T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AUTOSUB SUALTI ARACININ FARKLI BOY GENİŞLİK ORANLARI VE DERİNLİK GENİŞLİK ORANLARI İÇİN YANAL HIZDA MANEVRA TÜREVLERİNİN ELDE EDİLMESİ

Yunus ŞAHİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı

Danışman

Dr. Öğr.Üyesi Yasemin ARIKAN ÖZDEN

Temmuz, 2024

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AUTOSUB SUALTI ARACININ FARKLI BOY GENİŞLİK ORANLARI VE DERİNLİK GENİŞLİK ORANLARI İÇİN YANAL HIZDA MANEVRA TÜREVLERİNİN ELDE EDİLMESİ

Yunus ŞAHİN tarafından hazırlanan tez çalışması 08.11.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Yasemin Arıkan Özden
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Yasemin ARIKAN ÖZDEN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Emre KAHRAMANOĞLU, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Fahri Çelik, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Dr. Yasemin ARIKAN ÖZDEN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Autosub Sualtı Aracının Farklı Boy Genişlik Oranları (L/B) ve Derinlik Genişlik Oranları (H/B) için Yanal Hızda Manevra Türevlerinin Elde Edilmesi" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Yunus ŞAHİN

İmza



Aileme

TEŞEKKÜR

Autosub Sualtı Aracının Farklı Boy Genişlik Oranları (L/B) ve Derinlik Genişlik Oranları (H/B) için Yanal Hızda Manevra Türevlerinin Elde Edilmesi adlı tez çalışmamda bana yol gösteren ve yardımlarını eksik etmeyen Dr. Öğr. Üyesi Yasemin ARIKAN ÖZDEN hocama teşekkürlerimi borç bilirim. Ayrıca bu çalışma sürecinde bana yardımcı olan aileme ve okul arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Yunus ŞAHİN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ **vii**
KISALTMA LİSTESİ **x**
ŞEKİL LİSTESİ **xi**
TABLO LİSTESİ **xii**
ÖZET **xiii**
ABSTRACT **xv**
1 GİRİŞ **1**
1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 10
2 HİDRODİNAMİK DENKLEMLER VE TEORİLER **11**
2.1 Altı Serbestlik Derecesinde Hareketler……11
2.1.1 Doğrusal Öteleme ……...12
2.1.2 Yanal Öteleme ……...13
2.1.3 Dalıp Çıkma ……... 14
2.1.4 Yalpalama ……..…….14
2.1.5 Baş-Kıç Vurma ……...……15
2.1.6 Savrulma ……..……..15
2.2 Altı Serbestlik Derecesi Denklem Takımı……...16
2.2.1 Su Altı Aracı Üzerindeki Hidrostatik Bileşenler…….21
2.2.2 Su Altı Aracı Üzerindeki Hidrodinamik Bileşenler…….….....…21
3 YÖNTEMLER **27**
3.1 Ana Denklemler.....27
3.2 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) Denklemleri.....28
3.3 Türbülans Modelleri 28
3.4 Duvar Fonksiyonu 29
3.5 Sonlu Hacimler Yöntemi 29

4 SAYISAL HESAPLAMALAR **30**
4.1 Autosub Modeli ve Özellikleri 30
4.2 Analiz Koşullarının Oluşturulması 31
4.3 Akış Fizik Modeli 31
4.4 Mesh Modeli ve Belirsizlik Analizi 33
4.5 Autosub Su Altı Aracı Direnç Analizleri 38
4.6 Statik Sürüklenme Analizleri 40
4.7 Farklı L/B Oranları ve Statik Sürüklenme Durumları 42
4.8 Farklı H/B Oranları ve Statik Sürüklenme Durumları 45
5 SONUÇ **51**
KAYNAKÇA **53**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **55**

SİMGE LİSTESİ

Ω	Açısal Hız
W	Ağırlık
CG	Ağırlık Merkezi
CG_N	Ağırlık Merkezinin Burundan Uzaklığı
xG	Ağırlık Merkezinin x Doğrultusundaki Konumu
yG	Ağırlık Merkezinin y Doğrultusundaki Konumu
zG	Ağırlık Merkezinin z Doğrultusundaki Konumu
m	Aracın Kütlesi
q	Baş-Kıç Vurma Açısal Hızı
q'	Baş-Kıç Vurma Açısal Hızının Serbest Akım Hızına Oranı
$\dot{q}$	Baş-Kıç Vurma Açısal İvmesi
M	Baş-Kıç Vurma Momenti
M'	Baş-Kıç Vurma Momenti Katsayısı
D	Çap
Ixy	Çarpım Atalet Momenti (XY Eksenlerine Göre)
Ixz	Çarpım Atalet Momenti (XZ Eksenlerine Göre)
Iyz	Çarpım Atalet Momenti (YZ Eksenlerine Göre)
p	Dönme Açısal Hızı
w	Düşey Öteleme Doğrusal Hızı
Z'	Düşey Öteleme Katsayısı
w'	Düşey Öteleme Doğrusal Hızının Serbest Akım Hızına Oranı
$\dot{\omega}$	Düşey Öteleme Doğrusal İvmesi
X'	Eksenel Kuvvet
B	Genişlik

SB	Gövde Kesit Alanı
m/s	Hız
xB	Hidrostatik Kaldırma Merkezinin X Doğrultusundaki Konumu
yB	Hidrostatik Kaldırma Merkezinin Y Doğrultusundaki Konumu
zB	Hidrostatik Kaldırma Merkezinin Z Doğrultusundaki Konumu
α	Hücum Açısı
u	İlerleme Doğrusal Hızı
u'	İlerleme Doğrusal Hızının Serbest Akım Hızına Oranı
X	İleri Öteleme Kuvveti
L_{AFT}	Kıç Gövde Uzunluğu
ν	Kinematik Viskozite
F	Kuvvet
C	Kuyruk Ucu Veter Uzunluğu
Re	Reynolds Sayısı
N	Savrulma Momenti
N'	Savrulma Momenti Katsayısı
$\dot{r}$	Savrulma Açısal İvmesi
v	Savrulma Doğrusal Hızı
r	Savrulma Açısal Hızı
β	Savrulma Açısı
N''	Savrulma Momenti Boyutsuz Oran Katsayısı
r'	Savrulma Açısal Hızının Serbest Akım Hızına Oranı
v'	Savrulma Doğrusal Hızının Serbest Akım Hızına Oranı
Z	Savrulma Kuvveti
U	Serbest Akım Hızı
Δy	Sınır Tabaka Kalınlığı
δ	Sınır Tabaka Kalınlığı
L	Su Altı Aracının Boyu
L_{OA}	Su Altı Aracının Tam Boyu

L_N	Su Altı Aracının Burun Boyu
L_B	Su Altı Aracının Gövde Uzunluğu
Ix	Su Altı Aracının X Yönüne Göre Eylemsizlik Momenti
Iy	Su Altı Aracının Y Yönüne Göre Eylemsizlik Momenti
Iz	Su Altı Aracının Z Yönüne Göre Eylemsizlik Momenti
V_{FS}	Tam Batmış Deplasman Hacmi
$\dot{u}$	X Ekseni Yönündeki İvme
$\dot{v}$	Y Ekseni Yönündeki İvme
Y'	Yanal Öteleme Kuvveti Katsayısı
Y	Yanal Öteleme Kuvveti
Y'	Yanal Öteleme Kuvveti Boyutsuz Oran Katsayısı
p'	Yalpalama Açısal Hızının Serbest Akım Hızına Oranı
$\dot{p}$	Yalpalama Açısal İvmesi
K'	Yalpalama Momenti Katsayısı
K	Yalpalama Momenti
ϕ	Yalpalama açısı
g	Yerçekimi İvmesi
ρ	Yoğunluk
t	Zaman

KISALTMA LİSTESİ

AUV	Autonomous Underwater Vehicle
CTD	Conductivity Temperature Depth
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
H/B	Derinlik Genişlik Oranı
ITTC	International Towing Tank Conference
L/B	Boy Genişlik Oranı
NOC	National Oceanography Centre
NERC	Natural Environment Research Council
PMM	Planar Motion Mechanism
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 V.F. Droblenkov'un Gövde Uzunluğu/Genişliği (L/B) ve En-Boy Oranı (H/B) Bağımlı Kılavuzlama (kF) Katsayısı Dizayn Değer Eğrileri……...**6**

Şekil 2.1 6 serbestlik derecesi gösterimi **12**

Şekil 4.1 Autosub geometrisi görünüşleri **31**

Şekil 4.2 Akış hacmi sınır koşulları **32**

Şekil 4.3 Model ağ yapıları.....**33**

Şekil 4.4 Model ağ yapıları yanal öteleme kuvveti (Y`) **34**

Şekil 4.5 Model ağ yapıları savrulma momenti (y`) **35**

Şekil 4.6 Autosub aracının deneysel ve analitik verilerinin karşılaştırılması **39**

Şekil 4.7 Ortalama Y+ dağılımı.....**40**

Şekil 4.8 2 m/s de hız dağılımı **40**

Şekil 4.9 Yanal hareket kuvveti – hız bileşeni grafiği **41**

Şekil 4.10 Savrulma momenti – hız bileşeni grafiği.....**42**

Şekil 4.11 L/B Geometrileri **43**

Şekil 4.12 Farklı L/B oranları için yanal kuvvetlerin ve sürüklenme hızlarının değişimi **43**

Şekil 4.13 Farklı L/B oranları için savrulma momenti ve sürüklenme hızlarının değişimi **44**

Şekil 4.14 Farklı L/B Oranları İçin Hız Dağılımları……..**44**

Şekil 4.15 H/B Geometrileri.....**46**

Şekil 4.16 Perspektif görünüş **47**

Şekil 4.17 Farklı H/B oranları için yanal kuvvetlerin ve sürüklenme hızları.....**47**

Şekil 4.18 Farklı H/B oranları için savrulma momenti ve sürüklenme hızları.....**48**

Şekil 4.19 Farklı H/B Oranları İçin Hız Dağılımları…….……**48**

Şekil 4.20 Farklı H/B Oranları İçin Akım Çizgileri……..**49**

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Üretilen autosub araçları **3**
Tablo 4.1 Autosub modeli geometrik özellikleri..... **30**
Tablo 4.2 Statik sürüklenme direnç ve moment sonuçları..... **34**
Tablo 4.3 Belirsizlik analizi sonuçları **37**
Tablo 4.4 Direnç verileri..... **38**
Tablo 4.5 Statik sürüklenme verileri **41**
Tablo 4.6 L/B oranları ve geometrik boyutlar..... **42**
Tablo 4.7 L/B için boyutsuz oran katsayıları **45**
Tablo 4.8 H/B oranları ve geometrik boyutlar **46**
Tablo 4.9 H/B için boyutsuz oran katsayıları **49**

ÖZET

Autosub Sualtı Aracının Farklı Boy Genişlik Oranları Ve Derinlik Genişlik Oranları İçin Yanal Hızda Manevra Türevlerinin Elde Edilmesi

Yunus ŞAHİN

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı
Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Yasemin ARIKAN ÖZDEN

Bu çalışmada, Autosub su altı aracının ölçekli modeli kullanılarak model üzerine gelen kuvvet ve moment değerlerinin hesaplamaları yapılmıştır. Çalışmaya, model üzerinde gerçekleştirilen deneysel ve sayısal çalışmalar baz alınarak başlanmıştır. Analizler, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), RANS denklemleri ve k-ω türbülans modelleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Uygun ağ yapısını belirlemek amacıyla, seçilen başlangıç modelinde yakınsama durumları gözlemlenmiş ve toplamda beş farklı ağ yapısı denenmiştir. Ağ yapılarındaki boyut faktörü, ITTC'nin (International Towing Tank Conferences) önerdiği şekilde sabit oranlarda değiştirilmiştir. Çalışmada, özellikle su altı aracının sabit deplasman değerlerinde farklı boy ve genişlik oranı (L/B) ve yükseklik ve genişlik (H/B) oranları incelenmiştir. L/B için altı, H/B için beş farklı model tasarlanmış ve her biri için 0 ile 10 derece arasında olacak şekilde altı farklı açı uygulanarak toplamda 66 analiz gerçekleştirilmiştir. Döndürme işlemi, tüm modeller için ağırlık merkezinden gerçekleştirilmiştir. Her bir farklı durum ve model için elde edilen değerlerin, uygun ve optimal bir model seçimi için gösterge ve yardımcı kaynak oluşturması amaçlanmıştır. Çalışmanın devamında, elde edilen sayısal sonuçlar

deneysel verilerle karşılaştırılarak modelin doğruluğu test edilecektir. Bu karşılaştırma, farklı parametrelerin aracın hidrodinamik performansı üzerindeki etkilerini daha iyi anlamamıza yardımcı olacaktır. Ayrıca, HAD yönteminin doğruluğu, deneysel yöntemlerle desteklenerek güçlendirilecektir. Sonuçlar, su altı araçlarının tasarımında kullanılabilecek veriler sunarak, gelecekteki model optimizasyonları için faydalı olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Autosub, Denizaltı, Su Altı Aracı, HAD, Statik Sürüklenme, Manevra.

ABSTRACT

Investigation of the Maneuvering Derivatives for Static Drift of the Autosub Underwater Vehicle for Different Length to Breath and Height to Breath Ratios

Yunus ŞAHİN

Department of Naval Architect and Marine Engineering
Master of Science Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Yasemin Arıkan Özden

In this study, the calculations of forces and moments acting on the scaled model of the Autosub underwater vehicle were performed using the geometries of the model. This study was initiated based on prior experimental and numerical studies conducted on the model. The analyses were carried out using Computational Fluid Dynamics (CFD), RANS equations, and k-ω turbulence models. To determine the appropriate mesh structure, convergence analysis were conducted in the initial selected model, and a total of five different mesh structures were tested. The size factors in the mesh structures were altered at fixed ratios according to ITTC (International Towing Tank Conferences) recommendations. Specifically, in this study, different length to breath (L/B) and height to breath (H/B) ratios at constant displacement values of the underwater vehicle were examined. Six different models were designed for L/B, and five for H/B, with six different angles applied to each model ranging from 0 to 10 degrees, resulting in 66 analyses. The rotation process was performed from the center of volume for all models. The values obtained for each different condition and model can serve as indicators and useful resources for selecting an appropriate and optimal model dimensions. In the continuation of the

study, the obtained numerical results will be compared with experimental data to test the accuracy of the model. This comparison will help us better understand the effects of different parameters on the hydrodynamic performance of the vehicle. Additionally, the accuracy of Computational Fluid Dynamics (CFD) methods will be reinforced by supporting them with experimental techniques. The results will provide valuable data for the design of underwater vehicles and will be useful for future model optimizations.

Keywords: Autosub, submarine, underwater vehicle, CFD, static drift, maneuver.

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Teknolojinin etkisiyle sürekli gelişen denizaltılar, savaş dönemine kadar nadiren kullanıldı. Ancak, savaşın sona ermesiyle birlikte denizaltıların önemi hızla arttı. Denizaltılar hem hidrodinamik özellikler açısından hem de kullanım amaçları bakımından önemli ilerlemeler kaydetti. Wormley'deki Ulusal Oşinografi Merkezi (NOC), teknolojinin ilerlemesiyle birlikte otonom sualtı araçlarının bilimsel uygulamalarını geliştirmeye yönelik bir program başlattı. Günümüzde, Southampton'daki Ulusal Oşinografi Merkezi, "Deniz Otonom ve Robotik Sistemler" adı altında otuzdan fazla araca sahip önemli bir kurumdur [1].

1983 yılında Stuart Rusby ve Nic Flemming, Avrupa Topluluğu Ortak Araştırma Merkezi'ne, 6000 metre derinliğe inebilen ve önemli bir yük kapasitesine sahip bir uzaktan kumandalı araç (ROV) geliştirilmesini önerdiler. Bu aracın akıllı kontrol sistemleri, büyük kapasiteli veri depolama ve yüksek veri toplama yeteneklerine sahip bütünleşmiş navigasyon sistemlerine sahip olması amaçlanıyordu. Ayrıca, aracın 24 saat boyunca dayanıklılığının sağlanması da hedeflenmiştir. Aynı dönemde, araştırmacı Brian McCartney, okyanus havzalarından hidrografik (CTD, iletkenlik, sıcaklık, derinlik) kesitler toplamak için otonom bir araç geliştirme fikirlerini tartışmak üzere Wormley'de bir seminer düzenledi. NERC'te Deniz Bilimleri Direktörü olmadan önce John Woods, Aralık 1985'te IOS (Institute of Oceanographic Sciences) personeli ile bir araya gelerek amiral gemisi projelere yönelik önerilerde bulundu [1]. Bu toplantı, su altı araçları konusundaki fikirlerin hayata geçirilmesinde önemli bir dönüm noktası oldu. Sonuç olarak, John Woods, NERC'i (Natural Environment Research Council) Autosub adında bir projeyi desteklemeye ikna edebildi. 1990 ve 1994 yılları arasında araştırmacılar, yeni teknolojilerden faydalanarak uzmanlıklarını artırdılar. Wormley'de endüstriler, üniversiteler ve savunma laboratuvarları ile iş birliği yaparak tasarımlar ve prototipler üzerinde çalıştılar. Ancak, Autosub programı Wormley'de son yıllarda zorluklarla karşılaştı. Planlanan takvime göre deniz denemeleri 1992 yılı için planlanmıştı. Hidrodinamik, tahrik, komuta ve kontrol, enerji depolama ve bilimsel

uygulamalar için artan destek ve teknolojideki ilerlemelere rağmen, bir araç inşa etmek için yeterli kaynak yoktu. Sonuç olarak, 1994 ve 1999 yılları arasında ekip, NERC ile yapılan bir anlaşma ile Southampton'a taşındı. NERC tarafından yapılan bir dizi incelemenin ardından, DOGGIE ve DOLPHIN adındaki sualtı araçlarının istenen spesifikasyonları karşıladığı belirlendi. Kutup bilimi araştırma ekibi, DOLPHIN aracını Antarktika buzullarının altında veri toplamak için kullanmayı amaçladı. Nick Millard ve meslektaşları tarafından yürütülen Autosub çalışmalarının ilk 18 aylık ilerlemesi hakkında bir makale "Underwater Technology" dergisinde yayınlandı [1]. Bu makalede, Autosub sualtı aracının Sicilya Boğazı'ndaki yüzey akıntılarını belirlemek, koyunun üst havzalarındaki çözünmüş ve partikül halindeki manganez içeren suları incelemek, deniz buzullarının altını araştırmak, açık deniz araştırmalarına yardımcı olmak ve üst okyanusta sonar ve türbülans çalışmalarına katkıda bulunmak amacıyla kullanıldığı belirtildi. Elde edilen sonuçların kalitesini değerlendirmek için Brian King liderliğindeki bir ekip, hidrografik veriler kullandı. Sonraki programda, 2002 ve 2006 yılları arasında, Autosub Under Ice aracı, kutup bilimi ekipleri tarafından deniz buzu ve buzulların altından veri toplamak amacıyla kullanıldı. Bu görevler için Autosub araçlarının teknik özellikleri ve yetenekleri geliştirildi ve bu, 2008 yılında DOGGIE Autosub 6000'in revizyonuna yol açtı. Basınca dayanıklı lityum polimer şarj edilebilir pillerle güçlendirilen ve yüzdürme için köpük kullanan bu versiyon, hafif basınç kasalarında karşılaşılan birçok zorluğun üstesinden geldi. Son olarak, Wormley'de belirlenen gereksinimlere göre, Autosub Long Range aracı nihai segment olarak tasarlandı. Tablo 1.1'de, 2011 yılına kadar üretilen ve geliştirilen Autosub sualtı araçlarının özelliklerini göstermektedir [1] .

