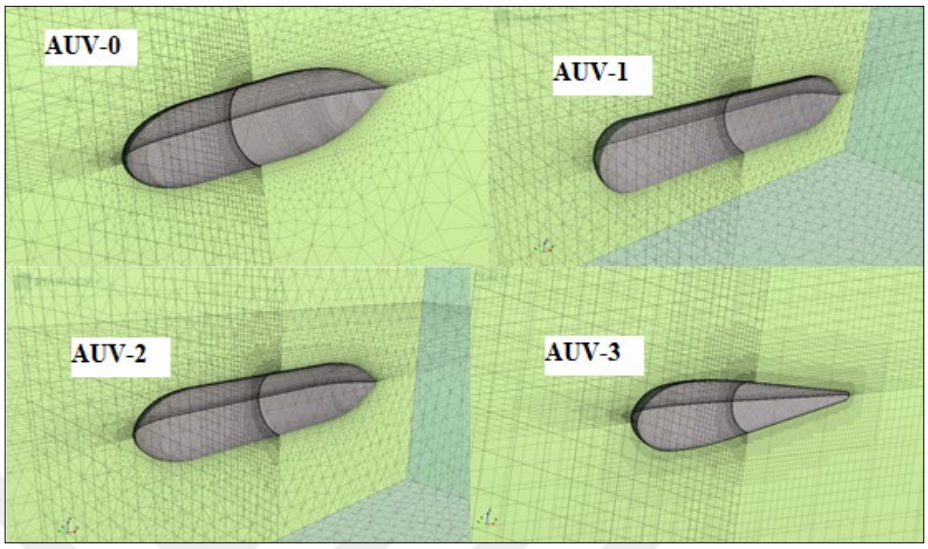
Şekil 5.49 AUV modelleri için kullanılan hesaplama hacmi

Üç boyutlu türbülanslı akış, ayrılmış akış ve sabit yoğunluk modelleri ile modellenmiştir. Ana denklemleri çözmek için Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri ve k-ω türbülans modeli kullanılmıştır. AUV ve ROV analizleri tek fazda yapıldığından serbest yüzey etkisi ve dalga direnci ihmal edilmiştir. Analizlerde suyun sıcaklığı 20º C kabul edilmiş ve akışkan özellikleri bu sıcaklığa göre oluşturulmuştur.

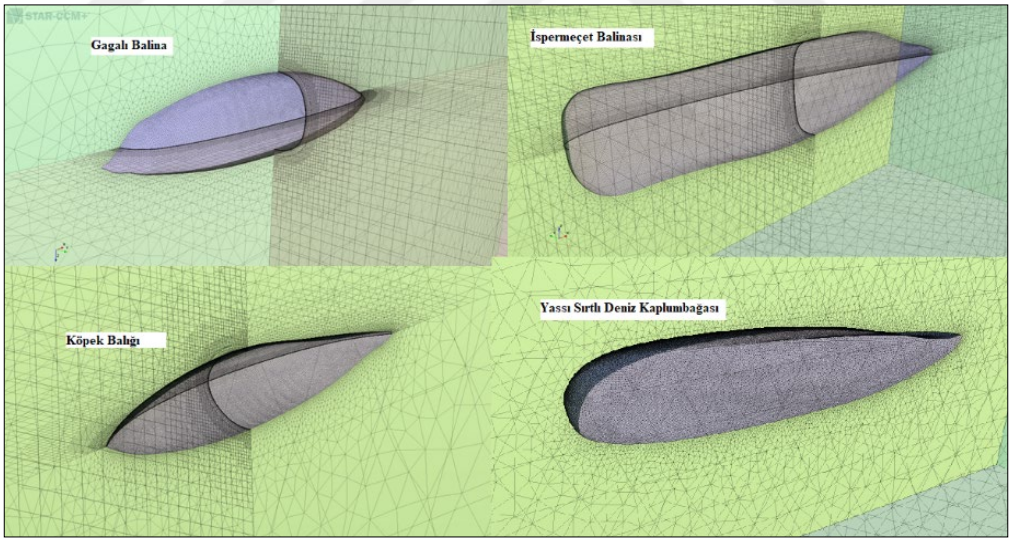
5.3.3 Ağ Yapısının Oluşturulması

HAD simülasyonları için kullanılan ızgara oluşturma teknikleri aşağıdaki gibi özetlenmiştir. Sayısal ağ, yapılandırılmış bir ızgaradır; ancak ağ, AUV, ROV ve ASV modellerinde yapılandırılmamış altı yüzlü hücrelerden oluşur. Sınır tabakasını çözmek için modellerin yüzeyine yakın yerlere prizmatik hücreler uygulanmış ve türbülans etkisini yüksek çözünürlükle yakalamak için modellerin etrafındaki yerel hacim ağ iyileştirmelerinden yararlanılmıştır. Sayısal analizlerde kararlılığı sağlayan diğer ana parametre zaman adımıdır. Zaman adımı (Δt) her iteratif çözümün süresini tanımlar ve çalışmada gerçekleştirilen tüm durumlar için 0,01 s olarak belirlenmiştir. Hesaplama hacimlerindeki modellerinin yakınındaki ağ, sınır tabakası bölgesinde AUV formları için Şekil 5.51, Şekil 5.52 ve Şekil 5.53'te, ROV ve ASV formları için

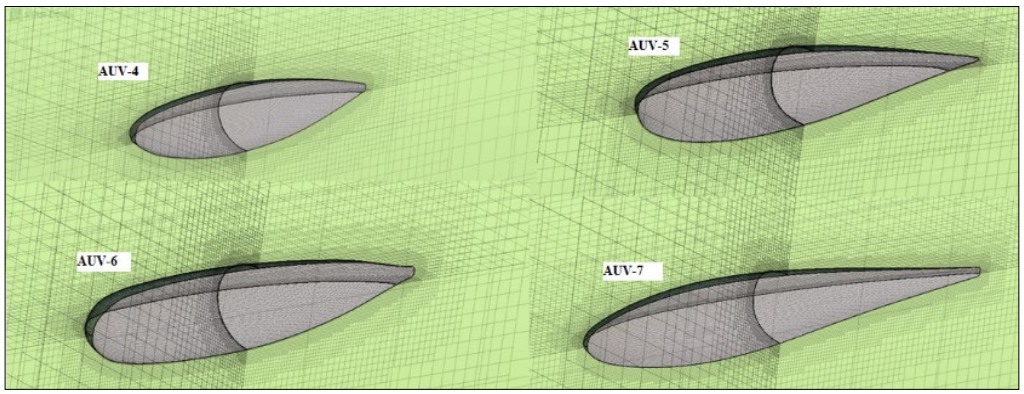
Şekil 5.54'te sunulmaktadır. Sonuç olarak, toplam eleman sayısı, yani ağ sayısı, tüm hesaplama alanı için 1,26 milyon ile 1,82 milyon arasında değişmektedir



