T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AUTOSUB SU ALTI ARACININ DİRENÇ VE YANAL HIZDA MANEVRA ÖZELLİKLERİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Sare Nur ÇIPLAKKAYA

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

Eylül, 2023

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AUTOSUB SU ALTI ARACININ DİRENÇ VE YANAL HIZDA MANEVRA ÖZELLİKLERİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Sare Nur ÇIPLAKKAYA tarafından hazırlanan tez çalışması 16.10.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı, Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları 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 _____

Prof. Dr. Fahri ÇELİK, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Emre KAHRAMANOĞLU, Üye
İzmir Katip Çelebi Üniversitesi _____

Danışmanım Dr. Yasemin ARIKAN ÖZDEN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Autosub Su Altı Aracının Direnç ve Yanal Hızda Manevra Özelliklerinin Sayısal Olarak İncelenmesi" 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.

Sare Nur ÇIPLAKKAYA

İmza

Aileme

ve

eşime

TEŞEKKÜR

Autosub su altı aracının direnç ve yanal hızda manevra özelliklerinin sayısal olarak incelenmesi adlı tez çalışmamda bana yol gösteren ve yardımcı olan Dr. Öğr. Üyesi Yasemin ARIKAN ÖZDEN hocama teşekkürlerimi borç bilirim. Ayrıca bu süreç içerisinde arkamda olup bana sürekli destek olan bölüm eşime ve aileme, şu anda birlikte çalışmaktan mutluluk duyduğum Eureka Yachts ekibine teşekkür ederim.

Sare Nur ÇIPLAKKAYA

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR iv
SİMGE LİSTESİ vi
KISALTMA LİSTESİ ix
ŞEKİL LİSTESİ x
TABLO LİSTESİ xi
ÖZET xii
ABSTRACT xiv
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 9
2 HİDRODİNAMİK TEORİSİ VE DENKLEMLERİ 11
2.1 Altı Serbestlik Dereceli Hareketler 11
2.2 Altı Serbestlik Dereceli Hidrodinamik Denklem Setinin Türetilmesi 13
3 METODOLOJİ 24
3.1 Ana Denklemler 24
3.2 RANS Denklemleri (Reynolds Averaged Navier-Stokes) 25
3.3 Türbülans Modeli 26
3.4 Duvar Fonksiyonları 27
3.5 Sonlu Hacimler Yöntemi 27
3.6 Çözüm Algoritması 28
4 NÜMERİK HESAPLAMALAR 29
4.1 Autosub Su Altı Aracı Modeli 29
4.2 Statik Sürüklenme Koşulunun İncelenmesi 30
4.3 Direnç Analizleri 36
4.4 Statik Sürüklenme Analizleri 38
4.5 Farklı L/B Oranlarına Sahip Autosub için Statik Sürüklenme 43
5 SONUÇLAR 48
KAYNAKÇA 50
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 52

SİMGE LİSTESİ

ω	Açısal Hız
W	Ağırlık
CG	Ağırlık Merkezi
CGN	Ağırlık Merkezinin Burundan Uzunluğu
x_G	Ağırlık Merkezinin x Doğrultusundaki Konumu
y_G	Ağırlık Merkezinin y Doğrultusundaki Konumu
z_G	Ağırlık Merkezinin z Doğrultusundaki Konumu
m	Aracın Kütlesi
D	Çap
p	Dönme Açısal Hızı
w	Düşey Öteleme Doğrusal Hızı
w’	Düşey Öteleme Doğrusal Hızının Serbest Akım Hızına Oranı
Z’	Düşey Öteleme Katsayısı
X’	Eksenel Kuvvet Katsayısı
SB	Gövde Kesit Alanı
m/s	Hız
x_B	Hidrostatik Kaldırma Merkezinin X Doğrultusundaki Konumu
y_B	Hidrostatik Kaldırma Merkezinin Y Doğrultusundaki Konumu
z_B	Hidrostatik Kaldırma Merkezinin Z Doğrultusundaki Konumu
$\boldsymbol{\alpha}$	Hücum Açısı
X	İleri Öteleme Kuvveti
u	İlerleme Doğrusal Hızı
u’	İlerleme Doğrusal Hızının Serbest Akım Hızına Oranı
LAFT	Kıç Gövde Uzunluğu
ν	Kinematik Viskozite
F	Kuvvet
BT	Kuyruk Açıklığı
C	Kuyruk Ucu Veter Uzunluğu
Re	Reynolds Sayısı

r	Sapma Açısal Hızı
r’	Sapma Açısal Hızının Serbest Akım Hızına Oranı
$\dot{r}$	Sapma Açısal İvmesi
β	Sapma Açısı
v	Sapma Doğrusal Hızı
v’	Sapma Doğrusal Hızının Serbest Akım Hızına Oranı
Y’	Sapma Kuvveti Katsayısı
N	Sapma Momenti
$N'_{v'}$	Sapma Momenti Boyutsuz Oran Katsayısı
N’	Sapma Momenti Katsayısı
Z	Savrulma Kuvveti
U	Serbest Akım Hızı
Δy	Sınır Tabaka Kalınlığı
L	Su Altı Aracının Boyu
LN	Su Altı Aracının Burun Boyu
LB	Su Altı Aracının Gövde Uzunluğu
B	Su Altı Aracının Hidrostatik Kaldırma Kuvveti
LOA	Su Altı Aracının Tam Boyu
I_x	Su Altı Aracının X Yönüne Göre Eylemsizlik Momenti
I_{xy}	Su Altı Aracının XY Eksenlerine Göre Çarpım Atalet Momenti
I_{xz}	Su Altı Aracının XZ Eksenlerine Göre Çarpım Atalet Momenti
I_y	Su Altı Aracının Y Yönüne Göre Eylemsizlik Momenti
I_{yz}	Su Altı Aracının YZ Eksenlerine Göre Çarpım Atalet Momenti
I_z	Su Altı Aracının Z Yönüne Göre Eylemsizlik Momenti
$\dot{u}$	X Ekseni Yönündeki İvme
$\dot{v}$	Y Ekseni Yönündeki İvme
Y	Yanal Öteleme Kuvveti
$Y'_{v'}$	Yanal Öteleme Kuvveti Boyutsuz Oran Katsayısı
g	Yerçekimi İvmesi
ρ	Yoğunluk

q	Yunuslama Açısal Hızı
q’	Yunuslama Açısal Hızının Serbest Akım Hızına Oranı
$\dot{q}$	Yunuslama Açısal İvmesi
M	Yunuslama Momenti
M’	Yunuslama Momenti Katsayısı
p	Yuvarlanma Açısal Hızı
p’	Yuvarlanma Açısal Hızının Serbest Akım Hızına Oranı
$\dot{p}$	Yuvarlanma Açısal İvmesi
ϕ	Yuvarlanma açısı
K	Yuvarlanma Momenti
K’	Yuvarlanma Momenti Katsayısı
$\dot{\omega}$	Z Ekseni Yönündeki İvme
t	Zaman

KISALTMA LİSTESİ

AUV	Autonomous Underwater Vehicle
B	Breadth
CTD	Conductivity Temperature Depth
NERC	Dynamic Bayesian Networks
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
ITTC	International Towing Tank Conference
L	Length
NOC	National Oceanography Centre
PMM	Planar Motion Mechanism
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 DOGGIE (Deep Ocean Geological and Geophysical Instrumented Explorer)[1] **2**