Tablo 1.1 Üretilen Autosub Araçları

Model	Yapım Yılı	Özellikleri	Kullanım Durumları
Autosub 1	1995-1996	· Fiberglas basınç gövdesi, 500 metre derinliğe kadar dayanabilir. · Enerji kaynağı: kurşun-asit (70 km menzil) veya mangan alkalin (250 km menzil) · Standart ekipmanlar arasında CTD'ler, standart ve özel Doppler akım profilörleri, türbülans probları ve pH sensörleri gibi deneysel sensörler bulunmaktadır.	Çoğunlukla Autosub 2 aracına çevrilmişlerdir.
Autosub 2	2000	· Karbon fiber basınç kasaları ile 1600 metre derinliğe ulaşabilir. · Enerji kaynağı: Mangan alkalin (yaklaşık 700 km menzil, hıza/sensörlere bağlı olarak değişebilir). · Yeni özellikler arasında mangan ve metan sensörleri, kabarcık boyutu rezonatörü, yukarı bakan yan taramalı sonarlar, çok ışınlı eko sounder ve akış sitometrisi bulunmaktadır.	Şubat 2005'te Fimbul Buz Sahanlığı'nın altında kayboldu.
Autosub 3	2005	Autosub 2 ile karşılaştırıldığında, teknik özelliklere fiber optik jiroskop pusula eklenmiştir.	Kullanılmaya devam ediliyor
Autosub 6000	2006-2007	- 6000 metre derinlik kapasitesi. - Enerji kaynağı: basınç dengeli yağ dolu muhafazalarda ikincil lityum polimer hücreler. - Enstrümantasyon arasında fiber optik jiroskop pusula, CTD (İletkenlik, Sıcaklık, Derinlik), ADCP (Akustik Doppler Akım Profilörü), çok ışınlı eko sounder, optik geri saçılım ve sensörler bulunur.	Kullanılmaya devam ediliyor
Autosub Long Range	2010-2011	- Enerji kaynağı: lityum güç kaynağı için iki dövme alüminyum basınç gövdesi (hedef menzil 6000 km) ve test amaçlı ikincil nikel-metal hidrit batarya. - Enstrümanlar arasında CTD (İletkenlik, Sıcaklık, Derinlik) ve ADCP (Akustik Doppler Akım Profilörü) ile deneysel besin sensörleri bulunur.	Kullanılmaya devam ediliyor

Denizaltı araçlarının tasarımında manevra kabiliyeti hayati öneme sahiptir. Manevra performansını ölçmek için hidrodinamik etkilerden manevra katsayılarını hesaplamak gerekmektedir. Bu hesaplamalar, denizaltı araçlarının hareketinin altı serbestlik derecesine sahip olduğunu dikkate almalıdır. Kuvvetler ve momentleri içeren matematiksel bir model geliştirmek, kontrol sistemi oluşturmak için temel öneme sahiptir. Hidrodinamik katsayılar deniz araçlarının hareket kabiliyetlerini etkileyen ana unsurlardır. Hidrodinamik katsayıların doğru hesaplanması, denizaltı araçlarının hareketini doğru bir şekilde simüle etmek veya tahmin etmek için gereklidir. HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yöntemi ile, deney temelli olmayan hesaplamalarla hidrodinamik katsayılar hesaplanabilir [2]. Hidrodinamik katsayılar elde etmek için yaygın olarak kullanılan yöntemler deneysel veya sayısal simülasyonlardır. Katsayılar doğrudan deneyler aracılığıyla belirlenebilirken, deneylerle ilişkili maliyet ve zorluklar nedeniyle sayısal simülasyonlar daha popüler hale gelmiştir. Denizaltı araçlarının hidrodinamik özelliklerini incelemek için, deneysel tekniklerle birlikte deneysel ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri kullanılmaktadır. Araç hareketi üç ana durumu içerir: statik, rotatif ve ivme. Bu durumların analizi, aracın manevra kabiliyetlerini belirlemeye yardımcı olur. Planar hareket mekanizması deneyleri (PMM), hidrodinamik kuvvetleri hesaplamak için kullanılırken, çekme tankında seyir sırasında kuvvetleri ve momentleri hesaplamak için ideal bir yöntemdir. Açısal hızın etkileri, döner bir kol deney düzeneği kullanılarak incelenir. Bu test sistemleri, hidrodinamik katsayıları hesaplamak için kullanılabilir. Gerekli hidrodinamik katsayıları elde etmek için test düzeneklerinin kullanımı, denizaltı araç tasarımında gereklidir [3].

Farklı amaçlar için denizaltılar tasarlarken, askeri operasyonlar, araştırma görevleri, ekipman kurulumu ve bakım işleri gibi birçok parametre dikkate alınır. Bir geminin karşılaması gereken çok sayıda spesifikasyonun yanı sıra, manevra kabiliyetlerinin önemini belirlemek için manevra karakteristiklerinin değerlendirilmesi de çok önemlidir [4]. Yıllar boyunca, gemilerin ve denizaltıların manevra yeteneklerini doğru bir şekilde değerlendirmek için birçok çalışma yapılmıştır. Amaç, manevra performansını belirlemektir. Literatürde, genellikle gemilerin analizinde dört farklı yaklaşım kullanılır. Bu yaklaşımlar, ampirik ve yarı ampirik yöntemleri içerir. Genellikle tasarımın ilk aşamalarında kullanılan bu yöntem, aracın hidrodinamik özelliklerinin değerlendirilmesine olanak tanır. Bu

yaklaşımı kullanmanın avantajları, gerekli değişikliklerin hızlı ve ucuz bir şekilde uygulanması olarak gösterilebilir [4]. Konuya özgü olan doğrusal olmayan etkilerin dahil edilmesi, en güvenilir sonuçların elde edilmesini sağlar. Sayısal yöntemler, kuvvet, hız, basınç ve türbülans verilerini elde etmede deneysel yöntemlere göre daha hızlı ve maliyet etkin bir yol sağlar. Bu, deneysel verilerin toplanmasının zor olduğu alanlarda özellikle avantajlıdır. Son yıllarda, istatistiksel teoriye dayalı sistem teşhis yöntemleri, hızlı sonuçlar sağlama kabiliyetleriyle popülerlik kazanmıştır [4].

Denizaltının ana boyutlarının belirlenmesi, gövde tasarımı ile ekipmanların genel yerleşimlerinin belirlenmesi gibi önemli detayları içermektedir. Bu tasarım seçimleri, tahsis edilen deplasmanı aşmadan en yüksek manevra ve kullanım amacı verimliliğini elde etmek için bireysel unsurları değiştirme olanaklarını neredeyse tamamen yönetir. Mimari yapının belirlenmesinde denizaltı gereksinimleri ve bireysel hizmet koşulları önemli bir yere sahiptir [5]. Pratik sualtı araçları yapımında, "mimari" genel konfigürasyonun, gövde formunun ve yapıların, dümenin, ek parçaların, odaların, tankların, ana silahların ve ekipmanların belirli özelliklerini belirleyen genel tasarım çözümlerinin toplam kombinasyonu olarak anlaşılır [5].

Gemi tasarımı teorisinde göreceli uzunluk ℓ (denklem 1.1), su hattı boyunca uzanımı tanımlayan ilişki olarak anlaşılır. Bu uzunluk, gövde doluluğu (L/B) ve gövde inceliği (H/B) gibi özelliklerin belli bir orandaki temsili değeridir. V. L. Pozdyunin bu özelliklerden hiçbirinin tek başına gövde formunun inceliği hakkında tam bir fikir veremeyeceğini, göreceli uzunluğun ℓ bir incelik özelliği olduğunu ve bu nedenle denizaltı performansını tahmin etmek için kullanılması gerektiğini belirtmiştir [5].

Aynı zamanda, denizaltılarla ilgili birçok yayın genellikle göreceli uzunluk ℓ yerine L/B oranına atıfta bulunur ve bunu "denizaltı uzaması" olarak tarif ederler. Performans incelemeleri için göreceli uzunluğun denizaltının sualtı denizcilik yetenekleri üzerindeki etkisini araştırırken, L/B varyasyonlarının denizaltının denizcilik yetenekleri üzerindeki etkilerini analiz etmemizi sağlayan güncellenmiş formül aşağıdaki gibidir [5].

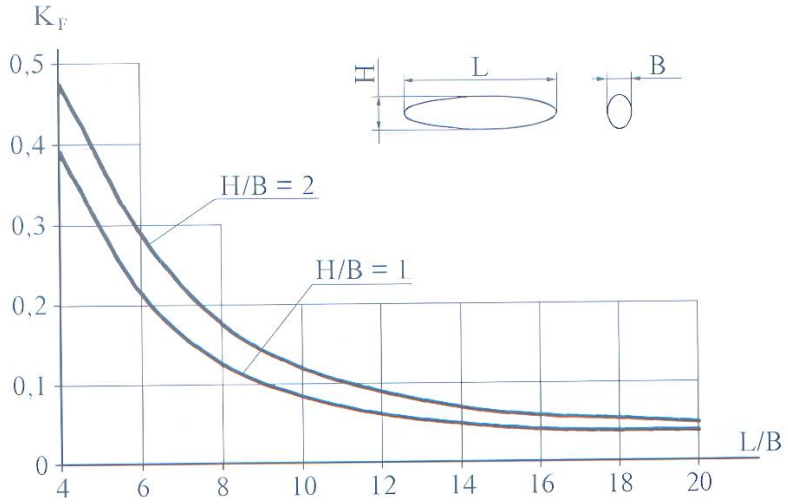
$$\ell = \frac{L}{\sqrt[3]{V_{FS}}} = \delta^{-1/3} * \left(\frac{L}{B}\right)^{2/3} \quad (1.1)$$

Bilindiği gibi, performans, denizaltının belirli bir hızda minimum gerekli güç ile seyretme yeteneği olarak anlaşılır. Dolayısıyla, denizaltının performans nitelikleri, dirence, iticinin verimliliğine ve gövde ile etkileşimine ve ıslak yüzey alanına, yani denizaltı boyutlarına bağlıdır [5]. Denizaltı "çıplak gövde" (takıntılar olmadan) için en önemli bileşenler sualtı sürtünme direnci ile form dirençlerinden ibarettir. Form hatları iyi ve düzenli şekillendirilmiş eksenel simetrik gövdeleri olan modern denizaltılar için, sürtünme direnci katsayısı toplam sürüklenmenin %50 ila %60'ını temsil eder [5].

Form direnci, suyun viskozitesinden kaynaklanır ve gövde şekli ile ana boyut oranlarının su altı aracı boyunca basınç dağılımı üzerindeki etkisini yansıtır. Sürtünme ve form dirençlerinin viskoziteyle ilgili ortak kökenlerini dikkate alarak, aerodinamik gövdeler için form direnci genellikle sürtünme direnci ile ifade edilir:

$$R_F = k_F R_{FRIC} \tag{1.2}$$

Burada k_F, form direncini sürtünme direnci ile ilişkilendiren boyutsuz katsayıdır. Bu katsayı V.F. Droblenkov'un nomogramından bulunabilir [5].



Şekil 1.1 V.F. Droblenkov'un Gövde Uzunluğu/Genişliği (L/B) ve Yükseklik-genişlik Oranı (H/B) nin (kF) Katsayısı için Dizayn Değer Eğrileri

Şekil 1.1'de boy-genişlik oranı (L/B) ve yükseklik- genişlik oranına (H/B) göre aerodinamik gövdeler için tasarım değerleri katsayılarının V.F. Droblenkov eğrilerinden görüldüğü gibi form direncinin sürtünme direncinin %10 ila %20'sini aşmadığı anlamına gelir. Ayrıca, gövde uzamasının (L/B) 10 ile 14'e kadar

artmasının form direncinde azalmaya neden olduğu açıktır [5]. Aynı zamanda, gövdedeki dikey eksen uzunluğunun artması, ıslak yüzey alanının artmasına ve dolayısıyla sürtünme direncinin artmasına neden olur. Denizaltı uzamasının artması, Reynolds sayısının artmasına ve sürtünme direncinin azalmasına neden olur, ancak bunun etkisi ıslak yüzey alanının etkisinden önemli ölçüde daha azdır [5]. Denizaltı gövdesinin uzamasının viskoz direnç bileşenleri üzerindeki bu zıt yönlü etkileri, direnç değerinin minimum olduğu bir uzama değeri olması gerektiğini göstermektedir [5].

Yukarıdaki yorumları özetlersek, performans açısından belirli bir optimum denizaltı gövdesi uzaması olduğu ve her iki yönde de herhangi bir sapmanın daha büyük dirence ve dolayısıyla daha yüksek gereken güce neden olduğu söylenebilir.

Dış gövde uzaması ayrıca denizaltının manevra kabiliyeti parametrelerini de etkiler. Böylece, (L/B) oranlarının artmasıyla, denizaltının sabit hareket sırasındaki statik ve dinamik stabilitesi de artar. Bu, uzamanın artmasıyla birlikte tüm diğer koşullar, dinamik stabilite katsayısı dahil olmak üzere değişmediği sürece, kontrol yüzeylerinin alanının azalması gerektiği anlamına gelir.

H/B oranının denizaltı manevra kabiliyeti üzerindeki etkisiyle ilgili olarak, aşağıdaki hususlara dikkat etmeliyiz. H/B=1 olan bir denizaltı gövdesi için, çıplak gövde hidrodinamik özellikleri hem dikey hem de yatay düzlemlerde aynıdır. Ancak, insanlı ve askeri projeler kapsamındaki denizaltılar için tamamen eksenel simetrik bir gövde yapmak genellikle imkansızdır. Belirli ekipmanların düzenlenmesi gerekliliği nedeniyle, özellikle bünyesinde torpido ve füze barındıran denizaltılarda, özel düzenleme gereksinimleri nedeniyle, her zaman bir tür üst yapı ortaya çıkar [5]. Doğal olarak, benzer yorumlar H/B'nin dikey kontrol yüzeylerinin alanı üzerindeki etkisi için de yapılabilir.

Ana oranların etkilerinin yanı sıra, form direnci gövde dolgunluğuna ve uç şekillerine duyarlıdır. Bu, form direncinin fiziksel doğasında basınç kuvvetlerinin gövde etrafındaki akışta dağıldığının sonucunu temsil etmesinden kaynaklanmaktadır. Basınç kuvveti profili gövde şekline bağlıdır, ancak denizaltı gövdeleri için bile, akışa bağlı şekilde , ön ve arka gövde kısımlarında önemli basınç gradyanları bulunmaktadır [5]. Burun kısmında, kesit alanında ani bir artışla karakterize edilen şekilde, giriş akış hızı önemli ölçüde artar, bu da akış basıncının

azalmasına ve sınır tabakasının türbülansına neden olur. Kıç kısmında ise bu süreç tersine döner: hız düz bir gradyanla azalır ve basınç buna bağlı olarak artar. Sınır tabakasındaki su viskozitesi ve hız kayıpları nedeniyle, kıç kısımdaki basınçlar öndeki kısımdan daha az çıkar [5]. Ayrıca, üst yapılar (direk, kıç kontrol yüzeyleri, çeşitli cihazların kubbeleri vb.) basınç gradyanları oluşturur, bu da vortexlere neden olur. Bu gövde ön ve arka ucundaki basınç farklılıkları form direncine yol açar [5].

Bu çalışmada İngiliz Ulusal Oşinografi Merkezi tarafından tasarlanan Autosub sualtı aracı (AUV) kullanılmaktadır. Bilim insanlarının bu aracı sıkça kullanma sebeplerinin başında aracın denizaltı ortamının fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini ölçmek için çeşitli sensörlerle donatılmış olmasıdır. Autosub su altı aracının kullanım alanlarından biri de deniz tabanı ve deniz biyolojik çeşitliliğini araştırmaktır. Bu araştırma alanlarından bazıları volkanlar, deniz tabanı fiziksel ve kimyasal analizleri, dağlar ve kanyonlardır. Ayrıca denizaltı biyolojik hayatı incelemek ve izlemek için de kullanılmıştır. Ayrıca, doğal afetleri ve insan kaynaklı kirliliği incelemekte önemli bir rol oynamaktadır. Su altında kalma süresi uzun sürebileceği için birçok araştırmacı ve kuruluş tarafından tercih sebeplerinden biridir [3]. Ayrıca, açık literatürde paylaşılan kapsamlı gemi model testi sonuçları sayesinde manevra çalışmaları için de kullanılabilmektedir. Kimber tarafından yapılan çalışmada, denizaltı araçlarının hidrodinamik katsayıları, Autosub aracının 3/4 ölçekli bir modeli kullanılarak hesaplanmıştır [3]. Bu deneylerde direnç testleri yapılmış ve bulgular detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Wu ve diğerleri tarafından gösterilen bir yaklaşım, denizaltı aracının toplam direncini azaltmayı amaçlamış ve mikro kabarcıkların simülasyonlarını içermiştir [6]. Bu simülasyonlar, denizaltı aracının gövdesine yakın mikro kabarcıkların toplam direnci %50'ye kadar azaltabileceğini ortaya koymuştur. Phillips ve diğerlerinde, üç farklı Autosub denizaltı aracının gövde direncini incelemiştir [6]. Bu araçların su altı görevlerinde karşılaştıkları direnç, şekil ve boyutlarına dayanarak hesaplanmıştır. Araştırmacılar, HAD yöntemini kullanarak araç gövdeleri etrafındaki akışı simüle etmiş ve direnç değerlerini doğru bir şekilde belirlemiştir. Deneylerden ve fiziksel testlerden elde edilen direnç verileri HAD yöntemi ile kıyaslanmış, çıkan sonuçlar hata oranın düşük olması nedeni ile bu yöntemin güvenilirliğini ve doğruluğunu gösterir niteliktedir. Ayrıca, Autosub denizaltı aracı için hidrodinamik türevler elde etmek için döner kol ve çekme tankı deneyleri yapılmıştır [3]. Bu deneyler,

zamandan bağımsız bir şekilde hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yan kuvvetleri tahmin etmek için yapılan tahminler tutarlı bir şekilde doğru, ancak indüklenmiş direnç ve yön momentleri için tahminlerde farklılıklar bulunduğu belirtilmektedir. Sayısal yöntemler kullanılarak denizaltı aracının dinamik stabilite sınırları doğru bir şekilde belirlenmiştir. Diğer bir çalışmada, Phillips ve diğerleri modelin direnç ve hidrodinamik katsayılarını bulmuşlardır [3].

Daha önce benzer bir çalışmada torpido tarzı bir Autosub aracı için yatay çekme tankı ve döner kol deneyleri Phillips çalışmalarında tekrarlanarak ve HAD yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Yan kuvvet tahmininde çok iyi bir uyum bulunmasına rağmen, indüklenmiş direnç ve savrulma momenti tahmininin biraz yüksek olduğu gösterilmiştir [7].

1.2 Tezin Amacı

Bu araştırmada, Autosub sualtı aracının hidrodinamik özelliklerinden boy ve genişlik oranı (L/B) ve yükseklik genişlik oranının (H/B) etkileri incelenmektedir. Bu çalışmada, yanal öteleme kuvvetleri ve savrulma momentleri ele alınmıştır. Deneyler için kullanılmış ¾ ölçekli geometriden yola çıkılarak sabit deplasman koşulunu sağlayacak şekilde türetilen farklı L/B ve H/B oranlarına sahip geometriler için statik sürüklenme koşulları ve her model için tekrarlanmış 0 ile 10 derece arasında 2 derece artacak şekilde statik sürüklenme açılarında seyir koşulları hesaplanmıştır. Bu çalışmanın ilk bölümünde, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemlerini kullanan Star CCM+ adlı ticari yazılım ile ağ bağımsızlığı ve doğrulama çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmanın amacı, uygun çözüm ağı yapısını ve yapılandırma ayarlarını belirlemektir. Hesaplarda 0 ile 2 m/s arasındaki hızlarda direnç analizleri gerçekleştirilmiş ve doğrulama çalışması yapılmıştır. İkinci bölümde, çeşitli statik sürüklenme açıları için zamandan bağımsız hidrodinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Ağ bağımsızlığı ve belirsizlik analizi, analizlerde kullanılacak ağ yapısını belirlemek için önemli bir parametredir.

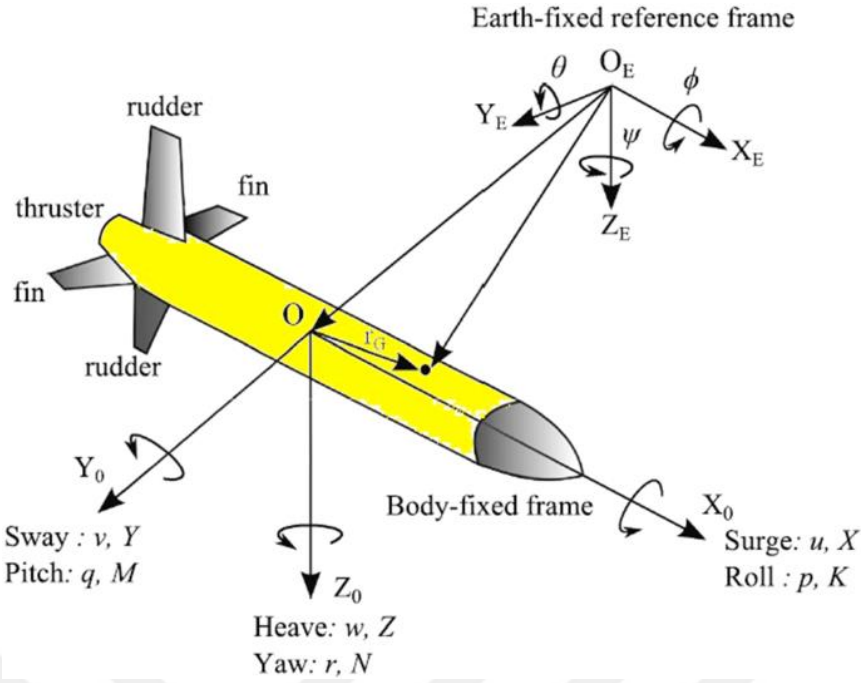
Ağ bağımsızlığı çalışması için altı derecelik bir statik sürüklenme açısı seçilmiştir. Farklı ağ elemanı boyutlarına dayalı olarak beş farklı ağ yapısı oluşturulmuştur. Bu beş analizin sonuçları, Alexander Phillips, Stephen R. Turnock ve Maaten Furlong tarafından yayınlanan deneysel bulgularla karşılaştırılmıştır [7]. Ağ bağımsızlığı çalışması ve belirsizlik analizinin ardından, ağ yapısının deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu belirlenmiştir. Diğer statik sürüklenme analizleri için seçilen ağ yapısı, hesaplamalarda kullanılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde, seçilen ağ yapısı kullanılarak direnç kuvveti değerleri belirlenmiştir.