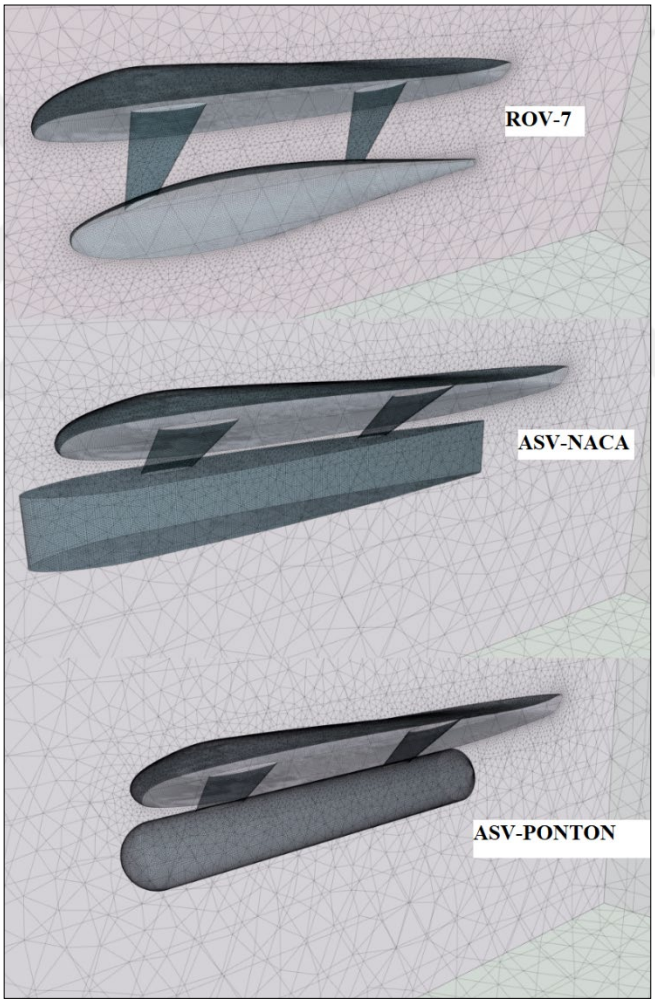
Şekil 5.50 Torpido formlu AUV modelleri için oluşturulan ağ yapıları



Şekil 5.51 Seçilen deniz canlılarına ait AUV modelleri için oluşturulan ağ yapıları



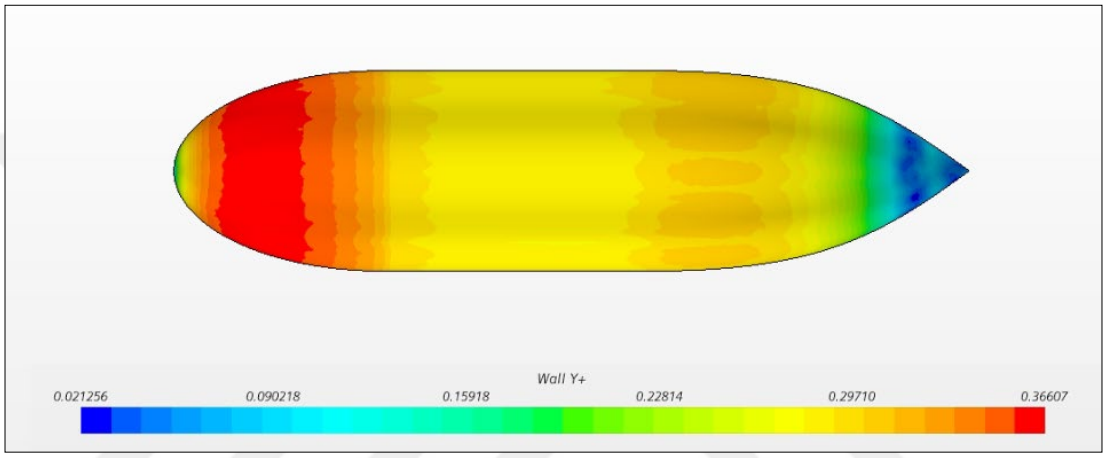
Şekil 5.52 Hibrit formlu AUV modelleri için oluşturulan ağ yapıları



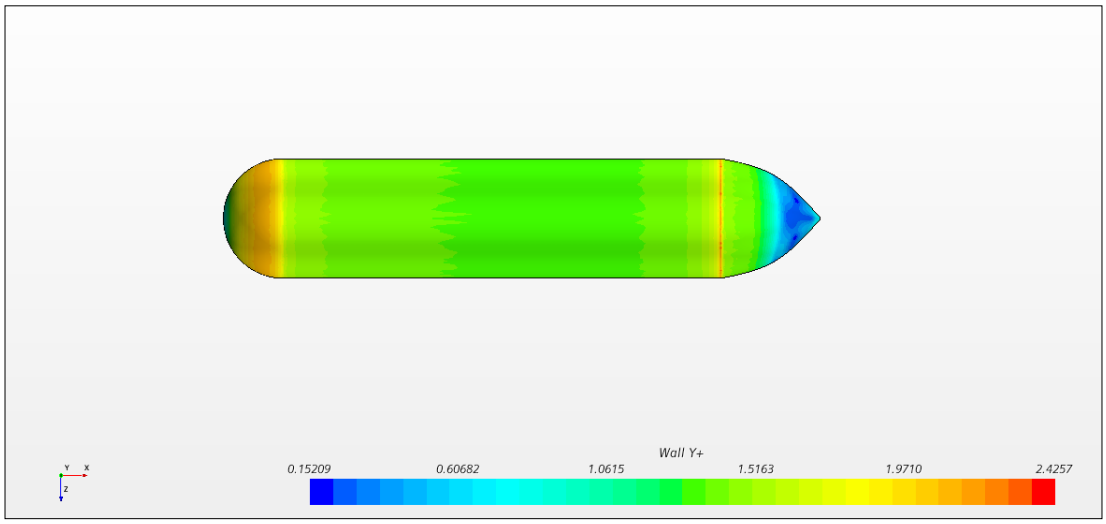
Şekil 5.53 ROV-7 ve ASV modelleri için oluşturulan ağ yapıları

5.3.4 Sonuçların Değerlendirilmesi

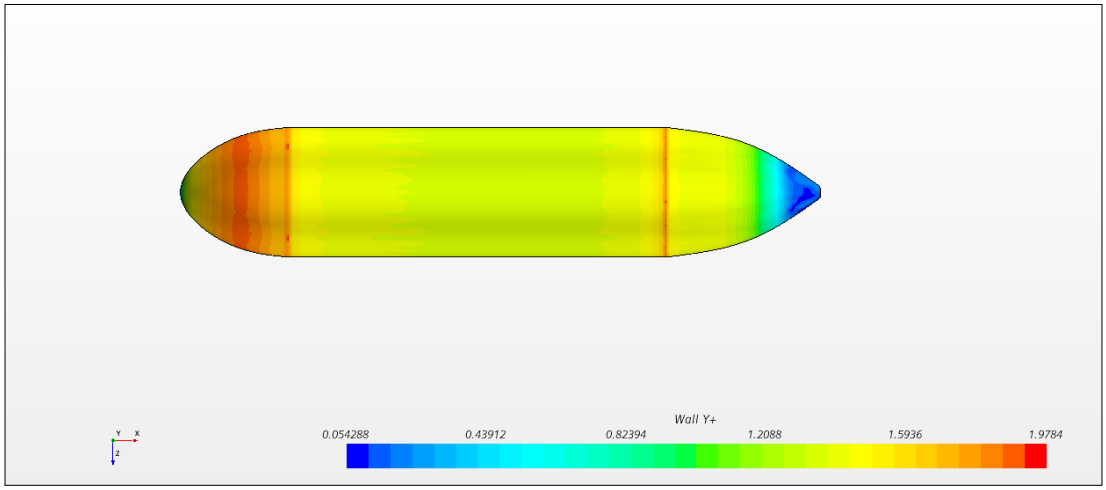
Analizlerde, duvardan ilk grid noktası olan y+ değeri, türbülansın sınır tabakasında yakalanması için yeterince küçüktür. Duvar y+ değerleri y+ ≤ 5 olarak bulunmuştur. V=5 m/s için torpido formundaki AUV'lerin simülasyonlarındaki duvar y+ değer aralıkları Şekil 5.55, Şekil 5.56, Şekil 5.57 ve Şekil 5.58'te gösterilmektedir.