Şekil 1.2 DOLPHIN (Deep Ocean Long Path Hydrographic Instrument)[1] **2**

Şekil 2.1 Su altı araçlarının altı serbestlik dereceli hareketleri **11**

Şekil 2.2 Su altı araçları için eksen takımı ve hareketleri **15**

Şekil 4.1 Autosub geometisinin üst ve arkadan görünüşü **30**

Şekil 4.2 Autosub geometrisinin perspektif görünüşü **30**

Şekil 4.3 Statik sürüklenme testi için sınır koşulları **31**

Şekil 4.4 Ağ yapıları **32**

Şekil 4.5 6^{o} Statik sürüklenme için yanal öteleme kuvveti (Y') **33**

Şekil 4.6 6^{o} Statik sürüklenme için sapma momenti (N') **34**

Şekil 4.7 Autosub için direnç tahminlerinin karşılaştırılması **37**

Şekil 4.8 2 m/s'deki Direnç için hız dağılımı **37**

Şekil 4.9 Yanal öteleme kuvvetinin (Y') yanal öteleme hızı (v') ile değişimi **39**

Şekil 4.10 Sapma momentinin (N') yanal öteleme hızı (v') ile değişimi **39**

Şekil 4.11 Autosub etrafındaki hız dağılımı **40**

Şekil 4.12 Q Criteria = Autosub etrafında 5 yüzey **40**

Şekil 4.13 Autosub etrafındaki akım çizgileri **41**

Şekil 4.14 Autosub'un kıç gövdesindeki basınç dağılımları **42**

Şekil 4.15 Autosub etrafındaki vektör alanı **42**

Şekil 4.16 Yeni geometrilerin modelleri **44**

Şekil 4.17 L/B oranındaki geometriler için sürüklenme hızları ile yanal öteleme kuvvetlerinin değişimleri **45**

Şekil 4.18 L/B oranındaki geometriler için sürüklenme hızları ile sapma momentinin değişimleri **45**

Şekil 4.19 Hareketler için katsayıların elde edilmesi örneği **46**

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 İnşaa Edilmiş Autosub Araçları [1] **4**
Tablo 4.1 Autosub Su Altı Aracı Modeli Geometrik Özellikleri **29**
Tablo 4.2 6º Statik Sürüklenme Sonuçları **33**
Tablo 4.3 Belirsizlik Analizi Sonuçları **36**
Tablo 4.4 Direnç Sonuçları **37**
Tablo 4.5 Statik Sürüklenme Sonuçları **38**
Tablo 4.6 Yeni Geometrilerin L/B Oranları **43**
Tablo 4.7 Yanal Öteleme Kuvveti ve Sapma Momenti için Boyutsuz Oran Katsayıları **46**

ÖZET

Autosub Su Altı Aracının Direnç ve Yanal Hızda Manevra Özelliklerinin Sayısal Olarak İncelenmesi

Sare Nur ÇIPLAKKAYA

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Yasemin ARIKAN ÖZDEN

Bu çalışma, Autosub su altı aracının 3/4 ölçekli modeli ve gerçek ölçekli geometrileri kullanılarak kuvvet ve moment hesaplamalarını içermektedir. Çalışmada, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) hesaplamaları RANS denklemleri ve k-ω türbülans modelleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Direnç analizleri, 0 ile 2 m/s hız aralığında yapılmıştır. Statik sürüklenme analizleri ise 0^o ile 10^o derece sürüklenme açıları aralığında 2 derece aralıklarla yapılmıştır. Uygun ağ yoğunluğunu belirlemek için bir ağ bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Ağ yapısı, 6 derece sürüklenme açısı için analizlerde belirlenmiş ve bu ağ yapısı diğer sürüklenme açıları için kullanılarak sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Gerçek ölçekli direnç analizleri yapılmış ve hesaplanan direnç kuvvetleri deneysel ve sayısal diğer çalışma verileri ile karşılaştırılmıştır. Statik sürüklenme ve direnç analizlerinden elde edilen kuvvet ve moment değerleri, literatürdeki deneysel sonuçlarla uyumlu bulunmuştur. Çalışmanın son bölümünde, statik sürüklenme koşullarında L/B oranının kuvvet ve momentlere etkisi sunulmuştur. Oluşturulan farklı L/B oranına sahip geometrilerin ağ yapıları oluşturulurken, ilk bölümde gerçekleştirilen ağ bağımsızlık çalışmasında seçilen ağ boyutları kullanılmıştır. Bu 5 farklı ağ yapısı, 0^o ile 10^o derece arasında 6 farklı sürüklenme açısında yapılan

analizlerde kullanılmıştır. Bu çalışmanın sonuç bölümünde, bu 30 analiz tartışılmış ve L/B oranının etkileri sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Autosub, Direnç, Statik Sürüklenme, HAD, Hidrodinamik katsayılar, Su Altı Aracı, Su Altı Aracı Manevrası

ABSTRACT

Numerical Investigation of the Underwater Vehicle Autosub for Resistance and Lateral Velocity Maneuvering Specifications

Sare Nur ÇIPLAKKAYA

Department of Naval Architect and Marine Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Yasemin ARIKAN ÖZDEN

This study involves the force and moment calculations using the 3/4rd scale model and full-scale geometries of the Autosub submarine. Computational fluid dynamics (CFD) calculations are performed using RANS equations and the k-ω turbulence models. The resistance analyses are conducted for speeds ranging from 0 to 2 m/s. Static drift analyses are conducted between the range of 0^o to 10^o degrees drift angles at 2 degrees intervals. A mesh independence study is carried out to determine the adequate mesh density. The mesh structure is determined in the analyses for 6 degrees of drift angle and this mesh structure is used for other drift angles, and the results are compared with experimental data. Full-scale resistance analyses are conducted, and the calculated resistance forces are compared with the experimental and empirical data. The force and moment values obtained from static drift and resistance analyses are found to be consistent with experimental results in the literature. The last part of the study the effect of L/B ratio on the forces and moments which occurs at static drift condition is presented. While creating the mesh structures of the geometries created in the last part, which have different L/B ratios but the same displacement value, the mesh sizes selected by the mesh independence study conducted in the first part were used. These 5 different mesh structures have