Çalışmanın son bölümü, Autosub geometrisinin L/B ve H/B oranlarının hidrodinamik kuvvetler ve momentler üzerindeki etkilerini göstermektedir. Sonuç olarak, aynı deplasmana sahip olmalarına rağmen farklı L/B ve H/B oranlarına sahip yeni geometriler geliştirilmiştir. Bu ağ yapıları, ağ bağımsızlığı çalışması için seçilen ağ elemanı boyutları kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışma, değişen L/B oranlarına sahip dört farklı geometri ve altı farklı statik sürüklenme açısından oluşan 24 analizi kapsamaktadır. Son olarak, çalışmanın sonunda AutoSub aracının hidrodinamik kuvvetlerine L/B ve H/B oranlarının etkisinin değerlendirilmesi yapılmıştır.

2
HİDRODİNAMİK DENKLEMLER VE TEORİLER

2.1 Altı Serbestlik Derecesinde Hareketler

Hidrodinamik ve akışkanlar dinamiği alanında "altı serbestlik derecesi" kavramı, bir nesnenin veya aracın üç boyutlu uzayda eksenler boyunca bağımsız hareket edebilme yeteneğini ifade eder. Bu hareketler, üç eksen boyunca x ekseninde doğrusal, y ekseninde yanal öteleme ve z ekseninde düşey hareket etme ; üç eksen etrafında dönme x ekseni etrafında yalpalama hareketi, y ekseni etrafında baş-kıç vurma ve z ekseni etrafında savrulma şeklindedir. Bu serbestlik derecelerinin anlaşılması ve analizi, sualtı araçları, gemiler, uçaklar ve akışkan ortamlarda diğer nesnelerin manevra kabiliyeti, hareket esnasında kararlılık ve genel performansının iyileştirilmesi ve değerlendirilmesi açısından önemlidir. Bu anlayış, etkili bir şekilde manevra yapabilen, düzgün dönüşler gerçekleştirebilen ve ihtiyaç duyulduğunda derinlik veya yükseklik değiştirebilen araçların geliştirilmesi açısından önemlidir. Ayrıca, farklı işletme koşullarında kararlılığı sağlamak, salınımları en aza indirgemek ve kontrolü sürdürmek konusunda yardımcı olur. Mühendisler, altı serbestlik derecesi verilerini kontrol sistemleri tasarımı, algoritma geliştirme ve akışın nesneler etrafında davranışının tahmini gibi çeşitli uygulamalarda performansı ve güvenliği optimize etmek için kullanırlar. Hidrodinamik ve aerodinamikte altı serbestlik derecesinin etkilerini analiz etmek ve doğrulamak için kullanılan yaygın yöntemler arasında, HAD simülasyonları ve fiziksel model testleri yer alır [8].



Şekil 2.1 6 serbestlik derecesi gösterimi

2.1.1 Doğrusal Öteleme

Doğrusal öteleme (Surging), hidrodinamik ve akışkanlar dinamiği alanında, bir nesnenin veya aracın akışkan bir ortamda uzunlamasına ekseni boyunca doğrusal hareketini ifade eder. Bu hareket, nesnenin düz bir çizgide ileri geri hareket etmesini içerir. Doğrusal ötelemeyi anlamak, gemiler, denizaltılar ve su altı araçları gibi nesnelerin akışkan ortamlarda itiş gücünü, ivmelenmeyi ve genel dinamik davranışını analiz etmek için oldukça önemlidir. Doğrusal öteleme, gemi inşaatı mühendisliğinde, özellikle gemi tasarımı ve performans değerlendirmesi alanlarında temel bir parametredir. Bir geminin düzgün bir şekilde ileri geri hareket edebilme yeteneği, hızını, manevra kabiliyetini ve itiş sistemlerine tepkisini etkiler [9].

Doğrusal öteleme, denizaltılar ve su altı araçlarının itiş ve kontrolünde önemli bir rol oynar. Doğrusal ötelemenin doğru bir şekilde kontrol edilmesi, istenen hızlara ulaşma, ivmelenmeyi kontrol etme ve özellikle karmaşık manevralar sırasında etkili bir şekilde su altında hareket etmek için gereklidir. Açık deniz operasyonlarında, doğrusal öteleme hareketlerinin anlaşılması, yüzen platformların, gemilerin ve

ekipmanların dinamik davranışlarının değerlendirilmesi için kritiktir. Bu, kararlılık, yük dağılımı ve güvenlik konularında etkileri olan bir faktördür [9].

Mühendisler, çeşitli uygulamalarda doğrusal ötelemeyi analiz etmek için matematiksel modeller, simülasyonlar ve fiziksel testler kullanırlar. HAD simülasyonları, doğrusal ötelemenin itiş verimliliği, dinamik kuvvetler ve genel performans üzerindeki etkilerini tahmin etmede yardımcı olur. Gemi model deneyi laboratuvarları veya deniz denemeleri gibi fiziksel model testleri, mühendislerin simülasyonları doğrulamasına ve tasarımları optimal doğrusal öteleme kontrolü ve operasyonel verimlilik için geliştirmesine olanak tanır.

2.1.2 Yanal Öteleme

Yanal öteleme (Swaying), hidrodinamik ve akışkanlar dinamiği bağlamında, bir nesnenin veya aracın akışkan bir ortamda yan hareket etmesini ifade eder. Bu hareket, nesnenin enine eksen boyunca salınım veya sallanma hareketleri yapmasını içerir. Yanal ötelemenin anlaşılması, çeşitli nesnelerin (gemiler, açık deniz yapıları, yüzen platformlar vb.) akışkan ortamlarda kararlılığını, dinamik davranışını ve kontrolünü analiz etmek için hayati öneme sahiptir.

Offshore endüstrilerinde, yanal öteleme yüzen platformlar, açık deniz yapıları ve deniz ekipmanları için önemlidir. Dalga kuvvetleri ve dinamik deniz koşullarına karşı yük dağılımı, yapısal bütünlük ve güvenlik üzerinde etkilidir.

Yanal öteleme, petrol platformları, yüzen iskeleler ve yüzen platformlar gibi yüzen yapıların davranışı ve kararlılığı üzerinde etkilidir. Yanal öteleme kontrolü, operasyonel verimliliği ve güvenliği sağlamak için önemlidir.

Mühendisler, yanal ötelemeyi matematiksel modeller, simülasyonlar ve fiziksel testler kullanarak analiz ederler. HAD simülasyonları, doğrusal öteleme hareketinin kararlılık, dinamik tepki ve yapısal yükler üzerindeki etkilerini tahmin etmede yardımcı olur. Gemi model deneyi laboratuvarları veya deniz denemelerinde yapılan fiziksel model testleri, mühendislerin simülasyonları doğrulamasına ve en iyi yanal öteleme kontrolü ve performans için tasarımlarını geliştirmesine olanak tanır [9].

2.1.3 Dalıp Çıkma

Dalıp-çıkma hareketi (Heaving), hidrodinamik ve akışkanlar dinamiği bağlamında, bir nesnenin veya aracın akışkan bir ortamda dikey yöndeki hareketini ifade eder. Bu hareket, dikey eksende gerçekleşen hareketle tanımlanır ve çeşitli mühendislik alanlarında özellikle gemi inşaatı mühendisliği, denizaltı operasyonları ve açık deniz yapıları alanlarında büyük önem taşır. Gemi inşaatı mühendisliğinde, dalıp çıkma hareketi bir geminin dalgaları, akıntıları ve farklı yükleme koşullarını nasıl karşılayabileceğini değerlendirmek için kritik bir parametredir. Bir geminin dalıp çıkma hareketini düzgün bir şekilde gerçekleştirebilmesi ve stabilitesini koruyabilmesi, denizdeki tutunma özelliklerini doğrudan etkiler, bu da yolcular ve mürettebat için konfor ve güvenliği sağlar [9].

Benzer şekilde, denizaltılar ve su altı araçları için dalıp çıkma, dikey hareket ve kontrolde hayati bir rol oynar. Dalıp çıkma hareketinin hassas kontrolü, özellikle manevralar sırasında ve çeşitli deniz koşullarıyla karşı karşıya kalındığında, istenen derinlikleri, batma seviyelerini ve genel stabiliteyi su altında korumak için gereklidir. Ayrıca, dalıp çıkma açık deniz platformları ve yapıları tasarımı ve analizinde büyük önem taşır. Dalıp çıkma hareketlerinin anlaşılması, mühendislerin dalga kuvvetleri ve çevresel yükler karşısında yapısal bütünlük, stabilite ve genel performansı değerlendirmesine yardımcı olur. Mühendisler, dalıp çıkma hareketini kapsamlı bir şekilde analiz etmek için çeşitli metodolojiler kullanır, bunlar arasında matematiksel modelleme, simülasyonlar ve fiziksel testler bulunur. Özellikle, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) simülasyonları, dalıp çıkma hareketinin batma, stabilite ve dinamik tepki üzerindeki etkilerini tahmin etmede oldukça yararlıdır. Fiziksel model testleri, genellikle dalga tanklarında veya deniz denemeleri sırasında gerçekleştirilir ve mühendislerin simülasyonları doğrulamasına ve tasarımları optimal dalıp çıkma kontrolü ve performans iyileştirmesi için geliştirmesine olanak tanır [9].

2.1.4 Yalpalama

Yalpalama (Rolling), hidrodinamik ve akışkanlar dinamiği bağlamında bir nesnenin veya aracın uzunlamasına ekseni etrafındaki dönme hareketini ifade eder ve bu da onun bir tarafa eğilmesine yol açar. Bu fenomen, sıvı ortamlardaki araçların kararlılığını, manevra kabiliyetini ve performansını tasarlamak ve

değerlendirmek için hayati öneme sahiptir. Havacılıkta, yalpalama, yan dengeyi ve rota kontrolünü etkilerken; gemi inşaatı mühendisliğinde gemi kararlılığı ve konforu üzerinde etkili olur. Denizaltı araçları stabilite için uygun yalpa kontrolüne bağımlıdır ve otomotiv araçları, manevralar sırasında tutunma ve kararlılık için yalpa kontrol sistemleri kullanır. Mühendisler, yalpalama durumunu matematiksel modeller, simülasyonlar ve fiziksel testlerle analiz ederek, çeşitli sıvı tabanlı uygulamalarda araç performansını ve güvenliğini optimize etmeyi amaçlarlar [8] [9].

2.1.5 Baş-Kıç Vurma

Baş-kıç vurma (Pitching), hidrodinamik ve akışkanlar dinamiği bağlamında bir nesnenin veya aracın yan eksen etrafındaki dönme hareketini ifade eder, bu da nesnenin ya öne (burun aşağı) ya da arkaya (burun yukarı) doğru eğilmesine neden olur. Bu fenomen, çeşitli araçların ve nesnelerin sıvı ortamlardaki kararlılık, manevra kabiliyeti ve genel performansının tasarlanması ve değerlendirilmesi açısından önemlidir. Havacılıkta baş-kıç vurma, bir uçağın irtifasını ve saldırı açısını etkiler, bu da düz uçuşu korumak ve manevraları gerçekleştirmek için kritiktir. Gemi inşaatı mühendisliğinde ise geminin kararlılığını ve dalgalarda hareketini etkiler, yolcu konforunu da etkileyebilir. Denizaltılar dalış derinliği kontrolünde baş-kıç vurma hareketine bağlıdır, özellikle dalgalı sularda. Otomotiv mühendisliğinde ise yolcu konforu ve kararlılık için baş-kıç vurma kontrolü önemlidir. Mühendisler baş kıçvurma hareketini analiz etmek için matematiksel modeller, simülasyonlar ve fiziksel testler kullanır, bu da çeşitli uygulamalarda araç performansını ve güvenliği optimize etmeye yardımcı olur [8].

2.1.6 Savrulma

Savrulma (Yawing), hidrodinamik ve akışkanlar dinamiği bağlamında bir nesnenin veya aracın dikey ekseni etrafında dönerek yaptığı rotasyonel hareketi ifade eder. Bu hareket, nesnenin ya sol ya da sağa dönmesine sebep olur. Savrulma'nın anlaşılması, çeşitli araçların ve nesnelerin sıvı ortamlarda manevra kabiliyeti, kararlılık ve kontrolünün tasarlanması ve analiz edilmesi açısından hayati öneme sahiptir [9]. Gemi tasarımında, savrulma bir geminin kararlılığını ve rotasını koruma yeteneklerini etkileyebilir. Savrulma anları, rüzgâr, dalga ve akıntılar gibi çevresel faktörlerden, geminin tahrik sistemi ve gövde tasarımından

kaynaklanabilir. Sualtı araçlarının navigasyonu ve kararlılığı açısından kritiktir. Doğru savrulma kontrolü, özellikle karmaşık sualtı ortamlarında istenilen bir başlıkta kalmanın sağlanması için gereklidir. Savrulma, robotların ve otonom araçların manevra ve navigasyonunda rol oynar. Yön hareketlerinin kontrolünde ve hassas konumlandırmada önemli bir unsurdur [9].

Savrulma davranışını analiz etmek için mühendisler matematiksel modeller, simülasyonlar ve fiziksel testler kullanır. HAD simülasyonları, savrulmanın araç performansı üzerindeki etkilerini tahmin edebilir. Gemi model deney laboratuvarlarında veya rüzgâr tünellerinde yapılan fiziksel model testleri, mühendislerin bu simülasyonları doğrulamasına ve optimal savrulma kontrolü için tasarımlarını geliştirmesine olanak tanır [9].

2.2 Altı Serbestlik Derecesi Denklem Takımı

Günümüzde su altı araçları araştırma ve askeri amaçlar dahil olmak üzere çok sayıda önemli operasyonda kullanılmaktadır. Okyanuslarda bu önemli görevleri yerine getirmek için aracın hem yatay hem de dikey hareketi dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, su altı araçları için yatay ve dikey yönlerdeki hidrodinamik yüklerin tahmin edilmesiyle manevra performansının doğru bir şekilde değerlendirilmesi çok önemlidir. Serbest hareket testi olarak da bilinen viskoz tabanlı hesaplamalı akışkan dinamikleri (CFD) teknikleri, bu araçların bir aktüatör uygulanması altındaki hareket yolunu doğrudan hesaplamak için kullanılabilir. Bununla birlikte, çözüm süresinin artması nedeniyle bu yöntem hesaplama açısından pahalı olabilir. Simülasyon tabanlı manevra modelleri, pervane, dümen ve gövde gibi her bir katkı ayrı ayrı polinom fonksiyonları kullanılarak ele aldığından, hesaplama açısından daha ucuzdur. Hidrodinamik katsayıların hesaplanmasında sayısal veya deneysel testler kullanılabilir [10]. Taylor Serisi tabanlı yöntem, hareket denklemlerinin daha basit türetilmesini sağlar ve hesaplama maliyetini düşürür. Ek olarak, manevra hareketlerinin denklemlerindeki hidrodinamik yükler ve sonuç olarak hidrodinamik katsayıları bulmak için deneysel veya sayısal testler kullanılabilir. Bu testler için statik kayma, döner kol veya Planar Hareket Mekanizması (PMM) yöntemlerinin kullanılması mümkündür. Statik kayma ve döner kol teknikleri yalnızca hız

türevlerini hesaplarken, PMM tekniği hem hız hem de ivme türevlerini hesaplama yeteneğine sahiptir [10].

Altı serbestlik derecesinde görülen değerlerin üçü X, Y ve Z eksenleri etrafında gerçekleşen; doğrusal öteleme (surging), yanal öteleme (swaying), dalıp çıkma (heaving) isimli hidrodinamik kuvvetler olarak tanımlanır. Diğer üç değer de K, M ve N olmak üzere sırasıyla yalpalama (Rolling), baş-kıç vurma (pitching), savrulma (yawing) olan hidrodinamik momentlerdir. Bu ifadelerin hesaplanmasında ve değişiminde etkili hız ifadeleri bulunmaktadır. Hız ifadeleri doğrusal, açısal ve zamana bağlı olarak tanımlanabilir. Taylor serisi içerisinde kuvvet ve moment değerleri boyutsuz olarak kullanılmalıdır ve bu boyutsuzlaştırılmış denklemler aşağıdaki ifadelerle gösterilmektedir [11].

Boyutsuz doğrusal öteleme kuvveti:

$$X' = \frac{X}{\frac{1}{2}\rho l^2 U^2} \tag{2.1}$$

Boyutsuz yanal öteleme kuvveti:

$$Y' = \frac{Y}{\frac{1}{2}\rho l^2 U^2} \tag{2.2}$$

Boyutsuz dalıp çıkma kuvveti:

$$Z' = \frac{Z}{\frac{1}{2}\rho l^2 U^2} \tag{2.3}$$

Boyutsuz yalpalama momenti:

$$K' = \frac{K}{\frac{1}{2}\rho l^3 U^2} \tag{2.4}$$

Boyutsuz baş-kıç vurma momenti:

$$M' = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho l^3 U^2} \tag{2.5}$$

Boyutsuz savrulma momenti:

$$N' = \frac{N}{\frac{1}{2}\rho l^3 U^2} \tag{2.6}$$

Boyutsuz hız bileşenleri:

$$u' = \frac{u}{U} \quad v' = \frac{v}{U} \qquad w' = \frac{w}{U} \tag{2.7}$$

$$p' = \frac{pl}{U} \qquad q' = \frac{ql}{U} \qquad r' = \frac{rl}{U} \tag{2.8}$$

Denklemdeki ρ, su yoğunluğunu; l, araç boyunu; U, serbest akım hızını temsil etmektedir. Bu boyutsuzlaştırma işleminden sonra oluşacak kuvvet ve moment denklemleri aşağıdaki gibidir. Denklemler Taylor seri açılımları ile oluşturulmuş ve altı serbestlik derecesi problemleri için kabul görmüş denklemlerdir.