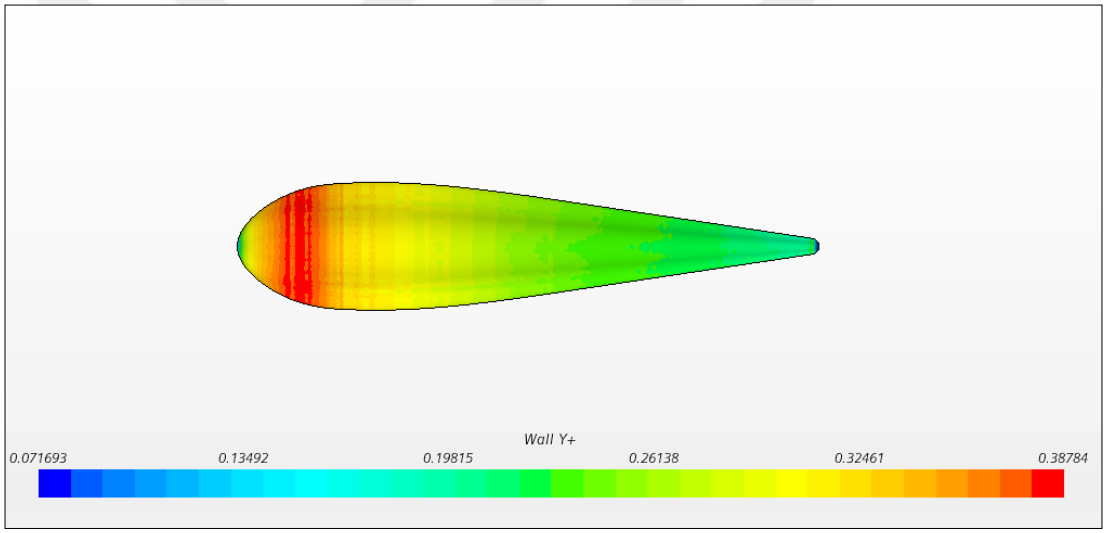
Şekil 5.54 AUV-0 y+ dağılımı



Şekil 5.55 AUV-1 y+ dağılımı

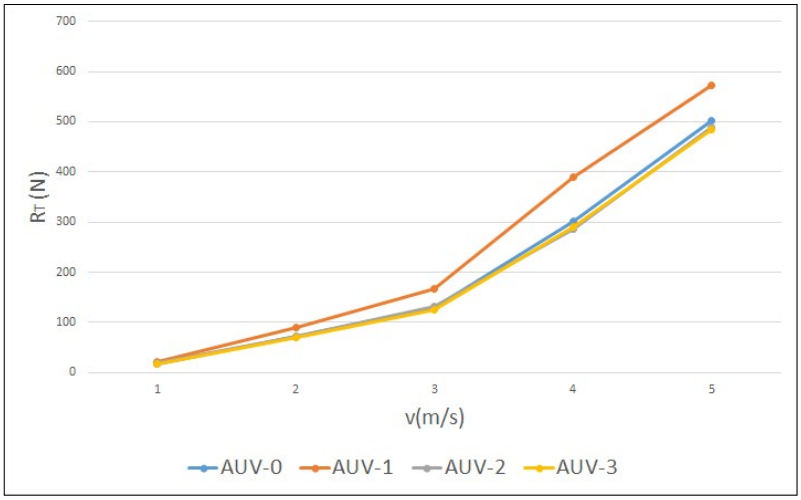


Şekil 5.56 AUV-2 y+ dağılımı



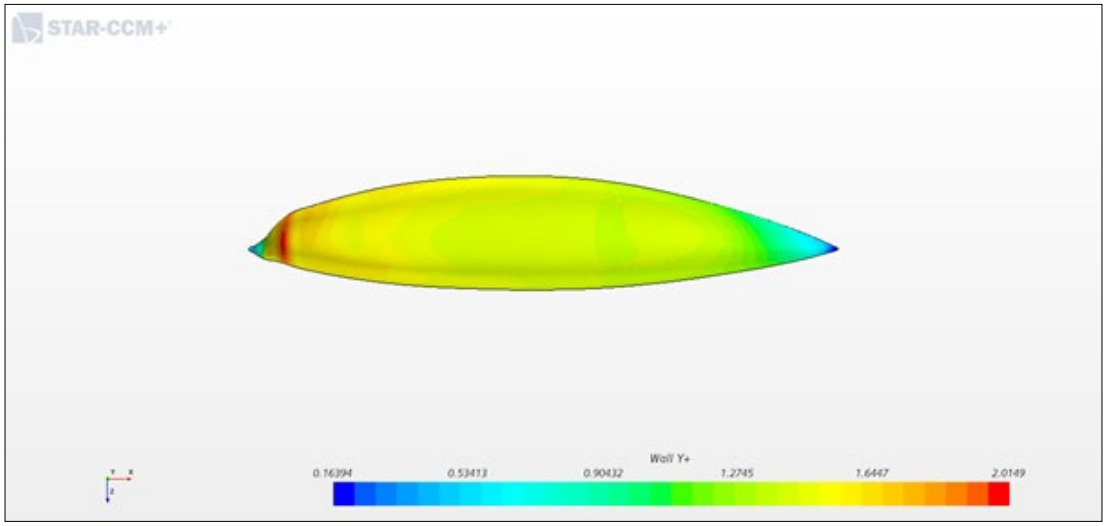
Şekil 5.57 AUV-3 y+ dağılımı

HAD analizleri sonucunda 1-5 m/s hızlarda AUV-2 ve AUV-3'ün en düşük direnç değerlerine sahip oldukları gözlenmiştir (Şekil 5.59). Beklendiği üzere baş ve kıç formlarının narinliği arttıkça modellerin direnç değerleri düşmüştür.