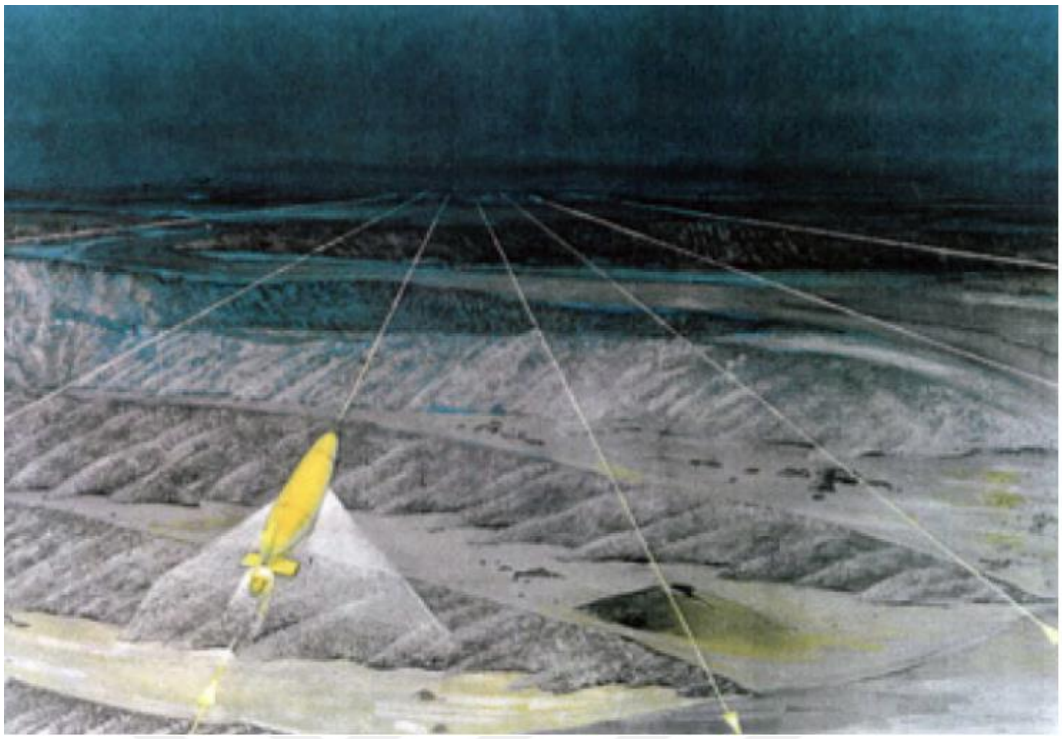
been used in the analyses which have done with 6 different drift angles between 0^o to 10^o degrees. At the conclusion part of this study these 30 analyses have been discussed and the L/B ratio effects has been presented.

Keywords: Autosub, Resistance, Static Drift, CFD, Hydrodynamic coefficients, Submarine, Submarine maneuvering

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Gelişen teknoloji ile beraber artan su altı araçları, savaş dönemine kadar yaygın olarak kullanılmamıştır. Savaşın bitmesi ile beraber su altı araçları çalışmalarına yoğunluk verilmiştir. Gerek hidrodinamik yönden gerekse kullanım amacı doğrultusunda su altı araçları için önemli çalışmalar başlatılmıştır. Bu çalışma doğrultusunda kullanılacak Autosub otonom su altı aracı modeli geçmişten günümüze gelişim göstermiştir. Teknolojinin gelişmesiyle beraber Wormley'de bulunan Ulusal Oşinografi Merkezi (NOC) otonom su altı araçlarının bilim uygulamaları geliştirmesi amacıyla bir program başlatmıştır. Ulusal Osignografi Merkezi, bugün "Marine Autonomous and Robotic Systems" adındaki otuzdan fazla filosu bulunan Southampton'daki önemli bir tesistir. 1983 yılında Stuart Rusby ve Nic Flemming Avrupa Topluluğu Ortak Araştırma Merkezine verdikleri bir raporla 6000 metre derinlik kapasitesine ve faydalı yüke sahip uzaktan çalıştırılacak bir aracın (UROV) geliştirilmesini tavsiye etmişlerdir. Bu araçta akıllı kontrol sistemlerine ek olarak 24 saat dayanıklı ve büyük hacimli depolama ile yüksek oranda veri toplama ile entegre navigasyon bulunmasını amaçlamışlardır. Yaklaşık olarak aynı zaman diliminde Brian MCCartney adlı bir araştırmacı Wormley'de okyanus havzalarından hidrografik (CTD) kesitler alacak otonom bir araç ile ilgili fikirlerini aktarmak için bir seminer düzenlemiştir. Bu fikirleri gerçeğe dönüştürmede önemli anlardan biri de John Woods'un NERC'de Deniz Bilimleri Direktörü görevini üstlenmeden önce amiral gemisi projeler için tavsiye almak için Aralık 1985'te IOS personeli ile bir araya gelmiştir. Böylece NERC'yi Autosub adlı bir programı desteklemeye ikna edebilmiştir. Nisan 1987'de Şekil 1.1'de gösterilen DOGGIE adındaki araç jeoloji ve jeofizik ile ilgili veri toplamak amacıyla ve Şekil 1.2'de gösterilen DOLPHIN adındaki araç ise hidrografi alanında bilgi toplamak amacıyla oluşturulmuştur [1].



Şekil 1.1 DOGGIE (Deep Ocean Geological and Geophysical Instrumented Explorer)[1]



Şekil 1.2 DOLPHIN (Deep Ocean Long Path Hydrographic Instrument)[1]

Bu araçlar, IOS'un illüstratörü Polly Williamson'ın resimlerinde gösterilmiştir (Şekil 1.1 ve Şekil 1.2). 1990-1994 yılları arasında araştırmacılar gelişen teknoloji ile birlikte uzmanlıklarını geliştirmişler bunun sonucunda Wormley'de tasarımlar ve prototipler üzerine sanayi, üniversiteler ve savunma laboratuvarları iş birliğiyle çalışmalar yapmıştır. Wormley'deki Autosub programının son yılları sıkıntılı geçmiştir. Planlanan çizelgede 1992 yılında deniz denemelerinin yapılması öngörülmüştür fakat hidrodinamik, sevk, komuta ve kontrol, enerji depolama ve bilim uygulamalarına artan bir destek olmasına ve teknik ilerlemelere rağmen bir araç yapmak için yeterli fon bulunamamıştır. 1994-1999 yılları arasında NERC ile yapılan anlaşma sonucu ekip Southampton'a taşınmıştır. NERC tarafından yapılan bir dizi incelemeden sonra hedef özellikler doğrultusunda DOGGIE ve DOLPHIN adındaki su altı aracı çalışmaları kabul edilmiştir. Kutup bilimi araştırma ekibi, Antarktika'daki buz tabakaları altındaki su sütunu verilerini toplamak için DOLPHIN aracını kullanmak istemiştir. Polly Williams 1996 yılının ortasına kadar 70 km menzile ve 500 metre dalış derinliğine sahip bir gösteri aracı yapmayı planlamıştır bu amaç için Southampton'da bulunan Empress Dock tankı ilk Autosub denemeleri için kullanılmaya başlanmıştır. Nick Millard ve meslektaşları "Underwater Technology" dergisinde Autosub denemelerinden elde edilen ilk 18 aylık ilerlemeyi makale olarak yayınlamışlardır. Bu makale sonrasında Autosub su altı aracı Sicilya Boğazı'nda deniz üzerindeki akışı tayin etmek, çözünmüş ve parçacıklı manganez bulunan deniz körfezinin üst havzalarının su sütununu incelemek, denizdeki buzulların altını incelemek, açık deniz araştırmalarına katkı sağlamak ve yukarı okyanusun sonar ve türbülans çalışmalarına fayda sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Elde edilen sonuçların kalitesini ölçmek için Brian King liderliğinde hidrografik veriler kullanılmıştır.

Sonraki programda Autosub Under Ice adlı araç 2002 ve 2006 yılları arasında kutup bilimi ekiplerinin deniz buzu ve buzulların altından veri toplamak amacıyla kullanılmıştır. Autosub araçlarının teknik özellikleri ve yetenekleri bu görevler için geliştirilmiş ve 2008 yılında DOGGIE Autosub 6000 olarak revize edilmiştir. Basınca dayanıklı lityum polimer şarj edilebilir pillerle çalışan ve kaldırma kuvveti için köpük kullanan bu sürüm, hafif basınçlı kasalarda karşılaşılan birçok zorluğun üstesinden gelmiştir. Son olarak Autosub Long Range adlı araç Wormley'de

belirlenen gereksinimler doğrultusunda son kısım olarak tasarlanmıştır [1]. Tablo 1.1'de 2011'e kadar inşaa edilmiş Autosub su altı araçlarının özellikleri verilmiştir.