Doğrusal öteleme kuvvet denklemi Taylor serisi:

$$m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] = \tag{2.9}$$

$$+\rho/2 * l^4[X_{qq}'q^2 + X_{rr}'r^2 + X_{rp}'rp]$$

$$+\rho/2 * l^3[X_{\dot{u}}'\dot{u} + X_{vr}'vr + X_{wq}'wq]$$

$$+\rho/2 * l^2[X_{\mathrm{uu}}'\mathrm{u}^2 + X_{vv}'v^2 + X_{ww}'w^2]$$

$$+\rho/2 * l^2u^2[X_{\delta\mathrm{r}\delta\mathrm{r}}'\delta_{\mathrm{r}}^2 + X_{\delta\mathrm{s}\delta\mathrm{s}}'\delta_{\mathrm{s}}^2 + X_{\delta\mathrm{b}\delta\mathrm{b}}'\delta\mathrm{b}^2]$$

$$+ \rho/2 * l^2[\mathrm{a_i u^a + b_i u u_c + c_i u_c^2}]$$

$$-(W - B)\sin\theta + \rho/2 * l^2[X_{v v\eta}'v^2 + X_{ww\eta}'w^2 + X_{\delta\mathrm{R}\delta\mathrm{R}\eta}'\delta_{\mathrm{R}}^2 u^2 + X_{\delta\mathrm{s}\delta\mathrm{s}\eta}'\delta_{\mathrm{s}}^2 u^2](\eta\text{-}1)$$

Yanal öteleme kuvvet denklemi Taylor serisi:

$$m[\dot{v} - wp + ur - \mathrm{y}_G(r^2 + p^2) + \mathrm{z}_G(qr - \dot{p}) + \mathrm{x}_G(qp + \dot{r})] = \tag{2.10}$$

$$+\rho/2 * l^4[Y_{\dot{r}}'\dot{r} + Y_{\dot{p}}'p + Y_{p|p|}'p|p| + Y_{pq}'pq + Y_{q\mathrm{r}}'q\mathrm{r}]$$

$$+\rho/2 * l^3[Y_{\dot{v}}'\dot{v} + Y_{vq}'vq + Y_{wp}'wp + Y_{w\mathrm{r}}'w\mathrm{r}]$$

$$+\rho/2^{*}\, l^{3}[Y_{\mathrm{r}}'\,\mathrm{ur}+ Y_{\mathrm{p}}'\mathrm{up}+ Y_{|r|\delta r}'u|r|\delta r + Y_{v|r|}\grave{}v/|v|^{*}(v^{2}+w^{2})^{0.5}|r|\,]$$

$$+\rho/2^{*}l^{2}[Y_{v}'u^{2}+Y_{v}'uv + Y_{v|v|}\grave{}v\,|(v2+w2)^{0.5}|]$$

$$+\rho/2^{*}l^{2}[Y_{vw}'\,vw + Y_{\delta r}'u^{2}\delta r]$$

$$+(W - B)\cos\theta sin\phi\; + \rho/2^{*}\, l^{3}\,Y_{r\eta}'ur(\eta\text{-}1)$$

$$+\rho/2^{*}l^{2}[Y_{v\eta}'uv+Y_{v|v|\eta}'v\,|(v^{2}+w^{2})^{0.5}|+ Y_{\delta r\eta}\grave{}\delta_{r}u^{2}](\eta\text{-}1)$$

Dalıp-Çıkma kuvvet denklemi Taylor serisi:

$$m[\dot{w} - uq + vp - Z_{G}(q^{2} + p^{2}) + X_{G}(rp - \dot{q}\,) + Y_{G}(rq + \dot{p})] = \qquad (2.11)$$

$$+\rho/2^{*}\, l^{4}[Z_{\dot{q}}'\,\dot{q} + Z_{pp}'p^{3} + Z_{rr}'r^{2} + Z_{rp}'rp]$$

$$+\rho/2^{*}\, l^{3}[Z_{\dot{w}}'\,\dot{w} + Z_{vr}'vr + Z_{vp}'vp]$$

$$+\rho/2^{*}\, l^{3}[Z_{q}'\,uq + Z_{|q|\delta e}\grave{}u|q|\delta e + Z_{w|q|'}\,(w/|w|)^{*}|(v^{2} + w^{2})^{0.5}\,||q|]$$

$$+\rho/2^{*}\, l^{2}[Z_{w}'u^{2} + Z_{w}'uw + Z_{w|w|}'w|(v^{2} + w^{2})^{0.5}|]$$

$$+\rho/2^{*}\, l^{2}[Z_{|w|}'u|w| + Z_{ww}'|w(v^{2} + w^{2})^{0.5}|]$$

$$+\rho/2^{*}\, l^{2}[Z_{vv}'v^{2} + Z_{\delta e}'u^{2}\delta e + Z_{\delta \mathrm{b}}'u^{2}\delta \mathrm{b}]$$

$$+(W - B)\cos\theta\, cos\emptyset + \rho/2^{*}\, l^{3}[Z_{q\eta}'uq(\eta\text{-}1)$$

$$+\rho/2^{*}\, l^{2}[Z_{w\eta}'uw + Z_{w|w|\eta}'w|(v^{2} + w^{2})^{0.5}| + Z_{\delta e\eta}'\,\delta_{e}\mathrm{u}^{2}](\eta\text{-}1)$$

Yalpalama moment denklemi Taylor serisi:

$$I_{x}\dot{p} + (I_{z} - I_{y})qr - (\dot{r} + pq)Ixz + (r^{2} - q^{2})Iyz + (pr - \dot{q}\,)Ixy \qquad (2.12)$$

$$+m[y_{G}(\dot{w} - uq + vp) - z_{G}(\dot{v} - wp + ur)] =$$

$$+\rho/2^{*}\, l^{5}[K_{\dot{p}}'\dot{p} + K_{\dot{r}}'\dot{r} + K_{qr}'qr + K_{pq}'pq + K_{p|p|}'p|p|\,]$$

$$+\rho/2^{*}\, l^{4}[K_{p}'up + K_{r}'ur + K_{\dot{v}}'\dot{v} +]$$

$$+\rho/2^{*}\, l^{4}[K_{vq}'vq + K_{wp}'wp + K_{wr}'wr]$$

$$+\rho/2^{*}\, l^{3}\,[K_{v}'u^{2} + K_{v}'uv + K_{v|v|}'v|(v^{2} + \omega^{2})^{0.5}|]$$

$$+\rho/2^{*}\, l^{3}[K_{vw}'vw + K_{\delta r}'u^{2}\delta r]$$

$$+(y_{G}W - y_{B}B)cos\theta cos\emptyset - (z_{G}W - z_{B}B)cos\theta sin\emptyset$$

$$+\rho/2^{*}\, l^{3}[K_{u\eta}'u^{2}\,(\eta\text{-}1)]$$

Baş-Kıç Vurma moment denklemi Taylor serisi:

$$I_y\dot{q} + (I_x - I_z)rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (qp - \dot{r})I_{yz} \quad (2.13)$$

$$+m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp) =$$

$$+\rho/2 * l^5 [M_{\dot{q}}'\dot{q} + M_{pp}'pp^2 + M_{rr}'r^3 + M_{rp}'rp + M_{q|q|}'q|q|]$$

$$+\rho/2 * l^4 [M_{\dot{w}}'\dot{w} + M_{vr}'vr + M_{vp}'vp]$$

$$+\rho/2 * l^4 [M_q'uq + M_{|q|\delta e}'u|q|\delta e + M_{|w|q}'|(v^2 + w^2)^{0.5}|q]$$

$$+\rho/2 * l^3 [Mw'u^2 + M_w'uw + M_{w|w|}'|(v^2 + w^2)^{0.5}|]$$

$$+\rho/2 * l^3 [M_{|w|}'u|w| + M_{ww}'|w(v^2 + w^2)^{0.5}|]$$

$$+\rho/2 * l^3 [M_{vv}'v^2 + M_{\delta e}'u^2\delta e + M_{\delta a}'u^2\delta a]$$

$$-(x_GW - x_BB)cos\theta cos\emptyset - (z_GW - z_BB)sin\theta$$

$$+\rho/2 * l^4 [M_{q\eta}'uq(\eta\text{-}1)]$$

$$+\rho/2 * l^3 [M_{w\eta}'uw + M_{w|w|\eta}'w|(v^2 + w^2)^{0.5}| + M_{\delta e\eta}'\delta_e u^2] \ (\eta\text{-}1)$$

Savrulma momenti denklemi Taylor serisi:

$$I_x\dot{r} + (I_y - I_x)pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{zx} \quad (2.14)$$

$$+m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] =$$

$$+\rho/2 * l^5 [N_{\dot{r}}'\dot{r} + N_{\dot{p}}'\dot{p} + N_{pq}'pq + N_{qr}'qr + N_{r|r|}'r|r|\ ]$$

$$+\rho/2 * l^4 [N_{\dot{v}}'\dot{v} + N_{wr}'wr + N_{wp}'wp + N_{vq}'vq]$$

$$+\rho/2 * l^4 [N_p'up + N_{r'}ur + N_{|r|\delta r}'u|r|\delta r + N_{|v|r}'|(v^2 + w^2)^{0.5}|r]$$

$$+\rho/2 * l^3 [N_v'u^2 + N_v'uv + N_{v|v|}'v\ |(v^2 + w^2)^{0.5}|]$$

$$+\rho/2 * l^3 [N_{vw}'vw + N_{\delta r}'u^2\delta r]$$

$$+(x_GW - x_BB)cos\theta sin\emptyset - (y_GW - y_BB)sin\theta$$

$$+\rho/2 * l^4 [N_{r\eta}'ur\ (\eta\text{-}1)]$$

$$+\rho/2 * l^3 [N_{v\eta}'uv + N_{v|v|\eta}'v|(v^2 + w^2)^{0.5}| + N_{\delta r\eta}'\delta_r u^2] \ (\eta\text{-}1)$$

2.2.1 Su Altı Aracı Üzerindeki Hidrostatik Bileşenler

Sualtı veya su üstü bir araca etki eden en bilindik ve temel kuvvet kaldırma kuvvetidir. Kaldırma kuvveti yer çekiminin tersi yönünde olup sualtı batan hacim ve suyun yoğunluğu ile doğru orantılıdır. Bu kuvvete hidrostatik kaldırma kuvveti denir.

$$\text{Kaldırma kuvveti (B)} = \Delta v * g * \rho \tag{2.15}$$

$$\text{Ağırlık kuvveti (W)} = \text{m} * g \tag{2.16}$$

Burada g, yer çekimi ivmesini; Δv, sualtı batan hacim; ρ, suyun yoğunluğunu; m, su altı aracının kütlesini temsil etmektedir. Kaldırma kuvveti ve ağırlık kuvveti birbirine ters yöndedir ve kaldırma kuvveti hacim merkezinden, ağırlık kuvveti aracın üzerindeki yüklerin bileşkesi olan ağırlık merkezinden etki eder. Bu iki kuvvetin etki ettiği noktaların hidrodinamik merkeze göre durumları araç üzerinde hidrodinamik moment oluşumuna neden olur [11].

2.2.2 Su Altı Aracı Üzerindeki Hidrodinamik Bileşenler

Hidrodinamik katsayılar, denizaltıların rijit gövde hareketlerinin simülasyon çalışmalarında kullanılan birincil matematiksel modelin kalbini oluşturur. Aslında, hareket denklemleri için seçilen form büyük ölçüde kullanılan hidrodinamik katsayıların türlerinden etkilenir. Sualtı araçları için aksi belirtilmedikçe, hidrodinamik katsayılar serbest yüzey, dip veya duvar etkilerinden uzak, derin daldırılmış durumu ifade eder [12].

Hidrodinamik kuvvetler ve Standart Denklemlere katsayı olarak giren momentler genellikle üç genel kategoriye ayrılır: statik, rotatif hareket ve ivme. Statik katsayılar, cismin sıvıya göre doğrusal hız bileşenlerinden kaynaklanır; rotatif katsayıları açısal hız bileşenlerinden, ivme katsayıları ise doğrusal veya açısal ivme bileşenlerinden kaynaklanır. Sınırlı aralıklarda, katsayılar ilgili değişkenlere göre doğrusaldır ve bu nedenle doğrusal denklemlerde statik, dönme ve ivme türevleri olarak kullanılabilir. Altı serbestlik derecesi için, Standart Denklemlerde her üç kategorideki katsayılar oldukça fazladır. Bu nedenle, belirli bir simülasyon çalışması için bireysel katsayıların sayısal değerlerini yeterli doğrulukla belirlemek sorunu ortaya çıkar. İdeal olarak, belirli bir denizaltı konfigürasyonu için gerekli sayısal değerleri hidrodinamik teori ile elde etmek istenebilir. Ne yazık ki, statik ve rotatif katsayılar gibi büyük ölçüde viskoz akıştan kaynaklanan katsayılar, mevcut

teori kullanılarak güvenilir bir şekilde elde edilememektedir. Teori, eklentisiz basit formlar için ivme katsayılarını hesaplamada makul bir başarıyla kullanılmıştır, ancak gerçek denizaltı konfigürasyonları için bu katsayıları belirlemek mevcut yöntemlerle daha zor olmaktadır. Kontrol yüzeyleri, güverteler, köprü fairwater'ları ve pervaneler gibi ek parçalar içeren gerçek denizaltı konfigürasyonları için bu tür katsayıların değerlerini belirlemek için teorinin kullanımı, belirli simülasyon çalışmaları için gerekli olan doğrulukla elde edilebilir. Bu nedenle, mevcut teknoloji durumu, belirli tasarım problemleri için hidrodinamik katsayıların sayısal değerlerini belirlemek için neredeyse tamamen deneysel yöntemlere güvenmektir [12].

Deneysel yöntemler ile hidrodinamik katsayıları elde etmek için kullanılan ana metodoloji, Planar-Hareket- Mekanizması Sistemi'dir. Bu tür değerlerin gerekli olduğu durumlarda, Planar-Hareket Mekanizması testlerinden elde edilen veriler, Döner-Kol testleri sonuçları ve/veya teoriye dayalı tahminlerle desteklenir. Standart Denklemler, denizaltıların tam konfigürasyonu üzerinden yazılmıştır ve bu denklemlerde köprü, pervane, dümen gibi tüm önemli ek parçalar dikkate alınır.

Su altı araçlarının altı serbestlik derecesinde gerçekleştirdiği manevralar sırasında oluşan kuvvet ve momentler, aracın doğrusal ve açısal hızlarının türevleri ile ilişkilendirilerek lineer manevra katsayıları adı verilen katsayılarla ifade edilir. Bu katsayılar, su altı aracının manevra yaparken karşılaştığı dinamik etkileri ve bu etkilerin aracın hareketine nasıl katkıda bulunduğunu anlamak için kullanılır.

Denizaltı simülasyonlarında doğrusal katsayılar, cismin hız ve açısal hız bileşenleriyle orantılı olarak değişen hidrodinamik kuvvetleri ve momentleri temsil eder. Bu katsayılar, statik, dönme ve ivmelenme türevleri olarak sınıflandırılır ve küçükten orta ölçekli manevralarda denizaltının davranışını tahmin etmek için doğrusal hareket denklemlerinde kullanılır. Örneğin, doğrusal katsayılar, denizaltının su içinde hareket ederken kaldırma ve sürtünme gibi kuvvetler nedeniyle hareketinin nasıl değiştiğini açıklayabilir. Bu katsayılar genellikle deneysel verilerden türetilir ve standart, öngörülebilir hareketleri içeren simülasyonlar için çok önemlidir, böylece denizaltının çevresine nasıl tepki verdiğini doğru ve basit bir şekilde modellemeye olanak tanır [12][13].

Lineer ve lineer olmayan hidrodinamik katsayılar, bir geminin veya su altı aracının manevra performansını anlamak ve tahmin etmek için kritik öneme sahiptir. Lineer hidrodinamik katsayılar, kuvvetler ile aracın hız veya açısal hız gibi hareket parametreleri arasındaki orantılı ilişkiyi temsil eder. Genellikle düşük hızlar veya küçük açılarla yapılan manevralarda geçerli olan bu katsayılar, küçük hareketler sırasında oluşan hidrodinamik kuvvetlerin ve momentlerin basit bir şekilde modellenmesini sağlar. Bu katsayılar, özellikle araç düşük hızda seyrederken ya da hafif dümen hareketleriyle rotasını korurken kullanılır. Lineer hidrodinamik katsayılar, hesaplanması görece daha kolay olan ve aracın stabilite analizlerinde sıkça başvurulan parametrelerdir. Buna karşın, lineer olmayan hidrodinamik katsayılar daha karmaşık akış ve hareket etkileşimlerini temsil eder. Bu katsayılar, büyük manevralar, yüksek hızlar veya türbülanslı akış koşullarında ortaya çıkan kuvvetleri ve momentleri modellemek için kullanılır. Yüksek hızlarda veya geniş açıdaki hareketlerde, hidrodinamik kuvvetler hızın veya açısal hızın karesi ya da küpü gibi daha karmaşık fonksiyonlarla ifade edilir. Bu nedenle, lineer olmayan katsayılar, büyük açılarda yapılan ani manevralar ya da yüksek hızda meydana gelen türbülanslı akış etkilerini hesaplamak için gereklidir. Hem lineer hem de lineer olmayan hidrodinamik katsayılar, bir geminin veya su altı aracının dinamik davranışını doğru bir şekilde modellemek ve tahmin etmek için birlikte ele alınmalıdır. Bu katsayılar, aracın hidrodinamik davranışlarını anlamak ve performansını optimize etmek açısından hayati rol oynar.

Su altı araçları doğrusal bir hızla ilerlerken, karşılaştıkları kuvvet ve momentlerin analizinde statik hidrodinamik katsayılar önemli bir rol oynar. Bu katsayılar, aracın manevra yapmadığı durumda, hücum açısı (angle of attack) ve kontrol yüzeylerinin sapma açılarının (deflection angles) etkisiyle oluşan kuvvet ve momentlerden elde edilir. Statik hidrodinamik katsayılar, su altı aracının doğrusal hareketi sırasında üç eksen boyunca oluşan kuvvet ve momentlerin boyutsuzlaştırılmasıyla hesaplanır. Bu boyutsuzlaştırma, hücum açısı ve kontrol yüzeyi sapma açısına bağlı olarak oluşan kuvvet ve momentlerin analizini kolaylaştırır. Örneğin, bir su altı aracı belirli bir hücum açısına sahip olduğunda, aracın üzerinde yatay ve dikey (u ve w) doğrusal hız bileşenleri meydana gelir ve bu hız bileşenlerine bağlı olarak oluşan momentler hesaplanır. Ayrıca, kontrol yüzeylerinin sapma açıları, ek katsayıların oluşmasına neden olur. Hücum açısı ve kontrol yüzeyi sapma açısının var olduğu

durumlarda, baş-kıç vurma momenti (pitching moment) gibi momentlerin hesaplanmasında kullanılan katsayılar belirlenir. Bu katsayılar, su altı aracının stabilitesi ve manevra kabiliyetinin değerlendirilmesinde kritik bir öneme sahiptir. Sonuç olarak, statik hidrodinamik katsayılar, su altı araçlarının performansını optimize etmek ve güvenli bir operasyon sağlamak için temel parametrelerdir.

Su altı aracı üzerinde manevra sırasında en bilinen kuvvetler dalıp çıkma kuvveti ve Baş-Kıç Vurma davranışından oluşan momenttir. Baş-Kıç Vurma hareketi yapan bir su altı aracı için bu katsayılar, aracın q açısal hızı ile ilişkili olarak bulunur. Su altı araçlarının manevra kabiliyetini ve performansını optimize etmek için bu katsayılar çok önemlidir. q açısal hızı ile dalıp çıkma ve baş-kıç vurma davranışında oluşan lineer manevra katsayıları aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$\mathrm{Z_q} = [(\mathrm{Z_q}' q \rho l^3)\, u]/2 \tag{2.17}$$

$$M_\mathrm{q} = [(M_q' q \rho l^4)\, u]/2 \tag{2.18}$$

Doğrusal olmayan katsayılar ise hidrodinamik kuvvetler ve momentlerin hız veya açısal hızla doğrusal olmayan ilişkilerini kapsar. Bu katsayılar, keskin dönüşler veya acil durum kurtarma gibi aşırı ya da dinamik manevralar sırasında kritik hale gelir, çünkü bu tür durumlarda kuvvetler akış ayrılması veya kontrol yüzeyi tutunmasının kaybı gibi nedenlerle öngörülemeyen bir şekilde değişebilir. Doğrusal olmayan katsayılar, genellikle polinom denklemlerinde ikinci dereceden terimlerle temsil edilir ve deneyler ile teorik tahminlerin bir kombinasyonu ile elde edilir. Bu katsayıların simülasyon modellerine dahil edilmesi, doğrusal varsayımların yetersiz kaldığı senaryolarda denizaltının davranışını doğru bir şekilde yakalamak ve aşırı koşullarda daha gerçekçi tahminler sağlamak için gereklidir[12][13].

Lineer manevra katsayılarının ikinci dereceden türevlerinden oluşan lineer olmayan manevra katsayıları vardır. Bununla birlikte, su altı araçları için durum böyle değildir. Örnek olarak, aşağıdaki lineer olmayan manevra denklemleri, Baş-Kıç vurma hareketi için kullanılabilir. Bu denklemler, hareket sırasında meydana gelen kuvvet ve momentlerin 2. dereceden türevleridir.

$$M_\mathrm{qq} = (M_{qq}'\, qq\rho l^5)/2 \quad \rightarrow \quad M_{qq}' = 2M_\mathrm{qq}/(\rho qq l^5) \tag{2.19}$$

$$M_\mathrm{rr} = (M_{rr}'\, rr\rho l^5)/2 \quad \rightarrow \quad M_{rr}' = 2M_\mathrm{rr}/(\rho rr l^5) \tag{2.20}$$

$$M_\mathrm{pp} = (M_{pp}'\, pp\rho l^5)/2 \quad \rightarrow \quad M_{pp}' = 2M_\mathrm{pp}/(\rho pp l^5) \tag{2.21}$$

$$M_{ww} = (M_{ww}{}' ww\rho l^4)/2 \;\rightarrow\; M_{ww}{}' = 2M_{ww}/(\rho wwl^4) \qquad (2.22)$$

Gerçek durumlarda su altı araçları genellikle tekil manevra durumlarında bulunmazlar. Örneğin bir sualtı aracı aynı anda doğrusal veya belli bir hücum açısı ile ilerlerken belli bir q açısı ile de dalış gerçekleştirebilirler. Bu durumlarda manevraların birlikte sergilendiğinde birleşik manevra durumları (katsayıları) oluşmaktadır. Aynı anda doğrusal veya açısal hızlar sistemde bulunabilir. Genellikle su altı araçları dönmek için yalpalama (Rolling) hareketi ile manevra yaparlar. Yalpalama açısal hızı yani p ile savrulma açısal hızı r veya Baş-Kıç Vurma açısal hızı q birlikte sistemde bulunurlar. Örnek olarak yalpalama ve savrulma durumları aynı anda gözlemlendiğinde aşağıdaki gibi hesaplanabilir[11].

$$M_{\mathrm{rp}} = (M_{rp}{}' rp\rho l^5)/2 \;\rightarrow\; M_{rp}{}' = 2M_{\mathrm{rp}}/(\rho rpl^5) \qquad (2.23)$$

Birçok hareketin bileşiminden oluşan bir durumdaki manevra katsayıları, su altı aracı ve ortamının hidrodinamik modellemesini bilgisayar ortamında ayarlanmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle su altı deney düzeneklerinin gerekliliği önemli ölçüde artmaktadır.

Ek su kütlesi, bir deniz aracının ivmelenen hareketi sırasında aracın yüzeyine yapışan ve aracın hareketine katılan akışkan kütlesini ifade eder. Bu fenomen, deniz veya su altı araçlarının çevresindeki akışkanın viskoz özelliklerinden dolayı oluşur. Ek su kütlesi, aracın ivmesiyle doğrudan ilişkili olup, hareketli bir sistemde kütle ve atalet etkilerini artırarak sistem dinamiklerini önemli ölçüde etkiler. Bu olguya "ek su kütlesi" adı verilmesinin nedeni, çoğunlukla su ortamında meydana gelmesidir; ancak bu prensip, farklı akışkanlar için de geçerlidir.