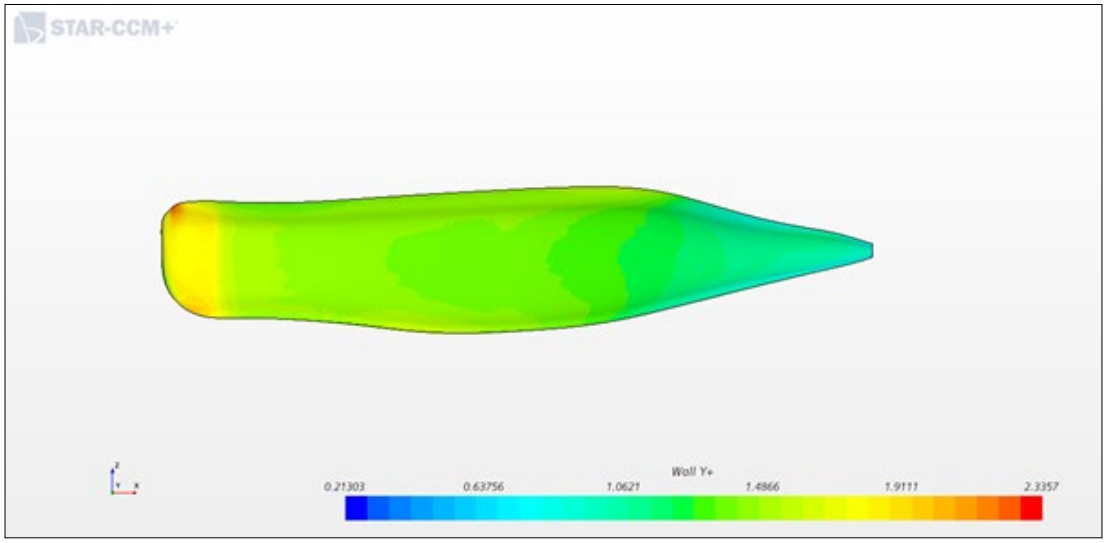


Şekil 5.58 Torpido formundaki AUV modellerinin direnç değerleri

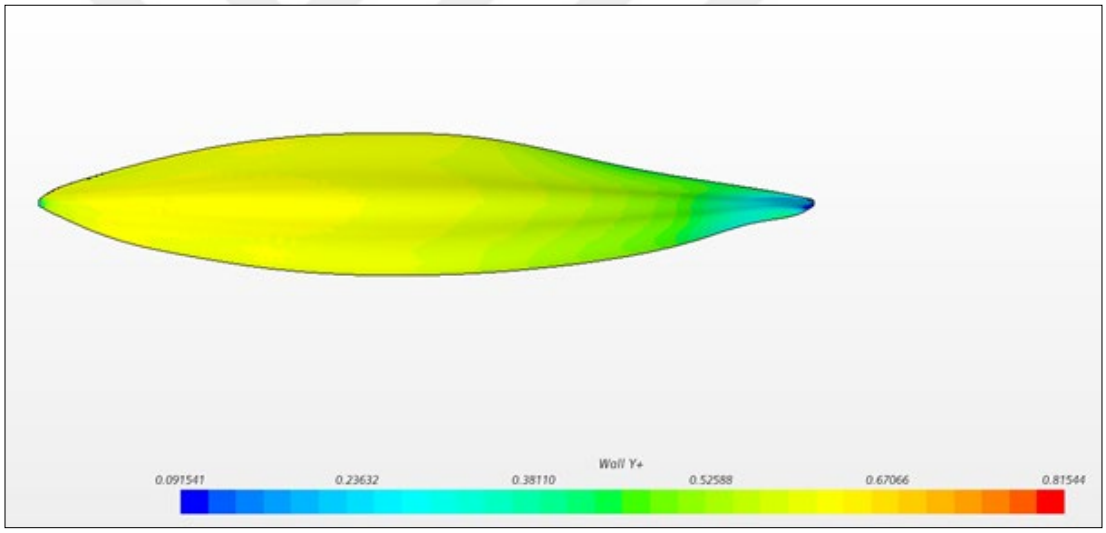
HAD analizleri sonucunda 1-5 m/s hızlarda gagalı balina ve ispermeçet balinasının en düşük direnç değerlerine sahip oldukları gözlenmiştir (Şekil 5.64). Analizlerde, duvarda ilk grid noktasında olan y+ değeri, türbülansın sınır tabakasının yakalanması için yeterince küçük olup V=5 m/s için simülasyonlardaki duvar y+ değer aralıkları Şekil 5.60, Şekil 5.61, Şekil 5.62 ve Şekil 5.63'te gösterilmektedir.



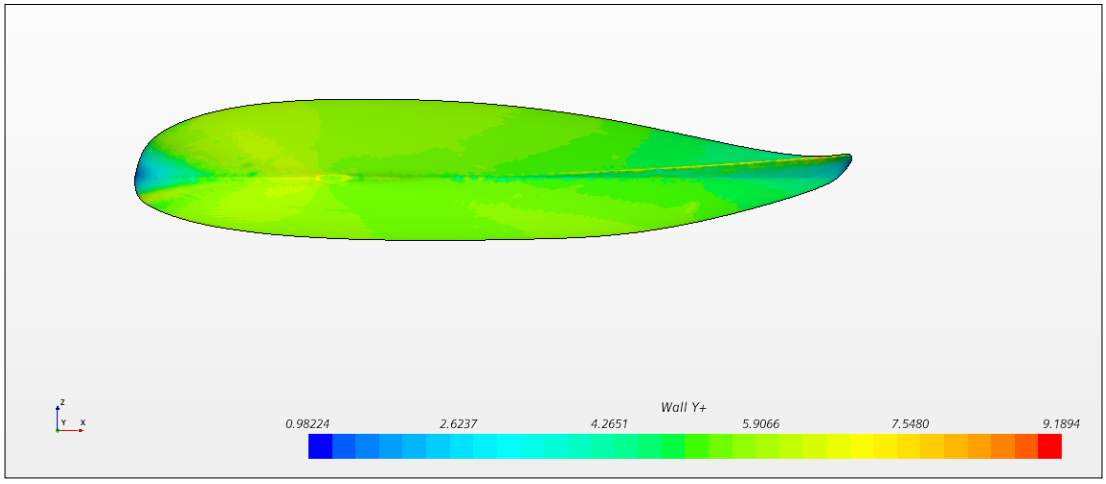
Şekil 5.59 Gagalı balina modeli y+ dağılımı



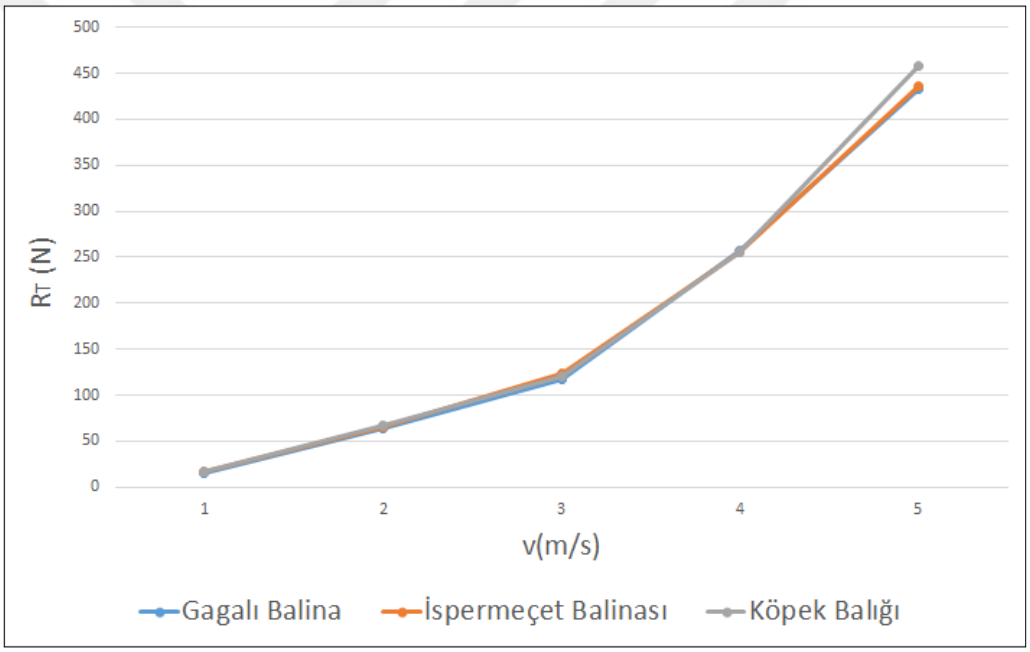
Şekil 5.60 İspermeçet balinası modeli için y+ dağılımı



Şekil 5.61 Köpek balığı modeli için y+ dağılımı



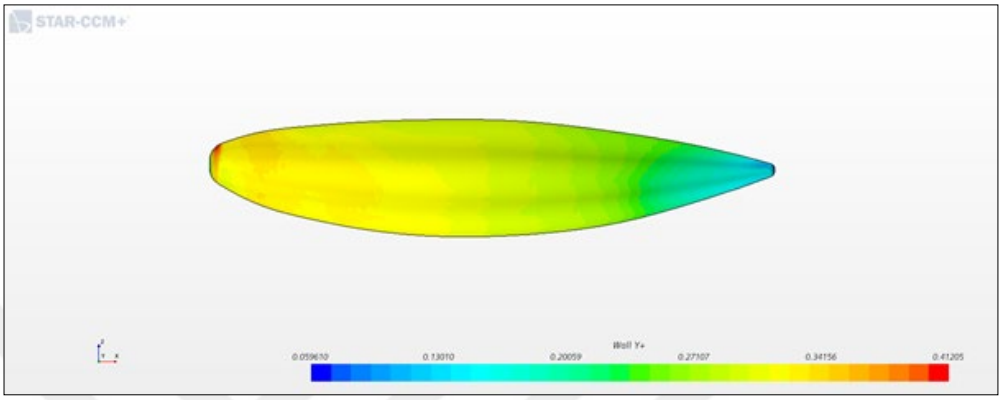
Şekil 5.62 Yassı sırtlı deniz kaplumbağası modeli için y+ dağılımı