Tablo 1.1 İnşaa Edilmiş Autosub Araçları [1]

Su Altı Araçları	İnşaa Yılı	Anahtar Özellikler	Durum
Autosub 1	1995/1996	·Cam elyaf basınçlı ka pile 500 metre derinlik.	Çoğunlukla Autosub 2 aracına çevrilebilmektedir.
		·Enerji kaynağı:kurşun asit(-70km menzil) veya manganez alkali(-250km menzil).	
		·Standart araçlar arasında CTD'ler, standart ve özel amaçlı Doppler akım profilleyiciler, türbülans probları ayrıca pH gibi deneysel sensörler	
		·216 görev tamamlamıştır.	
Autosub 2	2000	·Karbon fiber basınçlı kaplarla 1600 metre derinlik.	Şubat 2005 tarihinde Fimbul Buzulunun altında kaybolmuştur
		·Enerji kaynağı: Manganez alkali (yaklaşık 700km menzil, hız/sensörlere bağlı olarak)	
		·Yeni araçlar arasında manganez ve metan sensörleri, kabarcık boyutu rezonatörü, yukarı bakan yan taramalı sonarlar, çok ışınlı alan sonarı, akış sitometresi yer almaktadır.	
		·Üç Antartika seferi dahil 166 görev tamamlamıştır.	
Autosub 3	2005	Autosub 2 aracına göre Teknik özellikler ve fiber optic cayro pusula yer almaktadır.	Hizmette bulunmaktadır.

Tablo 1.1 İnşaa Edilmiş Autosub Araçları (devamı)

Su Altı Araçları	İnşaa Yılı	Anahtar Özellikler	Durum
Autosub 6000	2006/2007	6000 metre derinlik. Kaldırma kuvveti için sentaktik köpük	Hizmette bulunmaktadır.
		·Enerji kaynağı: basınç dengeli yağ dolu kutularda ikincil lityum polimer hücreler.	
		·Fiber optik cayro pusula,	
		Enstrümanlar arasında CTD, ADCP, çok ışınlı alan sonarı, optik geri saçılma ve sensörler.	
Autosub Long Range	2010/2011	·6000 metre derinlik	Hizmette bulunmaktadır.
		·Enerji kaynağı: lityum enerji kaynağı(hedef menzil 6000 km) için iki dövme alüminyum basınçlı kap ve denemeler için ikincil nikel hidrit pil	
		·Aletler CTD ve ADCP ve deneysel besin sensörlerini içermektedir.	

Su altı araçlarının tasarımını belirleyen faktörlerden biri de manevra performansıdır. Manevra performansını belirleme sürecinde, hidrodinamik etkilerin oluşturduğu manevra katsayılarının hesaplanması kritik önem taşımaktadır. Su altı aracının hareketinin altı serbestlik derecesine sahip olduğu bilinmektedir. Uygun bir kontrol sistemi elde etmek için kuvvet ve momentlerle matematiksel bir model oluşturmak gerekmektedir. Bir su altı aracının manevra kabiliyetinin en önemli parametrelerinden biri, hareket denklemlerinin bir parçası olan hidrodinamik katsayılardır. Bir su altı aracının hareketini doğru bir şekilde simüle etmek veya tahmin etmek için hidrodinamik katsayılar doğru bir şekilde hesaplanmalıdır [2].

Su altı araçlarının hidrodinamik özelliklerini incelemek için hesaplamalı akışkanlar dinamiği, deneysel ve ampirik yöntemler kullanılmaktadır. Hidrodinamik katsayılar genellikle deneysel veya sayısal simülasyonlar yoluyla elde edilebilmektedir. Deneyler, ölçümler yaparak katsayıların doğrudan belirlenmesini sağlar, ancak deneylerin yüksek maliyeti ve zorluğu nedeniyle sayısal simülasyonlar giderek daha popüler hale gelmektedir. Su altı araçlarının

hidrodinamik özelliklerini incelemek için ampirik ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemlerinin yanı sıra deneysel yöntemler de kullanılmaktadır. Su altı aracının hareketinde üç ana durum bulunmaktadır: ivme, seyir ve sabit açısal hızda dönme. Bir su altı aracının manevra özelliklerini elde etmek için bu üç durumun incelenmesi gerekmektedir. İvme etkilerinden kaynaklanan hidrodinamik kuvvetleri hesaplamak için düzlemsel hareket mekanizması (PMM) deneyleri kullanılmaktadır. Seyir durumunda ortaya çıkan hidrodinamik kuvvetlerin ve momentlerin hesaplanması için çekme tankı veya çekme tankı deneyleri olarak bilinen deneysel kurulumlar kullanılırken, açısal hız etkileri için döner kollu deney test düzeneği kullanılmaktadır. Bu üç deney sistemi yardımıyla hidrodinamik katsayılar hesaplanabilmektedir [3]. Model test deneyleri, hidrodinamik katsayıların hesaplanmasında farklı yöntemlere sahiptir. Bu yöntemler sayesinde hesaplama sonuçları farklılık gösterir. PMM (Planar Motion Mechanism) testi, su altı aracının düz çekildiği ve hidrodinamik katsayıların su altı aracı için salınım veya salınım genlikli sinüzoidal olarak hesaplandığı bir test düzeneğidir. Diğer tarafta, su altı aracı sabit bir açısal hızda döndüğü durumdaki katsayılar hesaplanmak istenildiğinde kullanılan test düzeneği döner kollu test düzeneğidir. Uzunlamasına ve enine kuvvetler gibi düz hareket değerleri ölçülmek istendiğinde çekme tankı test düzeneği kullanılabilir. Bu şekilde, sürükleme, yükseklik veya yalpa açısı gibi durumlarda katsayılar ölçülebilir. Bu test örneği lineer hareketler için kullanıldığından, açısal hızla ilgili ölçümler yapılamaz. Bu özellik ile düzlemsel hareket mekanizması testi (PMM), döner kol test mekanizmasından ayrılmaktadır. Bu test düzeneklerinin kullanımı, su altı aracı tasarımı sırasında ihtiyaç duyulan hidrodinamik katsayıların elde edilmesinde çok önemli bir yere sahiptir [4].