Ek su kütlesi, bir su altı aracı hızlandığında veya yavaşladığında, aracın yüzeyine yapışan su moleküllerinin, aracın hareketine ek bir direnç ve ek bir kütle oluşturması anlamına gelir. İvmeli bir hareket sırasında, su altı aracı sadece kendi kütlesini değil, aynı zamanda bu ek kütleyi de hızlandırmak zorundadır. Bu da aracın sistem toplam kütlesini artırır ve bu nedenle sistemin ataletini değiştirir. Ek su kütlesinin büyüklüğü, aracın hızlanma oranına ve yüzey alanına bağlı olarak değişir; aracın ivmesi arttıkça, ek su kütlesi etkisi de artar. Sabit hızda ilerleyen bir su altı aracında ek su kütlesi etkisi yoktur; bu etki sadece ivmeli hareketlerde ortaya çıkar. Ek su kütlesi kavramı, özellikle su altı araçlarının manevra kabiliyeti ve performans analizlerinde kritik bir rol oynar. Su altı araçları derin sularda hareket

ediyorsa, yüzey dalgalarının etkisi olmadığı varsayılır ve ek su kütlesi katsayıları sabit kabul edilir. Bu durumda, aracın çevresindeki akışkanın davranışı daha öngörülebilir olup, ek su kütlesi ile ilgili hesaplamalar da daha stabil sonuçlar verir. Ek su kütlesinin doğru bir şekilde hesaplanması, su altı araçlarının dinamik analizlerinde, stabilite ve kontrol sistemlerinde güvenilir sonuçlar elde etmek için gereklidir. Su altı aracı yeteri kadar derinde hareket ediyorsa, dalga etkisinin olmadığı ve ek kütle katsayıları sabit kabul edilir. Buna göre ek kütle matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir[11].

$$M_A = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & X_{\dot{v}} & X_{\dot{w}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{u}} & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{w}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & Z_{\dot{v}} & Z_{\dot{w}} & Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\dot{u}} & K_{\dot{v}} & K_{\dot{w}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & M_{\dot{v}} & M_{\dot{w}} & M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{v}} & N_{\dot{w}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Matrisin diyagonal elemanları diğer elemanlardan çok daha büyük olduğu için çoğu zaman hesaplama yapılırken diyagonal harici diğer değerler sıfır kabul edilir. Bu şekilde sadeleştirme yapılırsa aşağıdaki denklem gibi hesaplanabilir.

$$MA = -diag[X\dot{u} \quad Y\dot{v} \quad Z\dot{w} \quad K\dot{p} \quad M\dot{q} \quad N\dot{r}] \quad (2.25)$$

3
YÖNTEMLER

3.1 Ana Denklemler

Bu çalışma Navier-Stokes denklemleri kullanılarak modellenmiştir. Navier-Stokes denklemleri, sıvıların ve gazların hareketini tanımlayan temel denklemler olup, akışkan dinamiğinin en önemli denklemleri arasında yer alır. Fransız matematikçi Claude-Louis Navier ve İngiliz matematikçi George Gabriel Stokes tarafından geliştirilen bu denklemler, Newton'un ikinci hareket yasasının akışkanlar için uyarlanmış halidir ve viskozite, basınç ve hız alanları gibi fiziksel parametreleri içerir. Üretilmiş bu denklemler kütle, enerji ve momentum korunumunun matematiksel ifade biçimleridir. Buna göre bir akışkan parçacığı üzerindeki momentum değişimi, aynı şekilde buna etki eden kuvvetlerin toplamına eşittir [14]. Transport denklemlerinin genel ifadesi Denklem 3.1'deki gibi ifade edilir:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla\left(\rho\phi\vec{V}\right) = \nabla(\Gamma\nabla\phi) + S_\phi \tag{3.1}$$

Burada ϕ akışkanın bir özelliği olup ρ yoğunluğu, t zamanı,$\vec{V}$ hız vektörünü temsil eder. S_ϕ terimi akışkanlar dinamiğinde kütle kaynak terimini ifade eder. Denklem 3.1'de $\phi = 1$ olmak üzere denklemi baştan yazdığımızda kütlenin korunumu denklemi elde edilir.

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho\vec{V}\right) = 0 \tag{3.2}$$

Bu terim, sisteme eklenen veya sistemden çıkarılan kütleyi temsil eder. Bu denklem sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz akışlar için en genel kütlenin korunumunu ifade etmektedir. Zamandan bağımsız ve akışkan sıkıştırılamaz kabul edildiğinde denklem aşağıdaki gibi olmaktadır. Bu çalışma kapsamında zamandan bağımsız ve sıkıştırılamaz denklem kabul edilmiştir [14].

$$\nabla.\vec{V} = 0 \tag{3.3}$$

Momentumun korunumu sürecinde akışkanın sıkıştırılamaz olduğu kabul edilir ve bu durumda akışkan Newton tipi akışkan olarak ifade edilir, yani viskozitesi akış boyunca sabit kalır. Buna göre momentumun korunumu denklem transport

denkleminde ϕ terimi yerine hız yazıldığında Denklem (3.4), (3.5) ve (3.6)'daki gibi olacaktır.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho u \vec{V}\right) = \nabla \cdot (\mu \nabla u) - \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho . gx \tag{3.4}$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho v \vec{V}\right) = \nabla \cdot (\mu \nabla v) - \frac{\partial \rho}{\partial y} + \rho . gy \tag{3.5}$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho w \vec{V}\right) = \nabla \cdot (\mu \nabla w) - \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho . gz \tag{3.6}$$

3.2 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) Denklemleri

Gerçek akışkanların hareketi, Reynolds sayısına bağlı olarak laminer veya türbülanslı akış oluşturabilir. Türbülanslı akışın karmaşık doğası nedeniyle, Navier-Stokes denklemleri kullanılarak doğrudan çözümlemek zordur. Türbülanslı akışta hız ve basınç gibi akış parametreleri zamanla düzensiz bir şekilde değişir. Denklem 3.7 akış içerisinde herhangi bir anda hız ve basıncın ortalama ve anlık sapmalarının toplamını ifade etmektedir [14][15].

$$u = \bar{u} + u' \qquad v = \bar{v} + v' \qquad w = \bar{w} + w' \tag{3.7}$$

Burada $\bar{u},\ \bar{v},\ \bar{w}$ basınç ve hızın ortalama anlık ortalama değerlerini; u', v', w' da ortalama değerlerin anlık savrulma değerlerini temsil etmektedir. Bu ifadeler süreklilik denkleminde kullanılırsa denklem 3.8 de görüldüğü gibi ifade edilebilir.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\bar{u} + u') + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v} + v') + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{w} + w') = 0 \tag{3.8}$$

3.3 Türbülans Modelleri

Bilgisayar destekli akış analizlerinde türbülans modeli belirlerken birkaç farklı metot uygulanabilir. Bunlardan en çok tercih edilen k-ω türbülans modelidir. Akışkan türbülans karakteristiğini belirlemek için iki taşınım denklemi kullanmaktadır. Bunlar akış içerisindeki türbülans taşınım ve dağılım gibi faktörlerin hesaba katılmasını sağlar. k ifadesi kinetik enerjiyi tanımlar. ω ifadesi türbülansın akış içerisinde dağılma oranını ifade eder. Bu çalışmada türbülans modeli olarak k-ω SST türbülans modeli tercih edilmiştir. Aşağıda görüldüğü gibi 3.9 denklemi türbülans kinetik enerjisini, 3.10 denklemi spesifik dağılma oranını göstermektedir [14].

$$\frac{\partial \mathrm{k}}{\partial \mathrm{t}} + U_j \frac{\partial \mathrm{k}}{\partial \mathrm{k}_j} = Pk - \beta * k\omega \frac{\partial}{\partial \mathrm{x}_j}((v + v_t \sigma_k) \frac{\partial \mathrm{k}}{\partial \mathrm{x}_j}) \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial \mathrm{t}} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial \mathrm{k}_j} = aS^2 - \beta\omega^2 + \frac{\partial}{\partial \mathrm{x}_j}\left((v + v_t\, \omega_k) \frac{\partial \mathrm{k}}{\partial \mathrm{x}_j}\right) + 2(1 - F_1)\sigma\omega^2 \frac{1}{\omega} \frac{\partial \mathrm{k}}{\partial \mathrm{xi}} \frac{\omega}{\partial \mathrm{xi}} \quad (3.10)$$

3.4 Duvar Fonksiyonu

Bilgisayar destekli akış analizlerinde cisim yüzeyi ile akışkan arasındaki etkileşimin çözülmesi oldukça zordur. Yüksek Reynolds değerlerinde cisim yüzeyinin sınır tabaka yapısı oldukça küçük ağ yapıları ile kaplanmalıdır ama bu yüksek miktarda iş yoğunluğu ve bilgisayar performansı gerektirebilir. Bu durumu daha çözülebilir hale getirmek için duruma hücre olarak bakmaktansa bir duvar fonksiyonu kullanılabilir. Cisim yüzeyi belli bir y+ değerine göre kalınlık belirlenmekte ve boylu boyunca sınır tabakası oluşturulmaktadır. Bu y+ değeri için Reynolds değeri ve ortak bir g kat sayısı oluşturulmalıdır. Aşağıdaki denklemlerle hesaplaması gerçekleştirilebilir [14].

$$g = \exp\left(-\frac{Re_y}{11}\right) \quad (3.11)$$

$$Re_y = \sqrt{\frac{ky}{v}} \quad (3.12)$$

3.5 Sonlu Hacimler Yöntemi

Sonlu Hacimler Yöntemi (SHY) (Finite Volume Method), akışkanlar dinamiği ve ısı transferi gibi karmaşık mühendislik problemlerinin sayısal çözümü için kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, hesaplama alanını küçük hacimlere bölerek her bir hacimde denge denklemlerini uygular. Diferansiyel denklemler, bu küçük hacimlerde ayrık hale getirilir ve büyük bir lineer denklem sistemi oluşturulur. Bu sistem sayısal yöntemlerle çözülerek hız, basınç ve sıcaklık gibi fiziksel büyüklükler hesaplanır. SHY, karmaşık geometrilere ve sınır koşullarına uyum sağlayabilirken, yüksek hesaplama gücü ve zaman gerektirebilir. Akışkanlar mekaniği, ısı transferi ve aerodinamik gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılır [14].

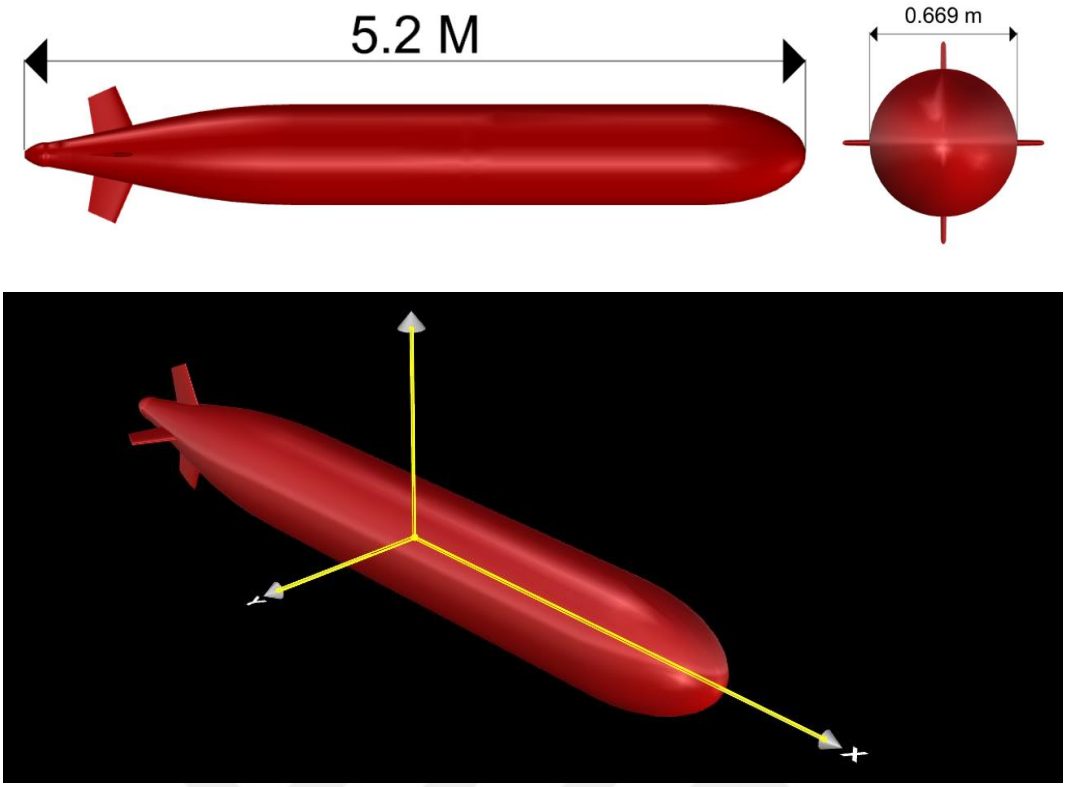
4
SAYISAL HESAPLAMALAR

4.1 Autosub Modeli ve Özellikleri

Autosub sualtı aracının tarihsel bağlamı ve kullanım amaçları zamanla geliştirilmiştir. Autosub su altı aracı, çeşitli amaçlar için tasarlanmış ve birkaç farklı geometriye sahiptir. Autosub sualtı aracı 7 metre uzunluğunda ve 0.9 metre çapındadır. Şekil 4.1'de boyutları ve görünüşleri verilmiştir. Bu çalışmada, direnç analizlerinde su altı aracı 7 metre olarak manevra analizlerinde ise 3/4 ölçekli olacak şekilde kullanılmış ve analiz edilmiştir. Su altı aracının geometrik özellikler Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1 Autosub Modeli Geometrik Özellikleri

L_{oa} (Tam Boy)	5.2 m
D (Su altı Araç Çapı)	0.669 m
L_n (Autosub Burun Uzunluğu)	1.022 m
Burun Şekli	Eliptik
L_b (Autosub Gövde Uzunluğu)	2.020 m
S_b (Gövde Kesit Alanı)	0.352 m^2
L_{aft} (Kıç Gövde Uzunluğu)	1.799 m
CG_N (Ağırlık Merkezi Burundan Uzaklığı)	2.310 m
B_T (Kuyruk Mesafesi)	0.854 m
C (Kuyruk Ucu Veter Uzunluğu)	0.200 m
Ön Kenar Tarama Açısı	14.40°
Arka Kenar Tarama Açısı	0°
Kanat Profili	NACA0015



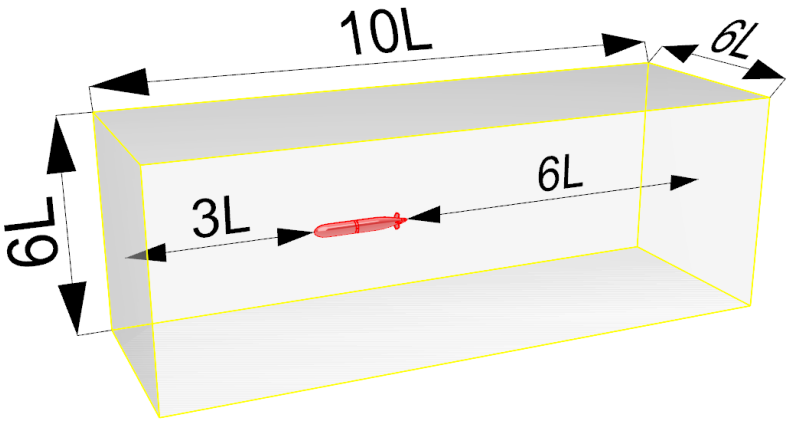
Şekil 4.1 Autosub Geometrisi görünüşleri

4.2 Analiz Koşullarının Oluşturulması

Ana hedefimiz, çözüm ağı yapısı oluşturarak hesaplama maliyetlerini en aza indirmek ve sağlıklı bir hata payı ile analizler yapmaktır. Bu hedefe ulaşmak için öncelikle bir ağ bağımsızlık çalışması gerçekleştirildi. Bu çalışmanın temeli, Autosub sualtı aracının mevcut deneysel verileri ile yapılacak doğrulama çalışmaları ile başlamaktadır. Deneysel sonuçlar ayrıca ağ bağımsızlık analizlerinde de kullanılmıştır. Bu nedenle, hesaplamalarda doğru ve güvenilir sonuçlar elde etmek için sayısal modelin ağ yapısı üzerindeki etkisini ve bağımlılığını anlamak amacıyla kapsamlı bir çözüm ağı bağımsızlığı çalışması gerçekleştirilmiştir.

Sınır koşullarını tanımlamak için dikdörtgen prizması bir hacim yapısı tercih edilmiştir. Sualtı aracının geometrik boyunu L olarak kabul ederek, akış hacmi önde 3L, arkada 6L, altta, üstte ve yanlarda 3L olarak belirlenmiştir. Bu hacmin ön yüzünde bir hız giriş noktası tanımlanmış ve arka yüzde 0 Pa değeri ile bir basınç çıkışı belirtilmiştir. Yan yüzler, akış durumunu etkilememek için duvar

yüzeylerinde kayma gerilmesi etkisi slip olarak belirlenmiştir. Autosub modelinin çevresindeki ağ yapısı iyileştirilmiştir. Her bir savrulma açısı durumu için model, merkezden gerekli açı kadar döndürülerek tekrar konumlandırılmıştır. Analizler, model pozisyonu veya sınır koşulları değiştirilmeden tekrarlanmıştır. Akış hacmi ve sınır koşullarını tanımlamak için Star CCM+ programı kullanılmıştır.



Şekil 4.2 Akış Hacmi Sınır Koşulları

4.3 Akış Fizik Modeli

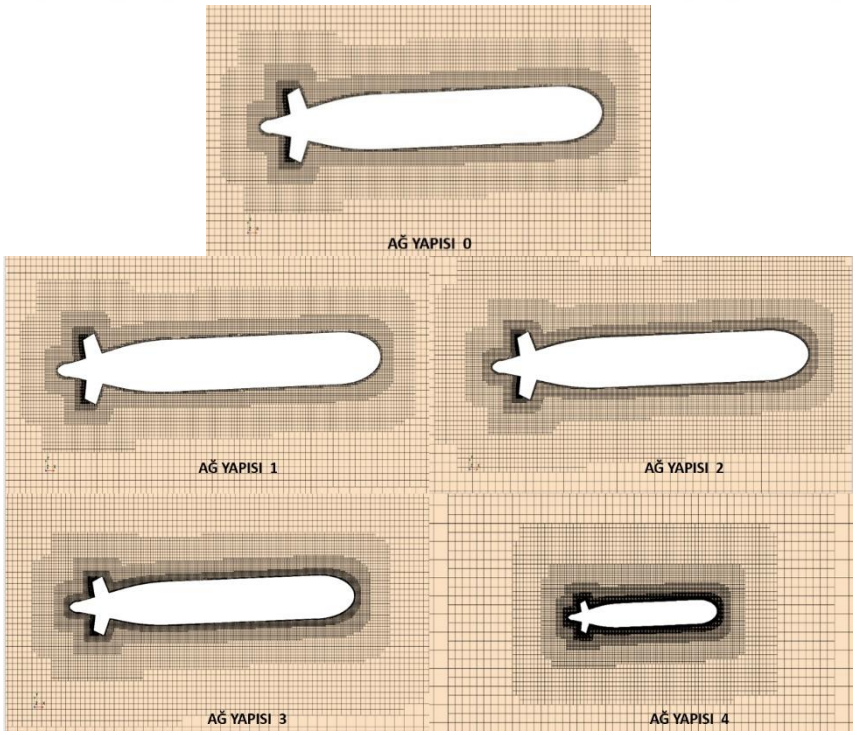
Tüm akış analizi hesaplamalarında, sürekli ve kararlı Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemleri kullanılmıştır. Navier-Stokes denklemlerini çözmek için başlıca k-epsilon, k-ω ve SST modelleri gibi RANS türbülans modelleri tercih edilmektedir. Bu modeller, düşük hesaplama maliyetleri ve makul doğruluk ile yakınsama yetenekleri nedeniyle tercih edilmektedir. Analiz çalışmaları için STAR CCM+ yazılımı kullanılmıştır. Viskoz etkiler, programda yer alan duvar fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş ve analizler buna göre değerlendirilmiştir. İlk tabaka kalınlığı, $0 < y+ < 5$ aralığındaki y+ değerlerinden oluşmaktadır. Bu değerler Reynolds sayısına dayalı olarak hesaplanmış ve ilk tabaka kalınlığını hesaplamak için kullanılan denklem 4.1'e göre on tabaka olarak modellenmiştir [16][17].

$$\Delta y = L\Delta y^{+}\sqrt{80}R^{-13/14} \tag{4.1}$$

$$\delta = 0.035LR^{-1/7} \tag{4.2}$$

4.4 Mesh Modeli ve Belirsizlik Analizi

Bu analiz çalışmasında, beş farklı ağ boyutuyla ağ yapısını optimize etmek için analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.3, sualtı aracının yüzey ağlarını göstermektedir. ITTC (International Towing Tank Conference) tarafından belirlenen kurallar ve yönergeler doğrultusunda, her bir ağ yapısı arasındaki boyut farkı $\sqrt{2}$ faktörü ile değiştirilmiş ve direnç değerlerinin yakınsama durumları incelenmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi, ağ yapısının Autosub modelinin etrafında inceltildiği, baş ve kanat bölgelerinde en düşük değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir. Bunun ana amacı, akış bölgesindeki değişiklikleri etkili bir şekilde belirlemek ve direnç değerlerini deneysel verilere en yakın konuma getirmektir. Bunun diğer bir amacı da baş ve kıç bölgelerdeki y+ değerlerinin istenilen aralıklarda sağlanması zor olduğu için o bölgenin ağ yapısı boyutunun düşük tutulması gerekmektedir. Uygun ağ yapısını bulmak için farklı ağ boyutları analiz edilmiş ve grid yakınsama indeksi (GCI) yöntemi kullanılmıştır. Beş farklı ağ boyutu ile senaryolar 2° savrulma açısında tekrarlanmış bu buradan çıkan sonuçlar deneyle elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır. Tablo 4.2, ağ yapılarına ait eleman sayılarını ve bu ağ yapılarına ait analiz sonuçlarını göstermektedir [16][18].