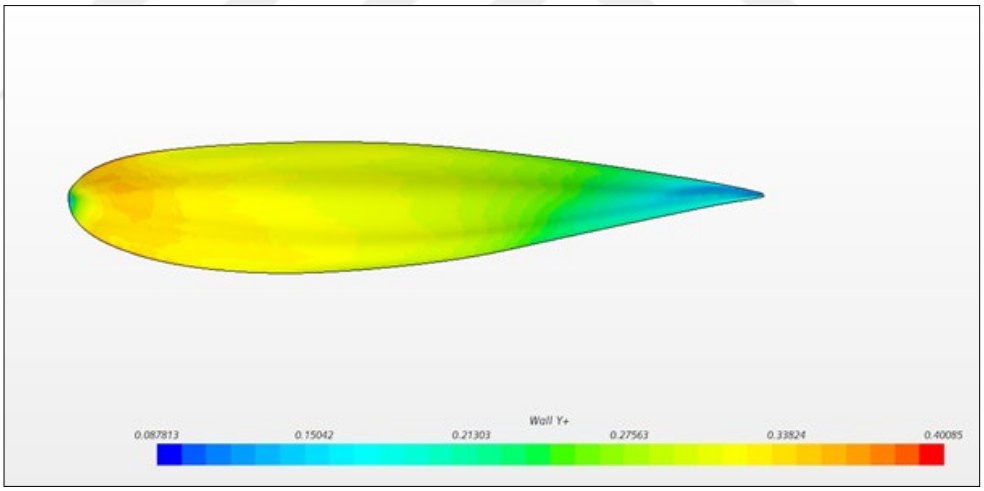
Şekil 5.63 Seçilen deniz canlılarının AUV modellerinin direnç değerleri

Hibrit formların HAD analizleri sonucunda 1-5 m/s hızlarda AUV-7'nin (Şekil 5.70) ve ROV-7'nin (Şekil 5.73) en düşük direnç değerlerine sahip oldukları gözlenmiştir. Akış hatlarını en az şekilde bozan narin formun yanı sıra ek daldırma kuvveti sağlaması bu modelleri avantajlı kılmaktadır. Duvar y+ değerleri $y+ \leq 5$ olarak bulunmuştur. Hibrit AUV modellerinin V=5 m/s için simülasyonlardaki duvar y+ değer aralıkları Şekil 5.65, Şekil 5.66, Şekil 5.67, Şekil 5.68 ve Şekil 5.69'da

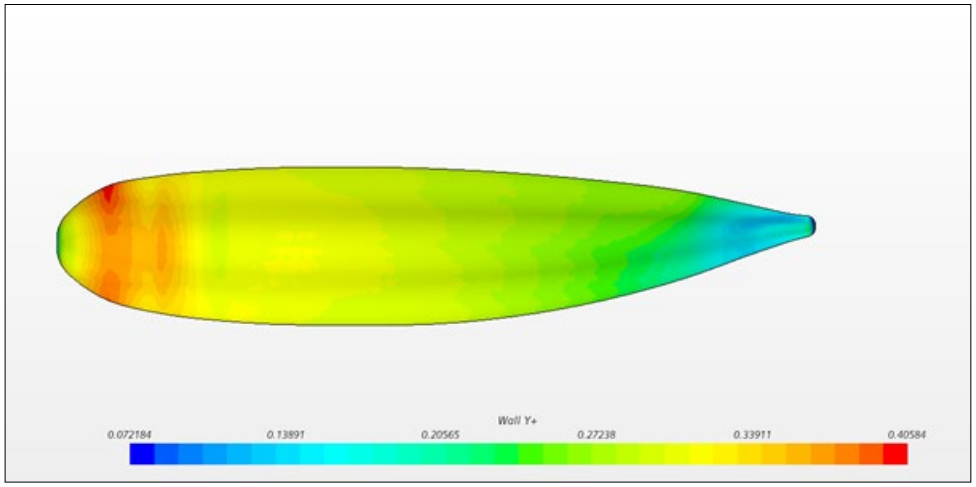
gösterilmektedir. ROV modellerinin y+ değer aralıkları ilgili oldukları AUV modelleriyle aynı mertebede bulunmuştur. ASV modellerinin V=5 m/s için simülasyonlardaki duvar y+ değer aralıkları ise Şekil 5.71 ve Şekil 5.72'de gösterilmektedir.



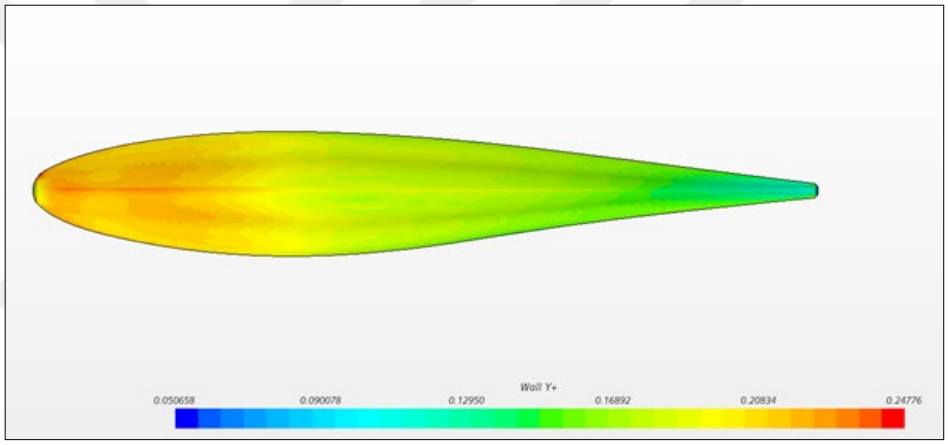
Şekil 5.64 AUV-4 modeli için y+ dağılımı



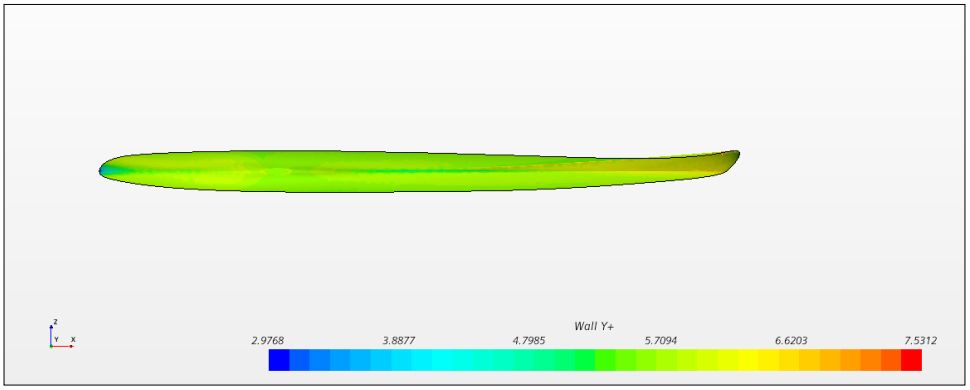
Şekil 5.65 AUV-5 modeli için y+ dağılımı



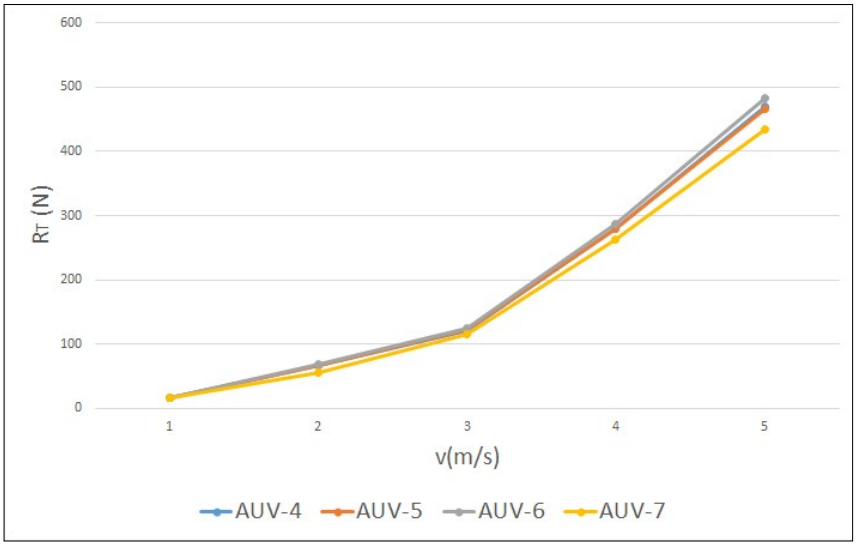
Şekil 5.66 AUV-6 modeli için y+ dağılımı