Bu çalışmada, Britanya Ulusal Oşinografi Merkezi tarafından geliştirilen Autosub su altı aracı (AUV) kullanılmaktadır. Bu su altı aracı, bilim insanları tarafından bilimsel araştırmalar için yaygın olarak kullanılmaktadır. Autosub su altı aracı, uzun süreler boyunca su altında kalabilme özelliğine sahiptir ve çeşitli sensörler aracılığıyla su altı ortamının fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini ölçer. Okyanus sıcaklığı, tuzluluk ve su kalitesi gibi faktörleri ölçerek su altı volkanları, dağları ve kanyonları gibi çeşitli jeolojik özellikleri keşfetmek gibi görevlerde kullanılmaktadır. Ayrıca su altı biyolojik yaşamını incelemek ve izlemek için de

kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, petrol sızıntılarının veya tsunamilerin etkilerini incelemek gibi, insan kaynaklı kirlilik ve doğal afetlerin araştırılmasında da kullanılır. Uzun süreler boyunca su altında kalabilme yeteneğine sahip olması nedeniyle Autosub, okyanus bilimlerinde önemli bir araç haline gelmiş ve bu alanda birçok çalışmada kullanılmıştır. Autosub su altı aracı, açık literatürde paylaşılan kapsamlı model test sonuçlarına sahip olduğu için su altı aracı manevra çalışmaları için de iyi bir doğrulama aracıdır. Kimber tarafından yapılan çalışmada, AutoSub aracının 3/4 ölçekli modeli HASLAR tesisinde kullanılarak su altı aracının hidrodinamik katsayıları elde edilmiştir. 270 metre uzunluğunda, 12,2 metre genişliğinde ve 5,5 metre derinliğinde bir tank kullanılmıştır. Autosub'un tam ölçekteki seyir hızı 2 m/s'dir. Kimber, aynı türbülans özelliklerini elde etmek için 2,69 m/s'lik bir hız büyüklüğü kullanmıştır. Bu deneylerde ±0 ile ±10 arasında 2 derecelik artışlarla gerçekleştirilen sabit sürüklenme testleri tamamlanmıştır [5]. Southampton Enstitüsü Çekme Tankında gerçekleştirilen laboratuvar deneylerinin ve tam ölçek deniz denemelerinin ayrıntılı bir açıklaması yapılmış ve sonuçlar Fallows'un doktora tezinde paylaşılmıştır [6]. Taguchi deney yöntemlerini kullanarak, laboratuvarda tam ölçekli Autosub su altı aracı üzerinde tamamlayıcı ölçüm setleri yapmaktadır. Bu makale, Autosub gibi bir AUV için bir sevk sistemi geliştirme yöntemini sunmaktadır. Genel özellikleri ve gereksinimleri hakkında bilgi verilmektedir [6]. Autosub geometrisini kullanan önemli çalışmalardan biri, Wu ve diğerlerinin yaptığı çalışmalardır. Bu çalışmalarda, su altı aracının toplam direncini azaltmayı amaçlamışlardır. Bu amaçla, mikro kabarcıkların simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Kabarcıklar su altı aracının gövdesine yakın geçtiğinde, sıvının yoğunluğunda ve türbülans viskozitesinde azalma meydana getirmiştir. Bu sisteme sahip olan su altı araçlarında toplam direncin %50 iyileştirildiği gösterilmiştir [7]. Phillips ve diğerlerinin çalışmasında, üç farklı Autosub su altı aracının gövde direncinin değerlendirilmesine odaklanılmıştır. Her biri farklı şekil ve boyutlarda tasarlanmış olan bu su altı araçlarının su altı görevleri sırasında karşılaştığı direnç hesaplanmıştır. Araştırmacılar, HAD yöntemini kullanarak Autosub su altı araçlarının gövdeleri etrafındaki akışı simüle etmiş ve direnç değerlerini doğru bir şekilde hesaplamışlardır. Hesaplanan direnç değerleri, fiziksel testler ve ölçümlerden elde edilen mevcut deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, hesaplanan ve deneysel direnç değerleri arasında olumlu bir uyum seviyesi göstermiştir, bu da HAD yönteminin güvenilirliğini ve

doğruluğunu göstermektedir [8]. Phillips ve diğerlerinin çalışmasında, zamandan bağımsız hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi kullanılarak, Autosub su altı aracı (AUV) için hidrodinamik türevler elde etmek için döner kollu deney ve çekme tankı deneyleri yapılmıştır. Tahminler, yanal kuvvetleri tahmin etmede mükemmel bir uyum göstermiştir, ancak indüklenmiş direnç ve yalpa momentlerinde farklı tahminlerde sapmalar bulunmuştur. Ayrıca, sayısal yöntemler su altı aracının dinamik stabilite sınırlarını deneysel ölçümlere yakın bir şekilde doğru belirlemiştir [9]. Başka bir çalışmada, Phillips ve diğerleri Autosub modelinin direncini ve hidrodinamik katsayılarını hesaplamıştır. Sabit durum koşulları için kullanılan HAD yöntemi, bir torpido tarzındaki Autosub için yatay çekme tankı ve döner kol deneylerini başarıyla tekrarlamak ve sabit durumlu hidrodinamik türevler elde etmek için kullanılmaktadır. Yanal kuvvetin tahmin edilmesinde çok iyi bir uyum sağlanırken, indüklenen direnç ve yalpa momentinin tahminden biraz daha yüksek olduğu bulunmuştur [10].

Joung ve diğerlerinin çalışmasında, Autosub konsept tasarım modeli oluşturulmuş ve ticari bir HAD programı kullanılarak direnç özellikleri değerlendirilmiştir. HAD analizi ile, su altı aracının etrafındaki basınç ve hız dağılımı, ayrıca direnç ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca, çalışma Autosub'a etki eden direnç kuvvetini en aza indirecek şekilde bir tasarım optimizasyonu yapmak için genişletilmiştir. Optimizasyon için yelken ve iletişim vericisinin pozisyonun yanı sıra itici nozulun hücum açısı ile ilgili de çalışmalar gerçekleştirilmiştir. HAD sonuçları, ITTC 1957 korelasyon çizgisiyle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Çalışma, HAD yönteminin karmaşık şekilli su altı araçlarının toplam direncini etkili bir şekilde tahmin edebileceğini göstermiştir [11].

Yakınsama sürecini hızlandırmak için sınır tabakası dahil edilen otomatik bir örgü oluşturma tekniği kullanılmıştır. Nesne fonksiyonunu inceleyerek ve iterasyon süresini değiştirerek önemli ölçüde yakınsama süresinde azalmalar elde edilmiştir. Hassasiyet analiziyle, itici nozulunun hücum açısının direnç kuvveti üzerinde önemli bir etkisi olduğu gösterilmiştir [12]. Sertaç Aslan, yüksek lisans tezinde DARPA Suboff ve Autosub su altı araçlarının hidrodinamik katsayılarını statik sürüklenme ve döner kol hesaplamalarıyla incelemiştir. HAD hesaplamaları gerçekleştirilmiş sayısal olarak ve deneyden elde edilen çıktılar sonucunda uyumlu sonuçlar olduğu görülmüştür [13]. Mustafa Can, yüksek lisans tezinde DARPA

Suboff ve Autosub su altı aracının statik sürükleme katsayılarını hesaplamıştır. Bu araştırmada, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi kullanılmıştır. Statik sürüklenme ve döner kol hesaplamalarıyla ilgili veriler elde edilmiştir. Zamandan bağımsız ve zamana bağlı döner kol hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen hidrodinamik katsayı değerleri, deney sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve değerlerin iyi bir uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir [14]. Büyük bir AUV olan Autosub, Ulusal Oşignografi Merkezi'ndeki bir ekip tarafından Southampton'da geliştirilmiştir. Çalışmalarda farklı Autosub araçları bulunmasına rağmen, bu araştırmada Autosub 3 geometrisi tercih edilmiştir. Tam ölçekli Autosub'un uzunluğu 7 metre, çapı ise 0,9 metredir ve hız aralığı 1-2 m/s olarak belirlenmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı, L/B oranlarının AutoSub'un hidrodinamik özellikleri üzerindeki etkisini sunmaktır. Bu çalışmada, yanal öteleme kuvvetleri ve sapma momentleri incelenmiştir. Farklı L/B oranlarına sahip geometriler için farklı açılarda statik sürüklenme durumları ve farklı ileri hızlara sahip seyir durumları hesaplanmıştır. Uygun bir ağ yapısı ve yapılandırma ayarları kullanmak için bir ağ bağımsızlığı ve doğrulama çalışması yapılmıştır.