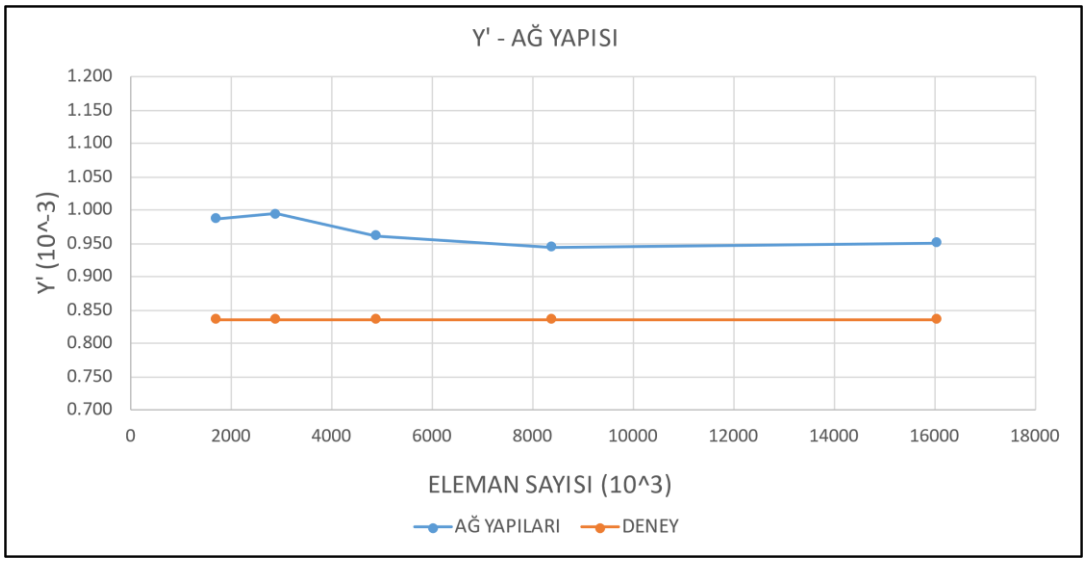


Şekil 4.3 Model Ağ Yapıları

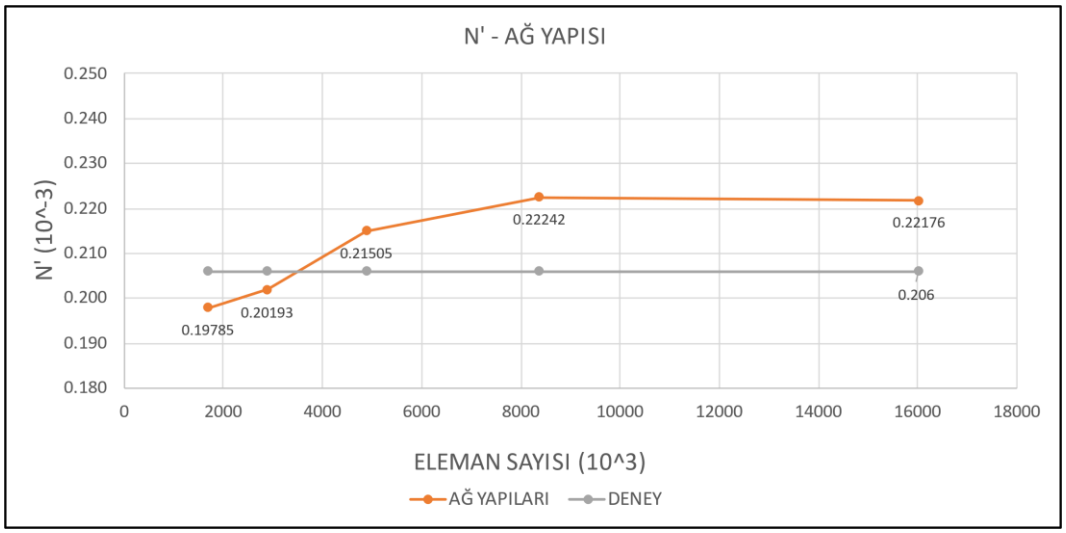
Tablo 4.2 Statik Sürüklenme Kuvvet ve Moment sonuçları

	Eleman sayısı	**Y Değeri**	**Y' Değeri (10^{-3})**	**Hata Payı (Y'-%)**	**N' Değeri (10^{-3})**	**Hata Payı (N' -%)**
Ağ Yapısı 4	16,029,425	92.86	0.951	13.8	0.207	-0.9
Ağ Yapısı 3	8,373,519	92.17	0.944	12.9	0.206	-0.3
Ağ Yapısı 2	4,886,657	93.82	0.961	15.0	0.197	4.2
Ağ Yapısı 1	2,886,470	97.06	0.994	18.9	0.192	6.7
Ağ Yapısı 0	1,692,539	96.38	0.987	18.1	0.188	8.7

Tablo 4.2'de görüldüğü gibi beş farklı ağ yapısı için beş farklı Y' ve N' değerleri deneyden elde edilen Y' ($0.836x10^{-3}$) ve N' ($0.206x10^{-3}$) değerleri ile karşılaştırılmış ve arasındaki fark görülmektedir [17].



Şekil 4.4 Model Ağ Yapıları Yanal Öteleme Kuvveti (Y')



Şekil 4.5 Model Ağ Yapıları savrulma momenti (N')

Gerçek hayattaki uygulamalar sonlu bir ağ üzerinde çözüldüğünde HAD ayrıştırma hataları meydana gelebilir. Ağ yapısının kalitesi, bu çözümlerin doğruluğuyla yakından ilişkilidir. Yıllar içinde, bu ayrıştırma hatalarını ölçmek ve HAD sonuçlarının güvenilirliğini garanti etmek için bir dizi araç geliştirilmiştir [19]. Ağ Yakınsama İndeksi (GCI), HAD simülasyonlarında ağ çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizliği değerlendirmek için kullanılan sistematik bir yöntemdir. HAD simülasyonları giderek daha karmaşık hale geldikçe, güvenilir hata tahminine olan ihtiyaç büyük önem kazanmaktadır. Çoğu durumda, HAD simülasyonları, deneysel verilerin bulunmadığı fiziksel olayların sonuçlarını tahmin etmek için kullanılır. Bu nedenle, sayısal çözümlerin, ağ yapısı sıklaştırıldıkça doğru bir cevaba yakınsadığından emin olmak kritik önem taşır [19]. Ağ yakınsama testleri, giderek daha sık ağ yapılı simülasyonlar çalıştırmayı ve anahtar değişkenlerdeki değişiklikleri incelemeyi içerir. GCI, bir HAD çözümünün asimptotik çözüme, yani sonsuz derecede ince bir ağ elde edilecek çözüme ne kadar yakın olduğunu ölçmek için tasarlanmıştır. GCI kullanarak, mühendisler ve bilim insanları ağ çözünürlükleriyle ilgili sayısal belirsizliği standart ve tutarlı bir şekilde raporlayabilirler [19]. Ağ yapısındaki karmaşıklığı hafifletmek için sunulan bu

yöntem, araştırmacılar ve kurumlar tarafından geniş çapta kabul görmüştür. Bu çalışmada, GCI yöntemi şu şekilde kullanılmıştır.

$$\mathbf{h} = \left[\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{N}}\sum_{\mathbf{i=1}}^{\mathbf{N}}(\Delta V_i)\right]^{\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{3}}} \tag{4.3}$$

denklem 4.3'teki V_i değeri hücre hacimlerini, N eleman sayısını ve aşağıdaki denklemlerde göreceğimiz h_1, h_2, h_3 değerleri İnce, orta ve kaba ağ modellerini temsil eden ve ağ iyileştirme faktöründe etkili olan modellerdir.

$$\mathbf{r_{21}} = \frac{\mathbf{h_2}}{\mathbf{h_1}};\ \mathbf{r_{32}} = \frac{\mathbf{h_3}}{\mathbf{h_2}} \tag{4.4}$$

R değerleri, önce ince ve orta ağ modelleri arasında, ardından orta ve kaba ağ yapıları arasında hesaplanan iyileştirme faktörünü temsil eder.

$$\mathbf{p} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{lnln(r_{21})}}\left|\mathbf{ln}\left|\frac{\boldsymbol{\varepsilon_{32}}}{\boldsymbol{\varepsilon_{21}}}\right| + \mathbf{q(p)}\right| \tag{4.5}$$

$$\mathbf{q(p)} = \mathbf{ln}\left(\frac{\mathbf{r_{21}^p - s}}{\mathbf{r_{32}^p - s}}\right) \tag{4.6}$$

$$s = 1 * sgn\left(\frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}}\right) \tag{4.7}$$

$$\varepsilon_{32} = \emptyset_3 - \emptyset_2;\ \varepsilon_{21} = \emptyset_2 - \emptyset_1 \tag{4.8}$$

$\emptyset_k$, k'ncı karenin çözümünü içerir, ancak her karenin hesaplamasını elde edemediğimizden, yanal sürüklenme kuvveti gibi bir skaler değer alınabilir. Böylece, ε_{32} ve ε_{21} hesaplamasında kullanılır. Bunlar, R hesaplamasında kullanılır. Eğer s negatif bir değer alırsa, bu salınımlı yakınsama anlamına gelir.

$$R = \frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}} \tag{4.9}$$

$$\emptyset_{ext}^{21} = \frac{(r_{21}^p \emptyset_1 - \emptyset_2)}{r_{21}^p - 1} \tag{4.10}$$

$$e_a^{21} = \left|\frac{\emptyset_1 - \emptyset_2}{\emptyset_1}\right| \tag{4.11}$$

$$e_{ext}^{21} = \left|\frac{\emptyset_{ext}^{12} - \emptyset_1}{\emptyset_{ext}^{12}}\right| \tag{4.12}$$

$$GCI_{fine}^{21}\ \frac{1.25 * e_a^{21}}{r_{21}^p - 1} \tag{4.13}$$

Denklem 4.10'da $\emptyset_{ext}^{21}$, seçilen Ø'nin ekstrapole edilmiş skaler değerini temsil eder. Son olarak, Ağ Yakınsama İndeksi (GCI) denkleme göre belirlenebilir. Seçilen ağ yapıları baz alınarak elde edilen sonuçlar aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 4.3 Belirsizlik Analizi Sonuçları

	Sürüklenme Kuvveti (Y) [N]	Savrulma Momenti (N) [N-m]
N_1	1692539	
N_2	2886470	
N_3	4886657	
N_4	8373519	
N_5	16029425	
r_{21}	1.4235	
r_{32}	1.1874	
$Ø_1$	92.864	111.541
$Ø_2$	92.175	112.876
$Ø_3$	93.828	115.137
p	3.2549	1.5316
R	-0.4168	0.5904
$Ø_{deney}^{21}$	93.183	109.686
e_a^{21}	0.74%	1.19%
e_{deney}^{21}	0.34%	1.66%
GCI_{mesh5}^{21}	0.43%	2%

Belirli bir HAD çalışması için ağ çözünürlüğünün yeterli olup olmadığını belirlemek için GCI yararlıdır. GCI değerinin düşük olması (genellikle %5'ten az) çözümün iyi çözüldüğünü ve sayısal belirsizliğin düşük olduğunu gösterir [19]. Bununla birlikte, daha yüksek GCI değerleri, ağ çözünürlüğünün daha da inceltilmesi gerektiği anlamına gelir. GCI'nın yalnızca ayrıştırma hatalarını dikkate aldığını ve modelleme hataları veya sınır koşullarındaki belirsizlik gibi diğer belirsizlikleri ele almadığı bunlarında ayrı bir şekilde incelenmesi gerektiği unutulmamalıdır. GCI, uygulamada diğer doğruluk ölçütleriyle birlikte sunulmalıdır [19].

Tablo 4.3, hesaplanan GCI ve alt seviye değerlerini göstermektedir. İşlem süresi ve maliyeti göz önünde bulundurulduğunda, ağ yapısı 3 ve ağ yapısı 4 arasında önemli bir fark olmamasına rağmen, eleman sayısının iki katına çıkarılması analiz süresinde önemli bir artışa neden olmaktadır. Bu nedenle, dengeli performansı baz alarak ağ yapısı 3 tercih edilmiş ve bu parametreler diğer analizler için kullanılmıştır.

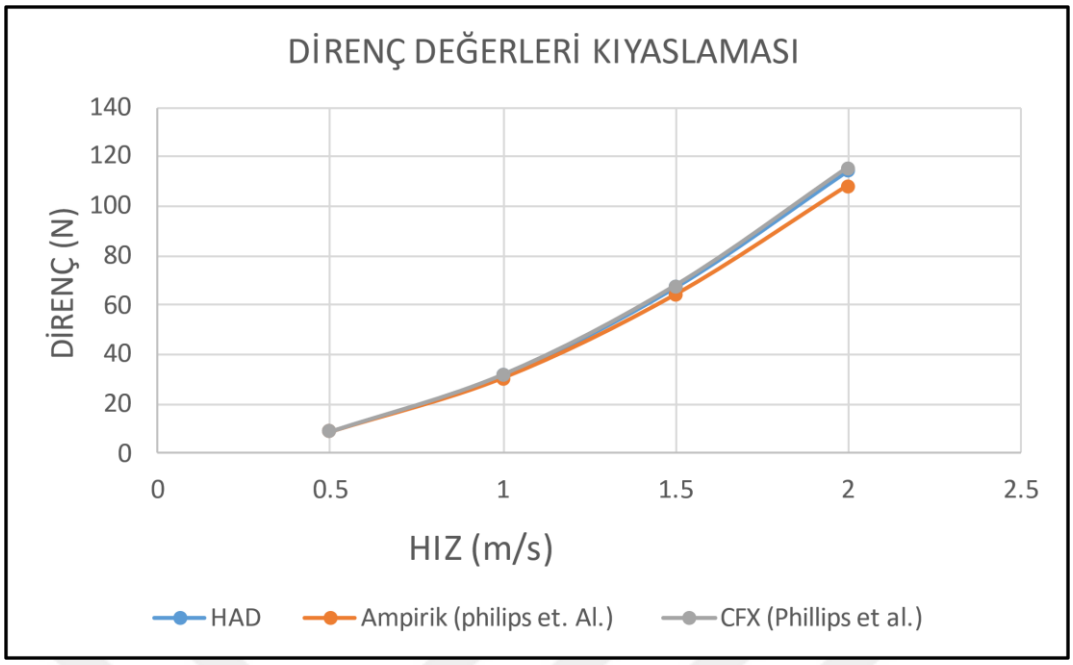
GCI yöntemi, birçok HAD vakasında değerlendirilmiş olup, sayısal belirsizliği ölçmek için güvenilir ve basit bir yöntem olarak geniş çapta kabul görmektedir. Özellikle, odak noktası yeni sayısal yöntemlerin geliştirilmesi değil, simülasyon sonuçları olan uygulamaya yönelik HAD çalışmaları için oldukça uygundur [19]. Bununla birlikte, GCI'nin bazı sınırlamaları vardır, özellikle de çözümün ağ iyileştirmesi ile tutarlı bir şekilde gelişmediği tekdüze olmayan veya salınımlı yakınsama durumlarında gözlenir [19]. Bu tür durumlarda, görünür doğruluk derecesi (p) değişkenlik gösterebilir ve bu da GCI formülünün uygulanmasında zorluklara yol açabilir. Böyle durumlarda, en küçük kareler yöntemiyle hesaplanan GCI gibi alternatif yöntemler dikkate alınabilir [19].

4.5 Autosub Su Altı Aracı Direnç Analizleri

Statik direnç analizinde, 7 metre uzunluğunda ölçeklendirilmiş Autosub modeli kullanılmıştır. Analizler ilk olarak 0° hücum açısında, ağ yapısı 3 kullanılarak oluşturulan kontrol hacminde farklı hız birimlerinde gerçekleştirilmiş ve sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Bu hız birimleri model ile yapılan deney aşamasında kaydedilmiş verilerden faydalanılarak oluşturulmuştur. Deney sonuçları CFX, HAD ve diğerleri olarak kategorize edilmiştir ve Tablo 4.4'te sunulmuştur. Analizden elde edilen hız dağılımları ise Şekil 4.6'de gösterilmektedir.

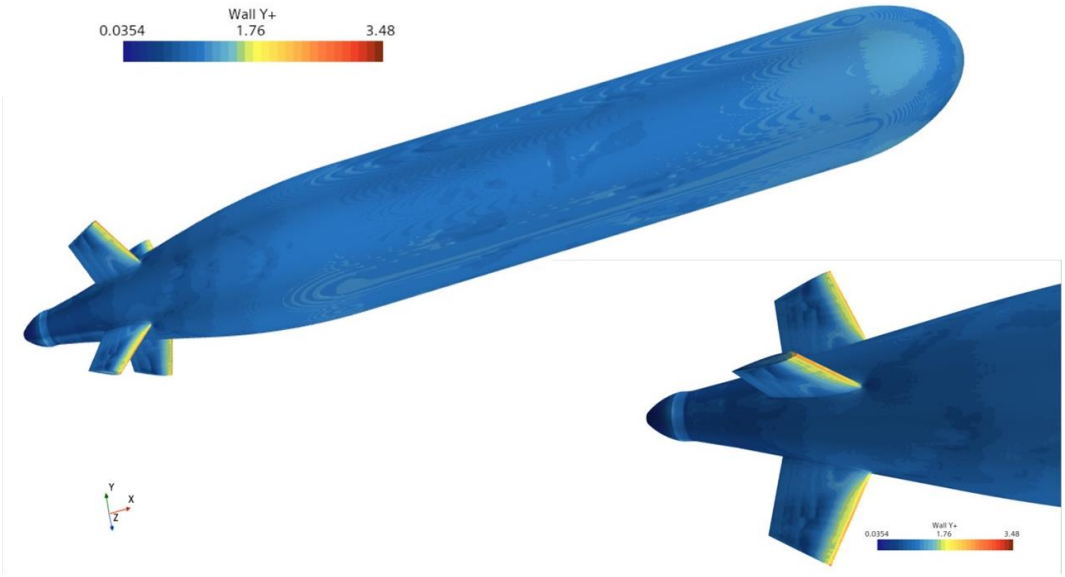
Tablo 4.4 Direnç Verileri

Hız (m/s)	Deney (Fallows)	Deney (Kimber)	Ampirik (Phillips vd.)	CFX (Phillips vd.)	HAD	Hata % Ampirik	Hata % CFX
0.5	10.337	-	9.003	8.943	9.06	1.91	2.58
1.0	18.023	-	30.663	31.959	30.65	3.94	-0.27
1.5	100.017	-	64.242	67.926	68.24	4.80	-0.88
2.0	-	126.649	108.228	115.531	113.9	5.68	-1.00

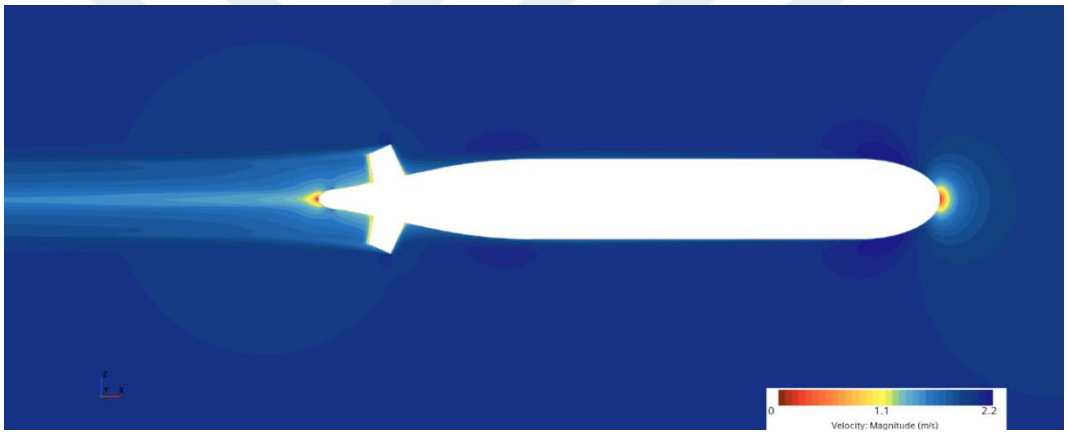


Şekil 4.6 Autosub Aracının Deneysel ve Analitik Verilerinin Karşılaştırılması

Tablodaki verilerden anlaşılabileceği gibi, Fallow'un test sonuçları diğerlerinden farklılık göstermektedir. Bunun başlıca nedenlerinden biri, modelin 2.5 metrelik bir ölçekte kullanılması ve test kurulumunun modeli su yüzeyinden 2.6 çap derinliğinde çekilmesi olarak gösterilmektedir [20]. Bu tür durumlarda, su yüzeyinde meydana gelebilecek dalgalanmalar test sonuçlarını olumsuz etkileyebilir. Yüksek hızlarda çekme ve test sırasında bir kol yardımıyla hareket ettirme, hata yüzdesini artırır ve hesaplamaları etkilemektedir. HAD analizleri ile CFX arasındaki hata marjı, diğerlerine göre makul düzeydedir ve kabul edilebilir olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca ampirik ve HAD sonuçları arasında %5-6 arası hata payına sahiptir [3,15].