Şekil 5.67 AUV-7 modeli için y+ dağılımı



Şekil 5.68 Hibrit platform modeli için y+ dağılımı



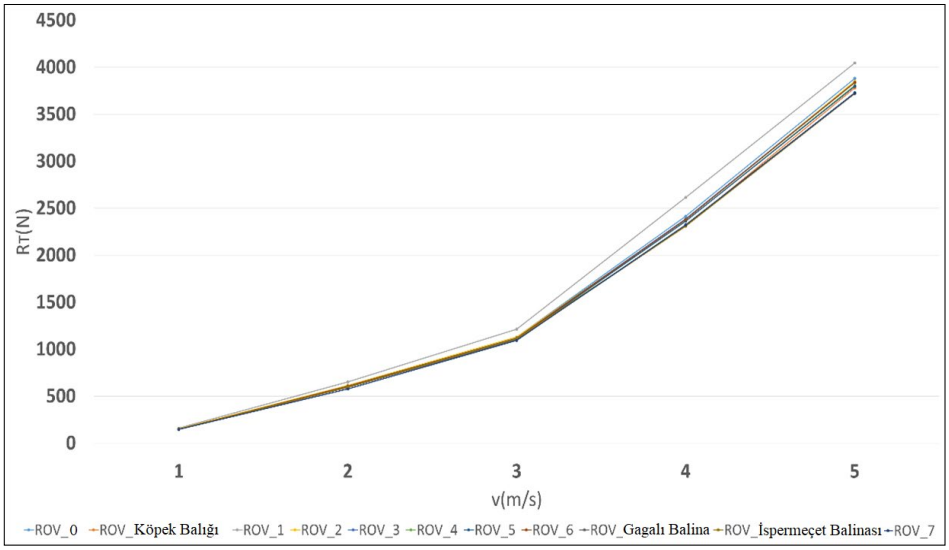
Şekil 5.69 Hibrti formdaki AUV modellerinin direnç değerleri



Şekil 5.70 NACA-ASV modeli için y+ dağılımı



Şekil 5.71 Ponton-ASV modeli için y+ dağılımı



Şekil 5.72 ROV modellerinin direnç değerleri

BÖLÜM ALTI
SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Otonom Su Altı Aracı (AUV), Uzaktan Kumandalı Araç (ROV) ve Otonom Su Üstü Aracı (ASV) olarak işlev görebilen modüler insansız bir su altı araştırma aracının tasarımı yapılmıştır. Bu çok yönlü aracın amacı jeoloji, jeofizik ve oşinografi gibi çeşitli alanlarda bilimsel araştırmalar yapmak ve mühendislik projelerine katkıda bulunmaktır. Araç, kimyasal, biyolojik, optik, elektromanyetik ve akustik ekipmanlar dahil olmak üzere bir dizi sensör kullanarak, toplanan verilerin anında iletilmesini sağlayacaktır. Bu sensörler, gerçek zamanlı gözlemleri kolaylaştıracak ve gözlemlerin, aracın bağlı olduğu bir gemiden veya karada bulunan merkezi bir kontrol merkezinden yürütülmesine olanak tanıyacaktır. Deniz araştırmalarına otonom su altı araç teknolojilerinin dahil edilmesi, araştırma projelerinin kapsamını genişletecektir. Bunlar, su altı madenciliği, haritacılığı ve açık deniz araştırmaları gibi girişimleri kapsamaktadır.

Biyomimikri metodolojisi, özellikle mühendislik tasarım süreçlerini tamamlamak için alternatif ve etkili bir seçenek olarak ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada, uygun bir sualtı aracı formu geliştirmek için biyomimikri yönteminden yararlanılmıştır. Biyomimikri yöntemi temeli olarak doğada varlığını sürdürmek için çeşitli çözümler üretmiş olan hayvan, bitki ve organizmaların geliştirdiği çözüm yöntemlerinden ilham almaktadır. Bu çalışmada biyomimikri, otonom sualtı aracının tasarımında özel olarak kullanılırken, daha geniş bir bakış açısıyla, yapısal hususlardan yazılım geliştirmeye kadar tasarım sürecinin neredeyse tüm yönlerinde etkili yenilikler getirebilecek yol gösterici bir ilke olarak önemi vurgulanmaktadır.

İlk olarak, bu çalışmada gerçekleştirilen HAD yöntemine ait sayısal simülasyonlarının sonuçlarını doğrulamak için literatürde direnç deneyi sonuçları mevcut bulunan DARPA Suboff denizaltısı, bir SWATH tekne formu ve bir ROV formu modellenmiş ve analiz edilmiştir. HAD analizlerinde SST k-ω türbülans modeli ve yrıklaştırma işlemi için sonlu hacim yöntemi kullanılmıştır. Böylece, bu HAD simülasyonlarında elde edilen analizlerin sonuçları, modellerin test verileriyle

doğrulanmıştır. Daha sonra oluşturulan aşağıdaki aynı hacimsel deplasman ve benzer boy/genişlik oranlarına sahip modeller üzerinde gerçekleştirilen simülasyonlarda, STAR CCM+ ticari yazılımı kullanılmıştır:

- olgun bir kaz gagalı balina (*Ziphius Cavirostris*),
- olgun ispermeçet balinası (*Physeter Macrocephalus*),
- olgun bir beyaz köpekbalığı (*Carcharodon Carcharias*)
- dört torpido formundaki AUV modeli ve
- biyomimikriden ilham alan dört hibrit AUV modeli.

Elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak analiz edilmiş ve tartışılmıştır.

AUV-4-5-6-7 olarak adlandırılan hibrit modeller, temelde dört amaç için tasarlanmıştır: Birincisi, viskoz direnci en düşük, sevk verimi yüksek ve manevra kabiliyeti üstün formun aranmasıdır. İkincisi, AUV'ler herhangi bir elektromekanik arıza durumunda hızlı bir şekilde yüzeye çıkmalarını sağlamak için pozitif kaldırma kuvveti ile tasarlanacağından, ileriye doğru seyirde enerji tüketimini sınırlandırmak için biyomimikriden ilham alarak formların bir "spoiler" profil formunun kazandırılması gereklidir. Gerekli donanımın yerleştirilebilmesi için aracın yeterli hacime sahip olması, üretim maliyetlerinin düşük olması için aracın daha sade ve bir forma sahip olması üçüncü ve dördüncü amaç olarak dikkate alınmıştır..

Bu çalışmada biyomimikriden ilham alarak oluşturulan biyomimikriden ilham alan AUV-4-5-6-7 formları, türbülanslı kinetik enerjinin dağılım alanları açısından AUV-0, AUV-1, AUV-2 ve AUV-3'ten daha iyi özelliklere sahip olmakla birlikte AUV-4-5-6-7 formlarının direnç analizi sonuçları birbirine yakın görünmektedir. Benzer şekilde, hem balinaların hem de köpek balıklarının milyonlarca yıl sonra evrimleşen formları, hidrodinamik özellikler bakımından AUV-0, AUV-1, AUV-2 ve AUV-3 modellerinden daha iyi görünmektedir. AUV-4-5-6-7'nin değerleri oldukça benzer olup en iyi performansı AUV-7 göstermektedir. En düşük direnç özelliklerine ve enerji tüketimine sahip bir AUV formu geliştirmek en önemli tasarım önceliği olsa da, geliştirilecek AUV'deki navigasyon ve sevk sistemleri ile diğer ekipmanları

barındırmak için yeterli iç hame sahip olma özelliği göz ardı edilemez. Deniz canlılarının formları, AUV-4-7'nin formlarına göre çok daha az hacim içerdiğinden ve daha yüksek maliyetli üretimlere yol açtığından, AUV-7'nin üretilen formu, düşük viskoz direnç özellikleri, düşük maliyetli üretim, ileri hareket halindeyken daha yüksek aşağı yönlü kuvvet oluşturma, bataryalar, seyrüsefer / tahrik / ölçüm sistemleri ve ekipmanları ile ilgili yüksek hacim gereksinimi gibi taleplerin karşılanmasında daha fazla avantaj sağlayan nihai form olarak seçilmiştir.