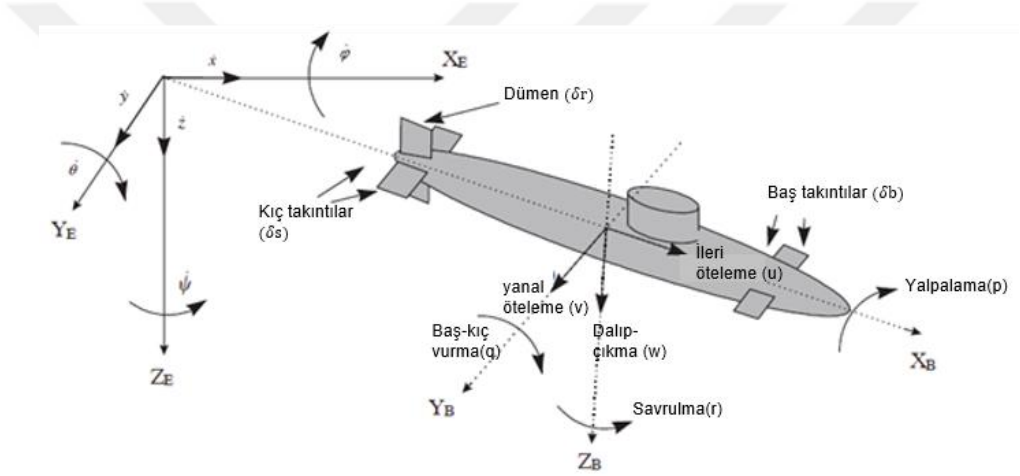
Bu çalışmanın ilk bölümü, hesaplama akışkanlar dinamiği yöntemlerini kullanan ticari bir yazılım olan Star CCM+ ile yapılmıştır. Yazılım kullanılarak 0 ile 2 m/s aralığındaki farklı hızlarda direnç analizleri yapılmıştır, analizler bir doğrulama çalışması yapılması için çözülmüştür. İkinci kısımda, farklı statik sürüklenme açılarında zamandan bağımsız hidrodinamik analizler yapılmıştır. Analizlerde kullanılacak ağ yapısını belirlemek için bir ağ bağımsızlığı çalışması ve belirsizlik analizi yapılmıştır ve bu çalışmada 0, 2, 4, 6, 8 ve 10 derecelik statik sürüklenme açıları kullanılmıştır. Ağ bağımsızlığı çalışması için 6 derecelik statik sürüklenme açısı seçilmiştir. Farklı ağ eleman boyutlarıyla 5 farklı ağ yapısı oluşturulmuştur. Bu 5 analizin sonuçları, Alexander Phillips, Stephen R. Turnock, Maaten Furlong tarafından verilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır [8]. Ağ bağımsızlık çalışması ve belirsizlik analizi sonucunda deneysel sonuçlarla uyumlu sonuçlar veren ağ yapısı seçilmiştir. Seçilen ağ yapısı, diğer statik sürüklenme analizlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde seçilen ağ yapısıyla sürüklenme kuvveti değerleri hesaplanmıştır. Çalışmanın son bölümünde ise

Autosub geometrisinin L/B oranının hidrodinamik kuvvetler ve momentler üzerindeki etkileri sunulmaktadır. Bu nedenle, aynı deplasmana sahip olmalarına rağmen farklı L/B oranlarına sahip olan yeni geometrilerle ağ yapıları oluşturulmuş ve bu ağ yapılarında seçilen ağ bağımsızlık çalışmasındaki ağ eleman boyutu kullanılmıştır. 4 farklı L/B oranına sahip geometri ile 6 farklı statik sürüklenme açısında toplam 24 analiz yapılmıştır. Çalışmanın sonunda L/B oranının Autosub üzerindeki hidrodinamik kuvvetler üzerindeki etkileri incelenmiştir.

2
HİDRODİNAMİK TEORİSİ VE DENKLEMLERİ

2.1 Altı Serbestlik Dereceli Hareketler

Su altı araçları altı serbestlik dereceli hareketi gerçekleştiren sistemlerdir. Doğrusal hareketler olarak adlandırılan üç hareket ileri öteleme, yan öteleme ve dalıp-çıkma hareketidir. Yalpa, baş-kıç vurma, savrulma hareketleri ise açısal hareketler olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2.1'de tipik bir su altı aracı ve onun eksen takımını görebiliriz.



Şekil 2.1 Su altı araçlarının altı serbestlik dereceli hareketleri

2.1.1 Yalpalama (Rolling)

Su altı araçlarının X ekseni etrafında yaptığı rotasyonel hareket yalpalama olarak tanımlanmaktadır. Su altı araçlarının ağırlık merkezi ve su altı hacim merkezi sakin suda yüzerken düşey eksende üst üste gelmektedir. Eğer dalga tepesi su altı aracının sadece sancak tarafına ya da sadece iskele tarafına geliyor ise burada bulunan su altı hacmi artacaktır. Böylece su altı aracının yeni su altı hacim merkezi dalga sancak tarafa geliyorsa sancağa, iskele tarafına geliyorsa iskeleye doğru kayacaktır. Bu yeni su altı hacim merkezi, ağırlık merkezi ile aynı düşeyde olmadığından dolayı kaldıraç görevi görür ve su altı aracının dalganın geldiği tarafın tersine doğru meyil etmesine neden olacaktır [13].

2.1.2 Baş-Kıç Vurma (Pitching)

Su altı aracının Y ekseni etrafında yaptığı rotasyonel harekete baş-kıç vurma hareketi denir. Su altı araçlarının ağırlık merkezi ve su altı hacim merkezi sakin suda yüzerken düşey eksende üst üste gelmektedir. Dalga tepesinin su altı aracının baş tarafına gelmesi ile birlikte baş taraftaki su altı hacmi artar. Bu durumda su altı aracının su altı hacim merkezi baş tarafa doğru kayacaktır. Fakat araç üzerindeki ağırlıklar aynı konumda kalacağından ağırlık merkezinin yeri de aynı kalacaktır. Böylelikle geminin su altı hacim merkezinin yeri ile ağırlık merkezinin yeri aynı düşeyde kalamayacağından su altı hacim merkezinin bulunduğu yer araçta kaldıraç görevi gören bir kuvvet oluşturur. Bu kuvvet sebebi ile araç kıça doğru trim yapar. Dalga tepesi kıça geldiği zaman ise tam tersi bir olay yaşanır ve araç başa doğru trim yapmaya başlar. Bu hareket böyle devam eder ve baş-kıç vurma hareketi olarak tanımlanmaktadır [13].

2.1.3 Savrulma (Yawing)

Su altı aracının Z ekseni etrafında yaptığı rotasyonel hareket savrulma olarak tanımlanmaktadır. Dalga tepesinin su altı aracına sancak baş omuzluktan geldiğinde pruva iskele tarafa doğru dalga yönünde itilecektir. Sancak baş omuzlukta oluşan bir dalga çukuru ise su altı aracının bordasından sancağa doğru kaymasına neden olacaktır. Eğer dalga tepesi iskele baş omuzluktan gelirse de tam tersi bir durum yaşanacaktır [13].