Şekil 4.7 Ortalama Y+ dağılımı



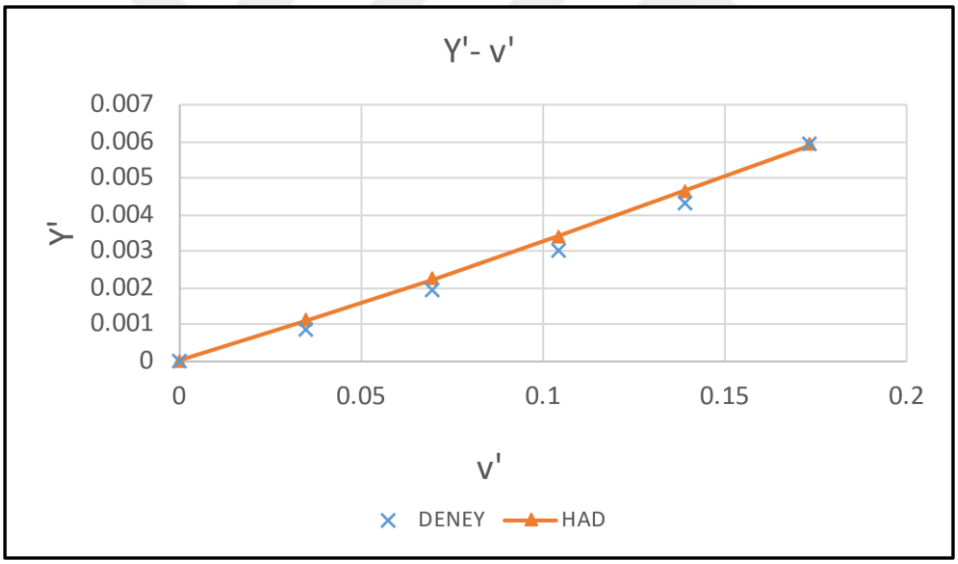
Şekil 4.8 2 m/s de Hız Dağılımı

4.6 Statik Sürüklenme Analizleri

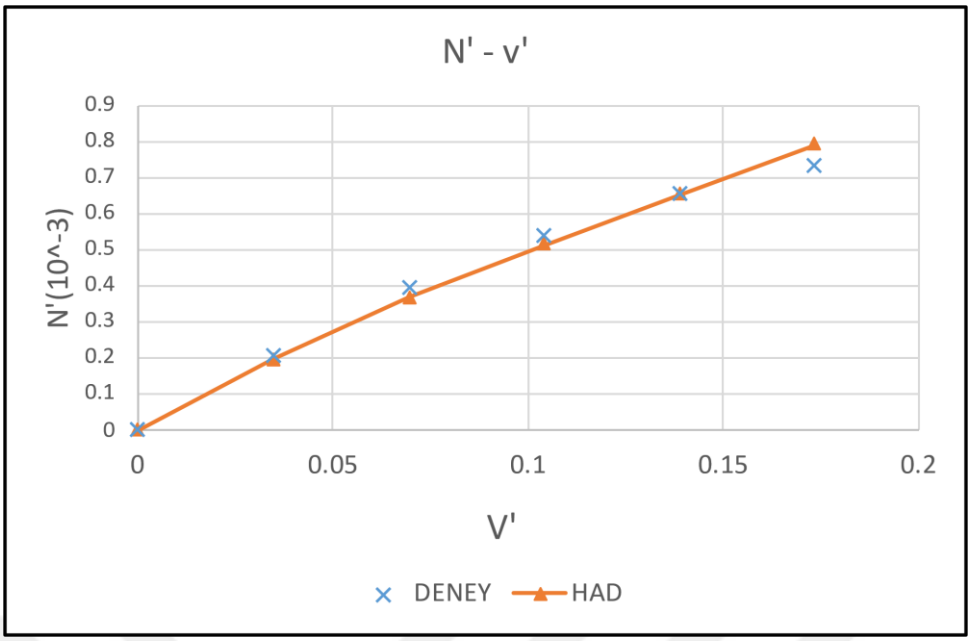
Bir önceki bölümde Autosub Su altı aracını 0˚ derece hücum acısı ile farklı hız değerlerinde direnci incelenmiştir. Bu bölümde su altı aracı modeli 0, 2, 4, 6, 8 ve 10 olmak üzere altı farklı hücum açılarında ve 2.69 m/s hızında analiz edilmiştir. Boyutsuz Y' ve N' değerleri ile deneysel değerlerin karşılaştırması Tablo 4.4'te sunulmuştur. Ayrıca Şekil 4.9 ve 4.10 moment ve kuvvet değerlerinin sürüklenme hızı ile değişimlerini göstermektedir. Burada, boyutsuz hız terimi, hücum açısı altında y eksenine karşılık gelen hız bileşenini ifade eder.

Tablo 4.5 Statik Sürüklenme Verileri

Hücum Açısı (°)	Eleman Sayısı	Hız (m/s)	Ortalama Y+	X Yönlü Direnç	Y Yönlü Direnç	Z Yönü Savrulma Momenti (N)
2	8,373,519	2.69	1.02	96.60	92.17	112.87
4	8,377,067	2.69	1.02	104.61	195.61	216.41
6	8,474,182	2.69	1.02	115.41	298.03	311.17
8	10,831,409	2.69	1.02	120.51	417.82	351.15
10	11,924,840	2.69	1.02	140.79	535.83	411.64
Hücum Açısı (°)	**Y' (10^{-3})**	**Y' Deney (10^{-3})**	**N' (10^{-3})**	**N' Deney (10^{-3})**	**Y' Hata Payı (%)**	**N' Hata Payı (%)**
2	0.944	0.836	0.222	0.206	-12.9	-7.9
4	2.004	1.913	0.426	0.391	-4.7	-9.0
6	3.053	3.032	0.633	0.540	-0.7	-13.5
8	4.281	4.305	0.651	0.652	0.5	-6.1
10	5.490	5.931	0.811	0.734	7.4	-10.5



Şekil 4.9 Yanal Hareket Kuvveti – Hız Bileşeni Grafiği



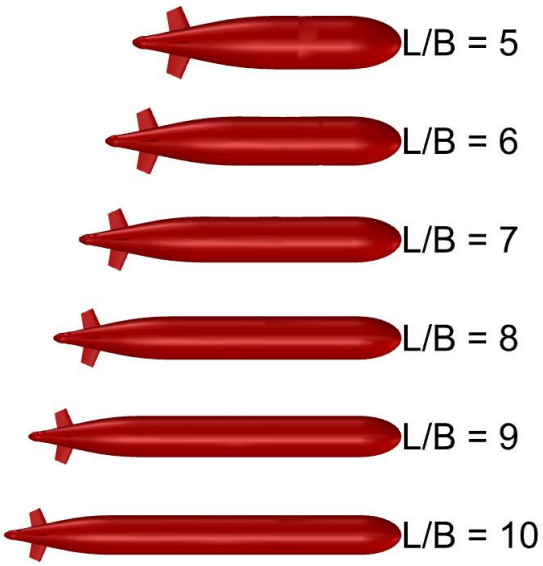
Şekil 4.10 Savrulma Momenti – Hız Bileşeni Grafiği

4.7 Farklı L/B Oranları ve Statik Sürüklenme Durumları

Bu bölümde, önceki bölüme benzer şekilde, Autosub modelinin statik sürüklenme analizleri 6 farklı boy-genişlik (L/B) oranları için incelenmiştir. Deplasman hacimleri sabit kalacak şekilde altı farklı model üretilmiş ve bu modeller için 0, 2, 4, 6, 8 ve 10 derecelik açılarda toplam 36 analiz gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlarda, L/B oranları tam sayılar olarak seçilmiş ve uygun bir şekilde ölçeklendirmek için referans bir B genişliği belirlenmiştir. Ardından, deplasmanı korumak için paralel gövde uzunluğu ayarlanmıştır. Hücum açısı her model için hacim merkezlerinden döndürülerek hazırlanmıştır.

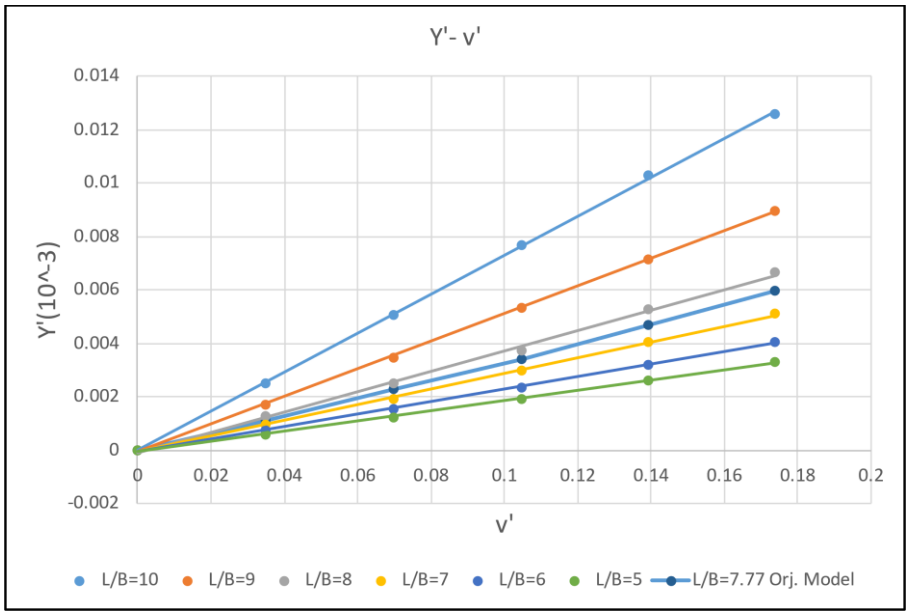
Tablo 4.6 L/B Oranları ve Geometrik Boyutlar

Boy (m)	Genişlik (m)	L/B
4.087	0.817	5
4.500	0.750	6
4.900	0.700	7
5.287	0.660	8
5.666	0.629	9
6.036	0.603	10

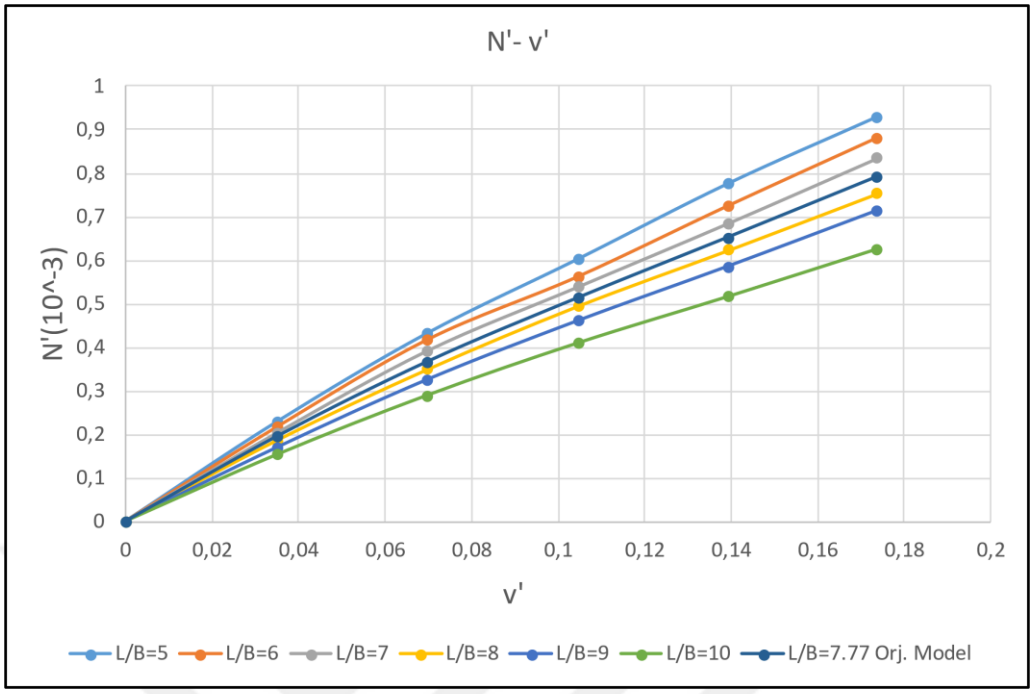


Şekil 4.11 L/B Geometrileri

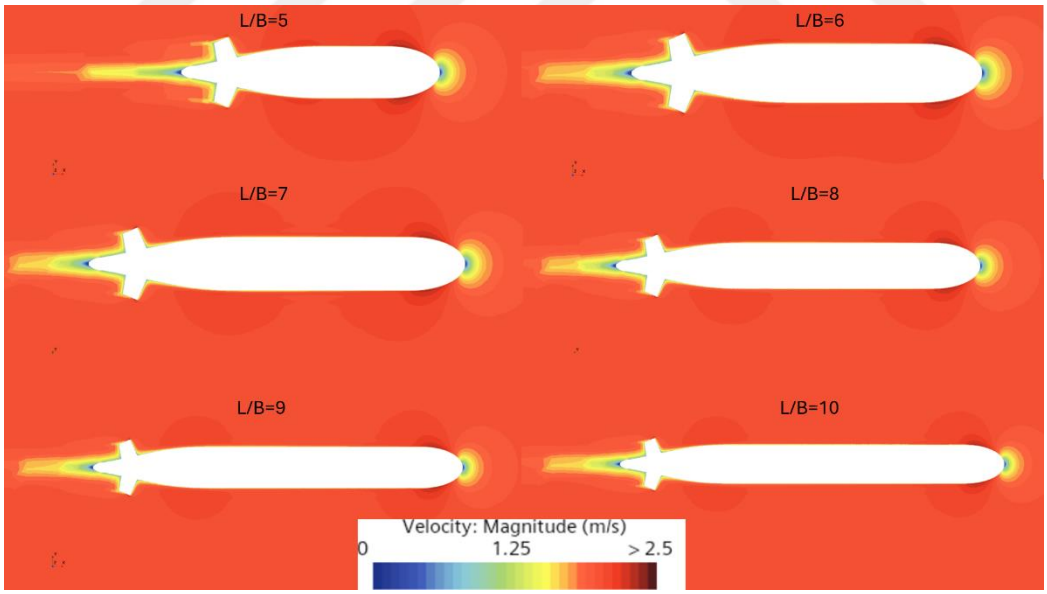
Farklı L/B oranları için ağ yapılarının oluşturulmasında, çözüm ağı bağımsızlık çalışmaları dikkate alınmış ve önceki bölümlerde kullanılan ağ boyutu ve model kullanılmıştır. Analizler ortalama 10,760,000 elemanla gerçekleştirilmiştir. Farklı L/B oranları ile yapılan analizlerin grafikleri sunulmuştur. Bu grafikler, boyutsuz sürüklenme katsayısı ve boyutsuz savrulma momenti katsayısını boyutsuz sürüklenme hızı ile karşılaştırmaktadır. Yanal kuvvet Y, savrulma momenti N ve sürüklenme hızı v, önceki bölümlerde verilen denklemler kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.12 Farklı L/B Oranları İçin Yanal Kuvvetlerin ve Sürüklenme Hızlarının Değişimi



Şekil 4.13 Farklı L/B Oranları İçin Savrulma Momenti ve Sürüklenme Hızlarının Değişimi



Şekil 4.14 Farklı L/B Oranları İçin Hız Dağılımları

Tablo 4.7 L/B için Boyutsuz Oran Katsayıları

L/B	Y'_v	N'_v
5	0.019	0.0053
6	0.023	0.0050
7	0.029	0.0047
8	0.038	0.0046
9	0.052	0.0041
10	0.073	0.0036

Tablo 4.7'de gösterildiği gibi, katsayı oranlarının değerleri görülmektedir. Bu tabloya göre, su altı aracının L/B oranı büyüdükçe, yani sabit deplasmanda boy artırılıp çap azaltıldığında, yan öteleme kuvvetinin yanal hız ile değişimi boyutsuz katsayısı (Y'_v) oranında bir artış ve savrulma momentinin yanal hız ile değişimi boyutsuz katsayısı (N'_v) oranında bir azalma görülmektedir. Uzunluk değeri ölçek oranına bağlıdır. Autosub sualtı aracının uzunluğunun artırılması, boyutsuz yanal sürüklenme kuvvetini artırır. Ancak uzunluk arttıkça boyutsuz savrulma momenti değerleri azalır. Benzer şekilde, değerler incelendiğinde kuvvet değerlerinin arttığı, moment değerlerinin ise azaldığı gözlemlenebilir. Bu, uzunluk arttıkça su altı aracına etki eden kuvvet noktasının aracın ağırlık merkezine yaklaştığını gösterir. Sonuç olarak, aynı statik sürüklenme açısına sahip daha uzun bir Autosub aracı, daha kısa olanına göre daha fazla yanal öteleme kuvvetine ve daha az savrulma momentine maruz kalır. Yeni bir geometrinin tasarımında, yanal kuvvetlerin kontrolü daha zor hale geldiğinden L/B oranının azaltılması hedeflenmelidir. Ancak, döner etkilerin daha önemli olduğu durumlarda, L/B oranının artırılması hedeflenebilir.

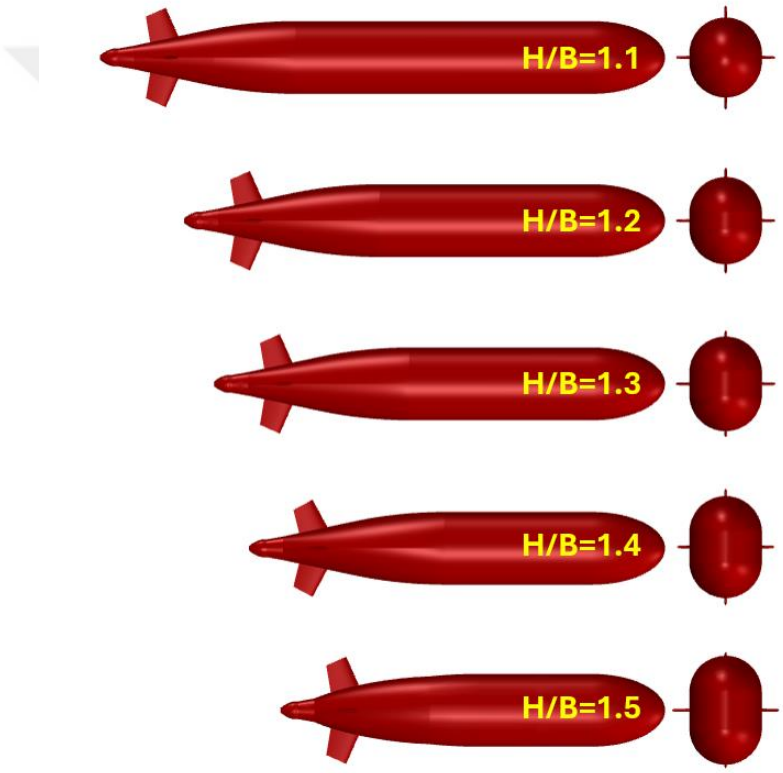
4.8 Farklı H/B Oranları ve Statik Sürüklenme Durumları

Bu bölümde, önceki bölüme benzer şekilde, Autosub modelinin statik sürüklenme analizleri 5 farklı yükseklik-genişlik (H/B) oranı için gerçekleştirilmiştir. Deplasman hacimleri sabit kalacak şekilde altı farklı model üretilmiş ve bu modeller için 0, 2, 4, 6, 8 ve 10 derecelik açılarda toplam 30 analiz gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlarda, H/B oranları belirlenirken B değeri sabit tutularak yükseklik değerleri paralel gövde olacak şekilde arttırılmış ve eliptik bir form olarak modellenmiştir. Ardından, deplasmanı korumak için boydaki paralel

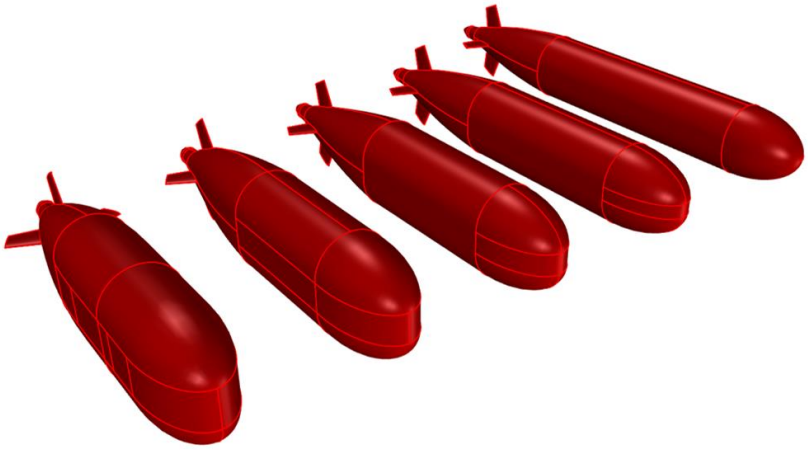
gövde uzunluğu ayarlanmıştır. Hücum açısı her model için hacim merkezlerinden döndürülerek hazırlanmıştır.