KAYNAKLAR

Alam, K., Ray, T. ve Anavatti, S. G. (2014). A brief taxonomy of autonomous underwater vehicle design literature. *Ocean Engineering*, *88*(88), 627–630. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.04.027.

Allotta, B., Pugi, L., Bartolini, F., Constanzi,R., Monni,N., Gelli, J. ve Ridolfi, A. (2013). *The thesaurus project, a long range auv for extended exploration, surveillance and monitoring of archaeological sites.* MARINE V: Proceedings of the V International Conference on Computational Methods in Marine Engineering (760-771). CIMNE

Allotta, B., Pugi, L., Bartolini, F., Ridolfi,A., Costanzi,R., Monni, N. ve Gelli, J. (2015). Preliminary design and fast prototyping of an Autonomous Underwater Vehicle propulsion system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, *229*(3), 248–272. https://doi.org/10.1177/1475090213514040.

Alves, J., Oliveira, P., Oliveira, R., Pascoal, A., Rufino, M., Sebastiao, L. ve Silvestre, C. (2006). *Vehicle and mission control of the DELFIM autonomous surface craft*. 14th Mediterranean Conference on Control and Automation. IEEE. https://doi.org/10.1109/med.2006.328689.

Bae, H. ve Lee, E. (2019). Biological and ecological classification of biomimicry from a biology push standpoint. *Ecosphere*, *10*(11), e02959. https://doi.org/10.1002/ecs2.2959.

Båmstedt, U., Kaartvedt, S. ve Youngbluth, M. (2003). An evaluation of acoustic and video methods to estimate the abundance and vertical distribution of jellyfish. *Journal of Plankton Research*, *25*(11), 1307–1318. https://doi.org/10.1093/plankt/fbg084.

Begovic, E., Bertorello, C. ve Mancini, S. (2015). Hydrodynamıc performances of small sıze swath craft. *Brodogradnja: Teorija İ Praksa Brodogradnje İ Pomorske Tehnike*, *66*(4), 1–22. https://hrcak.srce.hr/clanak/220442.

Benyus, J. M. (1997). *Biomimicry: Innovation inspired by nature*. https://aracnetool.eu/sites/default/files/biomimicry-innovation-inspired-by-nature-janine-m-benyus-pdf-download-free-book-2bc616e.pdf.

Bertram, V. (2008). *Unmanned surface vehicles-a survey*. https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=461789955de8ddb5c6195b9c95c0ff985caccf7c.

Bertram, V. (2011). *Submarine hull design*. https://www.ntnu.edu/documents/20587845/1266707380/2012chennai_submarinedesign.pdf

Boavida, J., Assis, J., Reed, J., Serrão, E. A., ve Gonçalves, J. M. S. (2016). Comparison of small remotely operated vehicles and diver-operated video of circalittoral benthos. *Hydrobiologia*, *766*(1), 247–260. https://doi.org/10.1007/s10750-015-2459-y.

Brizzolara, S., Bovio, M., Federici, A., ve Vernengo, G. (2011). *Hydrodynamic design of a family of hybrid SWATH unmanned surface vehicles.* (pp. 821-828). Sea Grant College Program, Massachusetts Institute of Technology.

Broglia, R., Zaghi, S., Campana, E. F., Visonneau, M., Queutey, P., Dogan, T., . . . Milanov, E. (2015). *CFD validation for DELFT 372 catamaran in static drift conditions, ıncluding onset and progression analysis.* [Advance online publication]. SNAME Maritime Convention and 5th World Maritime Technology Conference. https://doi.org/10.5957/WMTC-2015-146.

Budak, G. ve Beji, S. (2016). *Computatıonal resıstance analyses of a generıc submarıne hull form and its geometrıc varıants*.

https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=17183200&an=118566123&h=pm1peebz7rl2mfa1xfpsoghnyuzxbijmugtqt1l5ljzdxsnugfxvy1bvl3pmh80dn71ttta2hb5zakjecumr2w%3d%3d&crl=c.

Christ, R. D. ve Wernli Sr, R. L., (2007). *The ROV manual: A user guide for observation class remotely operated vehicles*. Elsevier.

Chyba, M. (2009). Autonomous underwater vehicles. *Ocean Engineering*, *36*(1), 1. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2008.12.005.

Cook, S. E., Conway, K. W. ve Burd, B. (2008). Status of the glass sponge reefs in the Georgia Basin. *Marine Environmental Research*, *66*, S80-S86. https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2008.09.002.

DEU-İMST (2 Ağustos 2023). https://imst.deu.edu.tr/tr/.

De Sousa, J. V. N., de Macêdo, A. R. L., de Amorim Junior, W. F., & de Lima, A. G. B (2014). Numerical analysis of turbulent fluid flow and drag coefficient for optimizing the auv hull design. *Open Journal of Fluid Dynamics*, *4*(3), 263–277. https://doi.org/10.4236/ojfd.2014.43020.

Dunbabin, M., Grinham, A., ve Udy, J. (2009). *An autonomous surface vehicle for water quality monitoring*. https://www.araa.asn.au/acra/acra2009/papers/pap155s1.pdf.

Eleftheriou, A. (2013). *Methods for the study of marine benthos* (4. Baskı). Wiley-Blackwell.

Gonzalez, L. A. (2004). *Design, modelling and control of an autonomous underwater vehicle* [BE Thesis]. The University of Western Australia. https://www.kimerius.com/app/download/5785518080/design,+modeling+and+control+of+an+autonomous+underwater+vehicle.pdf.

Gürsel, K. T. ve Taner, M. (2019). Hydrodynamic potential ımprovement of pontoon boats. *Naval Engineers Journal*, *131*. https://www.ingentaconnect.com/content/asne/nej/2019/00000131/00000002/art00017.

Gürsel, K. T. & Taner, M., (2022). Otonom deniz aracı tasarımı ve prototip üretimi bölüm ı optimum gövde formunun belirlenmesi ve malzeme seçimi. Denizel Kompozitler (pp.53-88). Ankara: İksad Yayınevi.

Gürsel, K. T., Taner, M., Ünsalan, D., Neşer, G., Altunsaray, E. ve Önal, M. (2017). Form development and valıdatıon of an autonomous underwater vehıcle. *Scientific Bulletin of Naval Academy.* https://doi.org/10.21279/1454-864x-17-i1-036.

Howell, K. L. (2014). *Analysis of biological data from the JC060 survey of areas of conservation interest in deep waters off north and west Scotland*. https://scholar.google.com/citations?user=-to0xesaaaaj&hl=tr&oi=sra.

Husaini, M., Samad, Z. ve Arshad, M. R. (2009). CFD simulation of cooperative AUV motion. https://nopr.niscpr.res.in/bitstream/123456789/6212/1/ijms%2038(3)%20346-351.pdf.

Insel, M., Molland, A. F., ve Wellicome, J. F. (1970). Wave resistance prediction of a catamaranby linearised theory. *WIT Transactions on the Built Environment*, *5.* https://doi.org/10.2495/CMO940071.

ITTC. (2011). *Procedures and guidelines: practical guidelines for ship CFD applications, 7.5.*

J.D. Power (7 Ağustos 2023). 2017 Bennington Pontoons SX Series 21 SSX(*) Price, Used Value & Specs. https://www.jdpower.com/boats/2017/bennington-pontoons/21-ssx_/32079098.