2.1.4 Dalıp Çıkma (Heaving)

Su altı aracının Z ekseninde yapmış olduğu doğrusal hareket dalıp-çıkma hareketi olarak tanımlanmaktadır. Dalıp-çıkma hareketi daha çok havanın kötü olduğu durumlarda gözlemlenmektedir. Büyük bir dalga aracın altına geldiğinde, araç bütün olarak yukarıya kaldırılmış olur. Aracın altına dalga çukuru geldiğinde ise araç bütün bir şekilde aşağı doğru inecektir. Su altı aracının bulunduğu ortamda devamlı dalgalar olduğu sürece doğrusal olarak Z ekseninde salınımı devam edecektir. Yani dalıp-çıkma hareketi yapacaktır [13].

2.1.5 İleri Geri Öteleme (Surging)

Su altı aracının X ekseninde yapmış olduğu doğrusal harekete ileri-geri öteleme ya da boyuna öteleme hareketi denir. Aracın başından veya kıçından aldığı dalga tepeleri aracı dalga yönünde itecektir. Diğer bir yandan aracın başından ya da

kıçından bir dalga çukuru gelmesi halinde araç dalga çukuruna çekilecektir. Dalgaların olması durumunda araç, doğrusal olarak X ekseninde bu salınıma devam edecektir [13].

2.1.6 Yan Öteleme (Swaying)

Su altı aracının Y ekseninde yapmış olduğu doğrusal hareket yan öteleme hareketi olarak tanımlanmaktadır. Aracın sancak tarafındaki bordasından dalga tepesinin gelmesi halinde araç iskele tarafına dalga yönünde itilecektir. Benzer bir şekilde sancak tarafındaki bordada dalga çukuru olması halinde araç çukura doğru çekilecektir. Aracın iskelesindeki bordasından dalga tepesi gelmesi durumda ise tam tersi olaylar gerçekleşecektir. Dalgaların olduğu sürece araç, doğrusal olarak Y eksenindeki salınımına devam edecektir [13].

2.2 Altı Serbestlik Dereceli Hidrodinamik Denklem Setinin Türetilmesi

Hidrodinamik denklem grubu elde edilirken, altı serbestlik derecesini içerdiğinden temelde altı adet değer tanımlanır. Bu değerlerin üçü, X, Y ve Z olarak adlandırılan üç eksen boyunca etkili olan ileri öteleme (surge) , yanal öteleme (sway), savrulma (heave) isimli hidrodinamik kuvvetlerdir. Diğer üç değer ise K, M ve N olarak adlandırılan yuvarlanma (roll), yunuslama (pitch), sapma(yaw) isimli hidrodinamik momentlerdir ve bu momentler üç eksen etrafında etkili olurlar. Ayrıca, bu değerlerin değişimine neden olan hız ifadeleri kullanılır, bu ifadeler doğrusal, açısal ve zamana bağlı olarak tanımlanır. Lineer olmayan etkileri matematiksel olarak tanımlayabilmek için Taylor serisi açılımları kullanılmaktadır. Taylor serisinde, kuvvet ve moment değerleri boyutsuz olarak kullanılmalıdır. Boyutsuzlaştırma işlemi su altı aracının boyunun karesiyle gerçekleştirilir. Bu boyutsuzlaştırılmış kuvvetler, momentler ve hızlar aşağıdaki 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8 denklemleriyle ifade edilmiştir [13].

- ✓ Boyutsuzlaştırılmış kuvvetler

İleri öteleme kuvvetinin boyutsuzlaştırılması:

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

Yanal öteleme kuvvetinin boyutsuzlaştırılması:

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

Savrulma kuvvetinin boyutsuzlaştırılması:

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

- ✓ Boyutsuzlaştırılmış momentler

Yuvarlanma momentinin boyutsuzlaştırılması:

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

Yunuslama momentinin boyutsuzlaştırılması:

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

Sapma Momentinin boyutsuzlaştırılması:

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

- ✓ Boyutsuzlaştırılmış hızlar

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

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

Bu denklemlerde yer alan ρ, su yoğunluğu; l, araç boyu; U, serbest akım hızıdır. Bu serbest akım hızı ve araç boyu Denklem 2.9 ve Denklem 2.10 ile ifade edilir.

$$U = u^2 + v^2 + w^2 \tag{2.9}$$

$$l = u'^2 + v'^2 + w'^2 \tag{2.10}$$

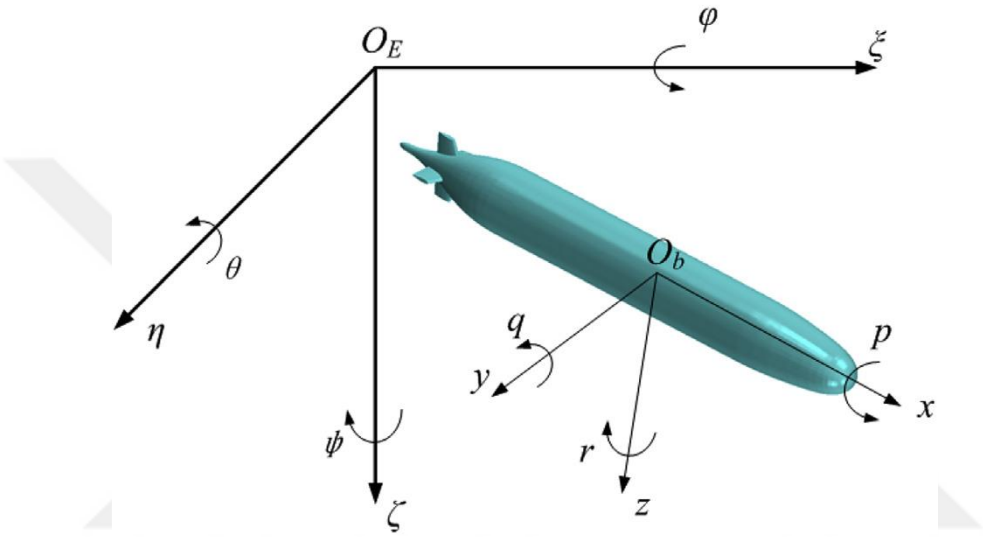
Eğer araç herhangi bir hücum ve sapma açısı yapıyorsa bu açılar, yukarıdaki araç hız bileşenlerine Denklem 2.11, 2.12 ve 2.13'teki gibi etki eder. Burada α açısı +X yönü ile +Z yönü eksenleri arasındaki açıdır. β açısı ise +X yönü ile +Y yönü eksenleri arasındaki açıdır.

$$u = U_0 \cos\beta \cos\alpha \tag{2.11}$$

$$v = U_0 \sin\beta \tag{2.12}$$

$$w = U_0 \cos\beta \sin\alpha \tag{2.13}$$

Bu boyutsuzlaştırma işlemleri ve yapılan diğer çalışmalar sonucunda, hidrodinamik kuvvet ve momentlerin hesaplanmasında kullanılacak denklemler aşağıda sunulmuştur. Bu denklemler Taylor seri açılımlarını içerir ve su altı hesaplamalarında 6 serbestlik dereceli hareket problemlerinde kabul görmüş, standartlaşmış denklemlerdir [14].Şekil 2.2'de su altı araçları için altı serbestlik dereceli hareketler görülmektedir. Denklem 2.14, 2.15, 2.16, 2.17, 2.18 ve 2.19'da su altı aracının hareketleri sonucunda oluşan kuvvet ve momentlerin denklemleri verilmiştir.