Tablo 4.8 H/B Oranları ve Geometrik Boyutlar

Boy (m)	Yükseklik (m)	Genişlik (m)	H/B
4.778	0.735	0.669	1.1
4.425	0.803	0.669	1.2
4.150	0.869	0.669	1.3
3.829	0.936	0.669	1.4
3.539	1.003	0.669	1.5

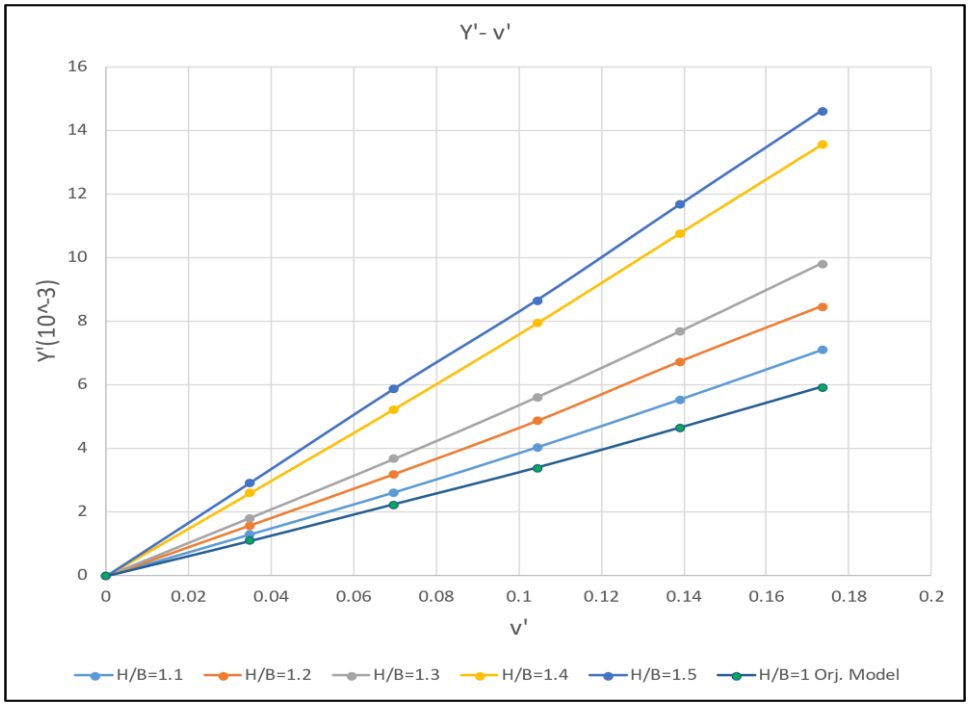


Şekil 4.15 H/B Geometrileri

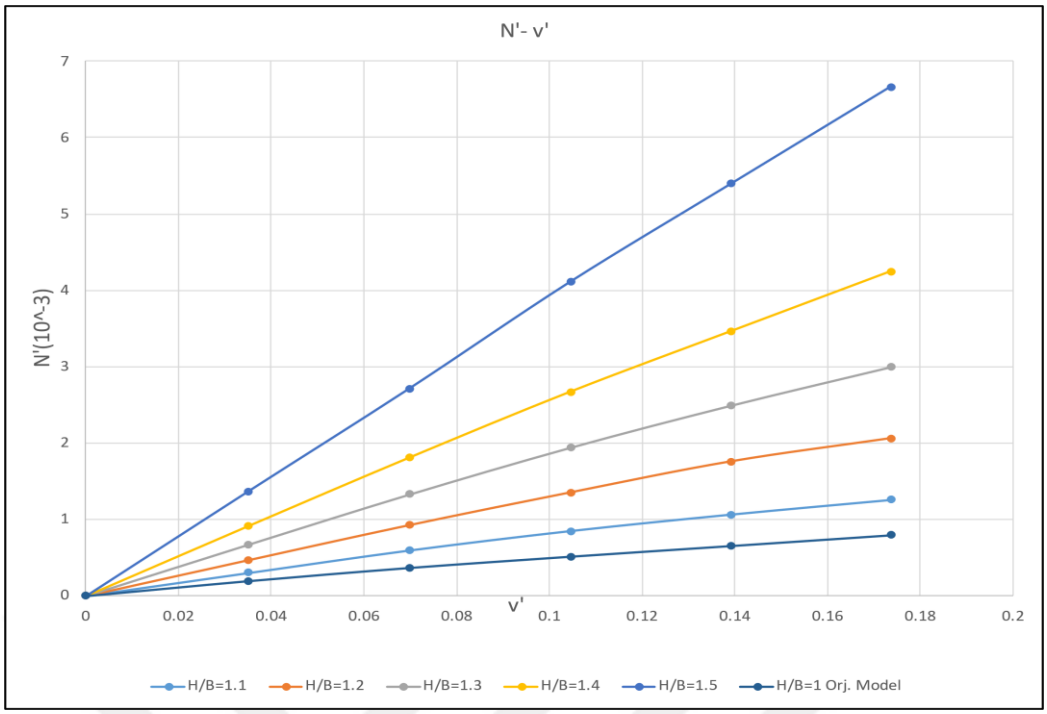


Şekil 4.16 Perspektif Görünüş

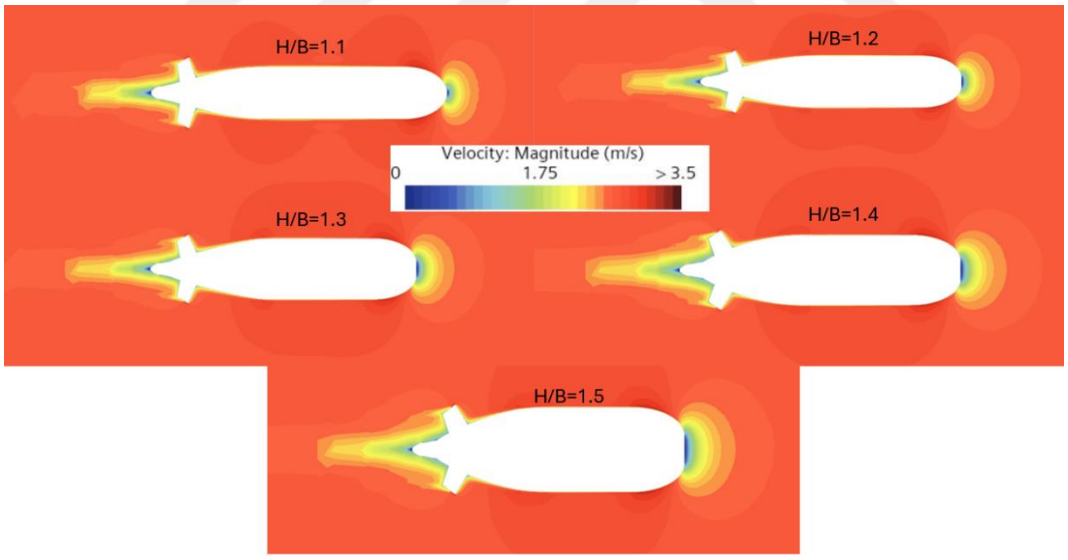
Farklı H/B oranları için ağ yapılarının oluşturulmasında, ağ bağımsızlık çalışmaları dikkate alınmış ve önceki bölümlerde kullanılan ağ boyutu ve model kullanılmıştır. Analizler ortalama 10,000,000 elemanla gerçekleştirilmiştir. Farklı H/B oranları ile yapılan analizlerin grafikleri sunulmuştur. Bu grafikler, boyutsuz yanal öteleme kuvveti katsayısı ve boyutsuz Savrulma momenti katsayısını boyutsuz sürüklenme hızı ile karşılaştırmaktadır. Yanal kuvvet Y', savrulma momenti N′ ve sürüklenme hızı v′, önceki bölümlerde verilen denklemler kullanılarak hesaplanmıştır.



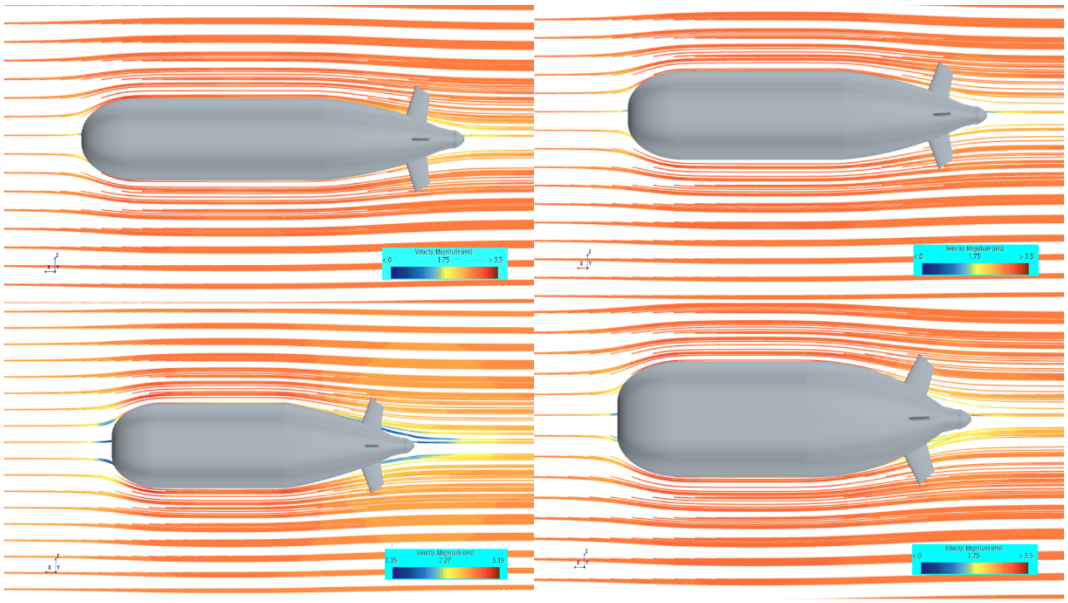
Şekil 4.17 Farklı H/B Oranları İçin Yanal Kuvvetlerin ve Sürüklenme Hızları



Şekil 4.18 Farklı H/B Oranları İçin Savrulma Momenti ve Sürüklenme Hızları



Şekil 4.19 Farklı H/B Oranları İçin Hız Dağılımları



Şekil 4.20 Farklı H/B Oranları İçin Akım Çizgileri

Tablo 4.9 H/B için Boyutsuz Oran Katsayıları

H/B	Y'_v	N'_v
1.1	0.034	0.0072
1.2	0.048	0.0119
1.3	0.056	0.0173
1.4	0.078	0.0244
1.5	0.084	0.0384

Tablo, katsayı oranlarının değerlerini göstermektedir. Bu tabloya göre, H/B oranlarındaki artışla yan öteleme kuvvetinin yanal hız ile değişimi boyutsuz katsayısı (Y'_v) ve savrulma momentinin yanal hız ile değişimi boyutsuz katsayısı (N'_v) oranında aynı anda artış görülmektedir. Uzunluk değeri ölçek oranına bağlıdır. Autosub sualtı aracının uzunluğunun artırılması, boyutsuz yanal sürüklenme kuvvetini artırır. Ancak uzunluk arttıkça boyutsuz savrulma momenti değerleri azalır. Fakat bu model incelemesinde H oranlarındaki yüksek artıştan kaynaklı boyda yüksek azalmalar görülmektedir ve bu etki autosub modeli üzerinde hem kuvvetsel hem de momente bağlı stabilizasyonu zorlaştırmakta ve kötü etkilemektedir. Benzer şekilde, değerler incelendiğinde kuvvet değerlerinin arttığı anda, moment değerlerinin de arttığı gözlemlenebilir. Sonuç olarak, aynı statik sürüklenme açısına sahip daha uzun bir araç, daha kısa olanına göre daha az yanal

rahatsız edici kuvvet ve daha az rahatsız edici moment yaşar. Bunun temel nedeni H/B oranı arttıkça deplasmanın sabit tutulması gerektiği için boydan bir azalma söz konusu olmasıdır. Yeni bir geometrinin tasarımında model üzerinde mümkün oldukça H/B oranında arttırmaya gidilmeden durum incelenmeli ve buna uygun yerleşim ve form optimizasyonu yapılmalıdır.

5
SONUÇ

Bu çalışma, Autosub su altı aracının ölçekli modeli kullanılarak araca etki eden kuvvetlerin ve momentlerin hesaplanmasını içermektedir. Hesaplamalarda akışkan dinamiğinin ana unsurları olan RANS denklemleri ve türbülans modelleri kullanılmıştır. Analizlerde, farklı hücum açılarında ve 2.69 m/s seyir hızında gerçekleştirilmiş, statik direnç ve savrulma momentlerine odaklanılmıştır. Çalışmanın başında deneysel veriler ve hata oranları için hesaplanan değerler kullanılarak bir ağ bağımsızlığı çalışması yapılmıştır. Optimum ağ yapısı belirlendikten sonra, diğer açılar için analizler tamamlanmış ve sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Ek olarak, gerçek ölçekli direnç analizleri de aynı ağ boyutları kullanılarak yapılmıştır.

Açık kaynak literatür, dirençle ilgili iki deneysel bulgu sunmaktadır. Bunlardan ilki Kimber ve Marshall tarafından yapılan çalışmada, 2 m/s hızındaki bir deneyde direnç değeri hesaplanmışken, Fallows daha farklı hızlar için direnç değerleri bulmuştur. Ayrıca Fallows'un deneysel çıktıları, farklı akışkan derinlikleri için 0 ile 5 m/s arası hızları dahil etmiş ve böylece dalga etkisiyle oluşan dirençleri de içermiştir. Sonuç olarak, HAD analizi ile Fallows'un deneysel sonuçları arasında bir farklılık bulunmaktadır. Benzer şekilde, Kimber ve Marshall tarafından daha önce elde edilen ampirik ve deneysel sonuçlar incelendiğinde, bu fark yeniden belirginleşmektedir. Phillips ve diğerleri de bu tutarsızlığın nedenine değinmiştir. Kimber ve Marshall'ın deneysel sonuçları, çeşitli sürüklenme açıları için gerçekleştirilen statik sürüklenme analizleriyle iyi bir şekilde uyumludur. Yanal sürüklenme kuvvetlerinde deneysel bulgulardan daha düşük bir savrulma varken, momentlerde savrulma daha yüksektir. Ancak, maksimum yüzde onluk bir hata oranı ile makul kabul edilmektedir. Direnç analizlerinden ve statik sürüklenme durumlarından bulunan kuvvet ve moment verileri, literatürde yer alan ampirik ve deneysel bulgularla benzerlik gösterip, hata oranı %6 ile %9 arasında değişmektedir. HAD yöntemi, sürüklenme ve savrulma momentlerini doğru bir şekilde belirleyebilmektedir. Çalışmanın son bölümünde, ağ bağımsızlık ve doğrulama çalışması sonuçları ağ boyutları ve analiz kurulumlarını vermiş ve

ardından farklı L/B ve H/B oranlarına sahip geometrilerin analizinde kullanılmıştır. Bu analiz sonuçlarının değerlendirilmesi, artan L/B oranının manevra türevleri üzerindeki etkisini göstermektedir. L/B oranı arttıkça, sürüklenme kuvveti kaynaklı katsayılar artarken, savrulma momenti kaynaklı katsayılar azalmaktadır. Fakat aynı durum H/B için geçerli olmamaktadır. H/B oranı arttığında sonuçlar hem sürüklenme kuvvetinin arttığını hem de savrulma momentinin arttığını göstermektedir. Form optimizasyonu sırasında bu bulgular eşliğinde değişiklikler yapılarak uygun değerlere ulaşılabilir.

KAYNAKÇA

[1] The Story of Autosub, National Oceanography Centre. [Online]. Available: https://noc.ac.uk/technology/technology-archive/doggie-dolphin-university-college-london#top.

[2] P. Cardenas and E. A. de Barros, "Estimation of AUV hydrodynamic coefficients using analytical and system identification approaches," *IEEE Oceanic Eng. J.*, vol. 45, pp. 1157-1176, Aug. 2019.

[3] N. Kimber and W. Marshfield, "Design and testing of control surfaces for the autosub demonstrator test vehicle," DRA Haslar, Portsmouth, Hampshire, UK, Tech. Rep. F-3, 1993.

[4] H. Öztürk, K. B. Gündüz and Y. A. Özden "Numerical investigation of the maneuvering forces of different DARPA Suboff configurations for static drift condition," *Journal of ETA Maritime Science;* 11(3), pp.137-147, 2023.

[5] Y. N. Kormilitsin, O. A. Khalizev, *Theory of Submarine Design*, 1st ed. Saint-Petersburg, 2001.

[6] C. Wu, S. He, D. Zhu, and M. Gu, "Numerical simulation of microbubble flow around an axisymmetric body," *Journal of Hydrodynamics*, vol.18, pp. 217-222, Jul. 2006.

[7] S. N. Çıplakkaya, "Autosub su altı aracının direnç ve yanal hızda manevra özelliklerinin sayısal olarak incelenmesi," M.S. thesis, Dept. of Marine Engineering, Yıldız Technical University, Istanbul, Turkey, 2023.

[8] J. M. J. Journée and W. W. Massie, *Offshore hydromechanics*, 1st ed. The Netherlands: Delft University of Technology, 2001.

[9] T. I. Fossen, *Guidance and control of ocean vehicles*, 1st ed. John Wiley & Sons: New York, 1994.

[10] E. Kahramanoglu, "Numerical investigation of the scale effect on the horizontal maneuvering derivatives of an underwater vehicle," *Ocean Engineering*, vol. 272, 2023.

[11] S. Arslan, "Su altı araçları için yeni geliştirilen hidrodinamik modelleme yöntemleri kullanılarak otonom bir su altı aracının hidrodinamik karakteristiğinin incelenmesi," M.S. thesis, Dept. of Aerospace Engineering, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey, 2013.

[12] M. Gertier, G. R. Hagen, "Standard equations of motion for submarine simulation," Naval Ship Research and Development Center, U.S. Navy, Maryland, Sci Rep. 102, 1967.

[13] Ö. F. Sukas, Ö. K. Kınacı and Ş. Bal, "A Review on prediction of ship manoeuvring performance, part 1 and part 2" *GMO Journal of Ship and Marine Technology*, Number: 210, December 2017.

[14] L. Tartar, *An introduction to the Navier-Stokes equation and oceanography*, 2006th ed. Berlin, Germany: Springer, 2006.

[15] J. Anderson, *Fundamentals of Aerodynamics*, 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2016.

[16] *Uncertainty analysis in CFD verification and validation methodology and procedures*, ITTC Resistance Committee, Wuxi, China, 2017, pp. 1-13.

[17] A. Phillips, M. Furlong, and S. R. Turnock, "The use of computational fluid dynamics to determine the dynamic stability of an autonomous underwater vehicle," *in Proc. 10th symposium on Numerical Towing Tank*, Dec. 2007.

[18] M. Can, "Numerical simulation of hydrodynamic planar motion mechanism test for underwater vehicles," M.S. thesis, Dept. of Applied Science, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2014.

[19] I. B. Çelik, U. Ghia, P. J. Roache, C. J. Freitas, H. Coleman and P. E. Raad. "Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 130, pp. 1-4, July 2008.

[20] D. Fallows, "Characterization of the propulsion system of autonomous underwater vehicles," Ph.D. dissertation, Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, University of Southampton, Southampton, U.K., 2004.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Y. Şahin, Y. A. Özden, "Numerical investigation of different length to beam (L/B) and height to breadth (H/B) ratios on the static drift condition of the Autosub underwater vehicle," Global Maritime Congress, May 2024.