Joubert, P. (2004). *Some aspects of submarine design: part 1: Hydrodynamics*. https://apps.dtic.mil/sti/citations/ada428039.

Joung, T., Sammut, K., He, F., ve Lee, S.-K. (2009). *A study on the design optimization of an AUV by using computational fluid dynamic analysis.* The nineteenth international offshore and polar engineering conference.

Joung, T.-H., Sammut, K., He, F., ve Lee, S.-K. (2012). Shape optimization of an autonomous underwater vehicle with a ducted propeller using computational fluid dynamics analysis. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, *4*(1), 44–56. https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0077.

Karim, M., Rahman, M., ve Alim, A. (2008). Numerical computatıon of vıscous drag for axısymmetrıc underwater vehıcles. *Jurnal Mekanikal*. https://jurnalmekanikal.utm.my/index.php/jurnalmekanikal/article/view/135.

Komianos, A. (2018). The Autonomous shipping era. operational, regulatory, and quality challenges. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, *12*(2), 335–348. https://doi.org/10.12716/1001.12.02.15.

Kuday, I. (2009). *Examination of the term biomimicry as a supporting factor in design process.* [Yüksek Lisans Tezi]. Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi.

Larson, K. (21 Ocak 2016). *Market Trends: Pontoon segment stays strong*. *Boating Industry*. https://boatingindustry.com/top-stories/2016/01/21/still-the-one/.

Larson, K. (5 Ocak 2018). Outboards continue growth push in 2018. *Boating Industry*. https://boatingindustry.com/features/2018/05/01/outboards-continue-growth-push-in-2018/.

Launder, B. E., ve Spaldıng, D. B. (1983). The numerıcal computatıon of turbulent flowS. *Numerical Prediction of Flow, Heat Transfer, Turbulence and Combustion*, 96–116. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-030937-8.50016-7.

Li, Z. ve Bachmayer, R. (2013). *The development of a robust Autonomous Surface Craft for deployment in harsh ocean environment*. San Diego.

Liu, H.-L. ve Huang, T. T. (1998). *Summary of DARPA suboff experimental program data*. Defense Technical Information Center. https://doi.org/10.21236/ada359226.

Madhan, R., Desa, E., Prabhudesai, S., Sebastiano, L., Pascoal, A., Desa, E., ... Khalap, S. (2006). *Mechanical design and development aspects of a small AUV-Maya*.https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=55c5c30076373b5174b11a75a9187d2fd1792004.

Menter, F. (1993). *Zonal Two equation k-w turbulence models for aerodynamic flows*. 23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference, Reston, Virigina, American Institute of Aeronautics and Astronautics. https://doi.org/10.2514/6.1993-2906.

Menter, F. ve Rumsey, C. (1994). *Assessment of two-equation turbulence models for transonic flows*. Fluid Dynamics Conference, Reston, Virigina, American Institute of Aeronautics and Astronautics. https://doi.org/10.2514/6.1994-2343.

Molland, A. F., Wellicome, J. F. ve Couser, P. R. (1994). *Resistance experiments on a systematic series of high speed displacement catamaran forms: variation of length-displacement ratio and breadth-draught ratio*. https://eprints.soton.ac.uk/46442/1/071.pdf.

Monk, J., Barrett, N., Bond, T., Fowler, A., McLean, D., Partridge, J., . . . Williams, J. (2020). *10. field manual for ımagery based surveys using remotely operated vehicles (ROVs)*. https://rov-field-

manual.github.io/files/chapter%2010_remotely%20operated%20vehicles%20field%20manual%20v2.pdf.

Myring, D. F. (1976). A theoretical study of body drag in subcritical axisymmetric flow. *Aeronautical Quarterly*, *27*(3), 186–194. https://doi.org/10.1017/s000192590000768x.

Naughton, D. (2012). *The natural history of Canadian mammals*. University of Toronto Press, Co-published by Canadian Museum of Nature.

Ødegaard, E. (2017). *Prototype of HIL test platform for autonomous USV - simulation of vessel dynamics.* https://www.semanticscholar.org/paper/Prototype-of-HIL-Test-Platform-for-Autonomous-USV-%C3%98degaard/5dd2f2cec53e83de349dcd81cf91b4e16ebee3ba.

Othman, E. H. (2015). *A review on current design of unmanned surface vehicles (USVs)*. https://www.akademiabaru.com/doc/arsrv16_n1_p12_17.pdf

Poehls, H. (1990). *Entwerfen schneller und unkonventioneller Wasserfahrzeuge.*

Primrose, S. B. (2020). *Biomimetics: Nature-inspired design and innovation*. Wiley-Blackwell.

Schlichting, H. ve Gersten, K. (1961). *Boundary layer theory*. https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-662-52919-5.pdf.

Shome, S. N., Nandy, S., Das, S. K., Biswas, D. K., ve Pal, D. (2008). *AUV for shallow water applications - some design aspects.* The Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference.

Song, F. X., Zhang, L. H., Wu, Z. L., ve Le Wang, P. (2011). On resistance calculation for autonomous underwater vehicles. *Advanced Materials Research*,

189-193, 1745–1748. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.189-193.1745.

Strong, J. (2015). *Habitat area as an indicator of Good Environmental Status under the Marine Strategy Framework Directive: theidentification of suitable habitat mapping methods with recommendations on best-practice for the reduction of uncertainty*. https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/521598.

Takahashi, K. ve Sahoo, P. K. (2019). *Fundamental CFD study on the hydrodynamic performance of the DARPA SUBOFF Submarine*. [Advance online publication]. ASME 2019 38th International conference on ocean, offshore and arctic engineering. https://doi.org/10.1115/OMAE2019-96190.

Taner, M. & Gürsel, K. T. (2021). Designing unmanned underwater vehicles through biomimicry. *Scientific Bulletin of Naval Academy,24*(1), 61-73.

Tu, J., Yeoh, G. H., Liu, C., ve Tao, Y. (2023). *Computational fluid dynamics: A practical approach* (4. Baskı). Butterworth-Heinemann.

Ünsalan, İ. D., Gürsel, K. T., Taner, M. & Neşer, G., (2018). Design of a marine autonomous surface vehicle forgeological and geophysical surveys. *Scientific Bulletin of Naval Academy, 21*(1), 20-36.

Van Rein, H. B., Brown, C. J., Quinn, R., ve Breen, J. (2009). A review of sublittoral monitoring methods in temperate waters: A focus on scale. *Underwater Technology*, *28*(3), 99–113. https://doi.org/10.3723/ut.28.099.

Vogel, S. ve Davis, K. K. (2000). *Cats' paws and catapults*. W. W. Norton ve Company.

Volker, B. (2000). *Practical ship hydrodynamics.*

Wang, W., Shan, T., Leoni, P., Fernandez-Gutierrez, D., Meyers, D., Ratti, C., ve Rus, D. (2020). *Roboat ıı: A novel autonomous surface vessel for urban environments*. 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE. https://doi.org/10.1109/iros45743.2020.9340712.

Wilcox, D. C. (2008). Formulation of the k-w turbulence model revisited. *AIAA Journal*, *46*(11), 2823–2838. https://doi.org/10.2514/1.36541.

Won, D.-J., Kim, J. ve Kim, J. (2015). Design optimization of duct-type AUVs using CFD analysis. *Intelligent Service Robotics*, *8*(4), 233–245. https://doi.org/10.1007/s11370-015-0179-9.

Wynn, R. B. (2013). *Investigating the feasibility of utilizing AUV and Glider technology for mapping and monitoring of the UK MPA network. Final report for Defra project MB0118*. https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/500733/1/defra_mb0118(wynn)_final.pdf.

Wynn, R. B., Huvenne, V. A., Le Bas, T. P., Murton, B. J., Connelly, D. P., Bett, B. J., Hunt, J. E. (2014). Autonomous underwater vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience. *Marine Geology*, *352*, 451–468. https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.03.012.