Şekil 2.2 Su altı araçları için eksen takımı ve hareketleri

Denklem 2.14, 2.15, 2.16,2.17,2.18 ve 2.19 altı serbestlik dereceli hareketlerin kuvvet ve momentlerin Taylor serisine göre açılımını ifade etmektedir [13].

İleri Öteleme Kuvvet Denklemi: (2.14)

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

$$+ \frac{\rho}{2} l^4 \left[X_{qq}'q^2 + X_{rr}'r^2 + X_{rp}'rp\right]$$

$$+ \frac{\rho}{2} l^3 \left[X_u\dot{u} + X_{vr}'vr + X_{wq}'wq\right]$$

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

$$+ \frac{\rho}{2} l^2 u^2 [X_{\delta e\delta e}'\delta e^2 + X_{\delta r\delta r}'\delta r^2 + X_{\delta a\delta a}'\delta a^2]$$

$$-(W - B)\sin\theta$$

Yanal Öteleme Kuvvet Denklemi: (2.15)

$$m[\dot{v} - wp + ur - Y_G(r^2 + p^2) + Z_G(qr - \dot{p}) + X_G(qp + \dot{r})] =$$

$$+ \frac{\rho}{2} l^4 \left[Y_{\dot{r}}' \dot{r} + Y_{\dot{p}}' \dot{p} + Y_{p|p|}' p|p| + Y_{pq}' pq + Y_{qr}' qr \right]$$

$$+ \frac{\rho}{2} l^3 [Y_{\dot{v}}' \dot{v} + Y_{vq}' vq + Y_{wp}' wp + Y_{wr}' wr]$$

$$+ \frac{\rho}{2} l^3 [Y_r' ur + Y_p' up + Y_{|r|\delta r}' u|r|\delta r + Y_{v|r|}' \frac{v}{|v|} (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} |r|]$$

$$+ \frac{\rho}{2} l^2 [Y_v' uv + Y_{v|v|}' v(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}]$$

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

$$+ (W - B) \cos\theta sin\phi$$

Savrulma Kuvveti Denklemi: (2.16)

$$m[\dot{w} - uq + vp - Z_G(q^2 + p^2) + X_G(rp - \dot{q}) + Y_G(rq + \dot{p})] =$$

$$+ \frac{\rho}{2} l^4 \left[Z_{\dot{q}}' \dot{q} + Z_{pp}' pp^2 + Z_{rr}' rr^2 + Z_{rp}' rp \right]$$

$$+ \frac{\rho}{2} l^3 \left[Z_{\dot{w}}' \dot{w} + Z_{vp}' vp + Z_{vr}' vr \right]$$

$$+ \frac{\rho}{2} l^3 \left[Z_q' uq + Z_{|q|\delta e}' u|q|\delta e + Z_{w|q|}' \frac{w}{|w|} (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} |q| \right]$$

$$+ \frac{\rho}{2} l^2 \left[Z_w' uw + Z_{w|w|}' w(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} \right]$$

$$+ \frac{\rho}{2} l^2 \left[Z_{|w|}' u|w| + Z_{ww}' |w(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}| \right]$$

$$+ \frac{\rho}{2} l^2 [Z_{vv}' v^2 + Z_{\delta e}' u^2 \delta e + Z_{\delta a}' u^2 \delta a]$$

$$+ (W - B) \cos\theta \, cos\emptyset$$

Yuvarlanma Momenti Denklemi*:* (2.17)

$$I_x\dot{p} + (I_z - I_y)qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy}$$

$$+m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur) =$$

$$+ \frac{\rho}{2}l^5\left[K_{\dot{p}}'\dot{p} + K_{\dot{r}}'\dot{r} + K_{p|p|}'p|p| + K_{pq}'pq + K_{qr}'qr\right]$$

$$+\frac{\rho}{2}l^4\left[K_{\dot{v}}'\dot{v} + K_r'ur + K_p'up\right]$$

$$+ \frac{\rho}{2}l^4\left[K_{vq}'vq + K_{wp}'wp + K_{wr}'wr\right]$$

$$+ \frac{\rho}{2}l^3\left[K_v'uv + K_{v|v|}'v(v^2 + \omega^2)^{\frac{1}{2}}\right]$$

$$+ \frac{\rho}{2}l^3[K_{vw}'vw + K_{\delta r}'u^2\delta r + K_{\delta a}'u^2\delta a]$$

$$+(y_GW - y_BB)cos\theta cos\emptyset - (z_GW - z_BB)cos\theta sin\emptyset$$

Yunuslama Momenti Denklemi: (2.18)

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

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

$$+ \frac{\rho}{2}l^5\left[M_{\dot{q}}'\dot{q} + M_{pp}'pp^2 + M_{rr}'rr^2 + M_{rp}'rp + M_{q|q|}'q|q|\right]$$

$$+\frac{\rho}{2}l^4\left[M_{\dot{w}}'\dot{w} + M_{vp}'vp + M_{vr}'vr\right]$$

$$+ \frac{\rho}{2}l^4\left[M_q'uq + M_{|q|\delta e}'u|q|\delta e + M_{w|q|}'\frac{w}{|w|}(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}|q|\right]$$

$$+ \frac{\rho}{2}l^3\left[M_w'uw + M_{w|w|}'w|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}|\right]$$

$$+ \frac{\rho}{2}l^3\left[M_{|w|}'u|w| + M_{ww}'|w(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}|\right]$$

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

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

Sapma Momenti Denklemi : (2.19)

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

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

$$+ \frac{\rho}{2} l^5 \left[N_{\dot{r}}'\dot{r} + N_{\dot{p}}'\dot{p} + N_{r|r|}'r|r| + N_{pq}'pq + M_{qr}'qr\right]$$

$$+ \frac{\rho}{2} l^4 \left[N_{\dot{v}}'\dot{v} + N_{vq}'vq + N_{wp}'wp + N_{wr}'wr\right]$$

$$+ \frac{\rho}{2} l^4 \left[N_r'ur + N_p'up + N_{|r|\delta r}'u|r|\delta r + N_{v|r|}'|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}|r\right]$$

$$+ \frac{\rho}{2} l^3 \left[N_v'uv + N_{v|v|}'v|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}|\right]$$

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

$$+(x_G W - x_B B)cos\theta sin\emptyset - (y_G W - y_B B)sin\theta$$

2.2.1 Hidrostatik Bileşenler

Sudaki bir cisme etki eden en temel kuvvet kaldırma kuvvetidir. Yer çekimi kuvvetinin tersi yönünde olan bu kuvvete hidrostatik kaldırma kuvveti denir. Hidrostatik kaldırma kuvveti cismin su altında kalan hacmi ve suyun yoğunluğuna bağlıdır.

$$Hidrostatik\ Kaldırma\ Kuvveti\ (B) = \rho \cdot \Delta v \cdot g \ ; \quad F_{Kaldırma} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -B \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

$$Ağırlık\ Kuvveti\ (W) = m \cdot g \quad ; \quad F_{Ağırlık} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ W \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

Cismin üzerinde ağırlıktan kaynaklı kuvvet ve kaldırma kuvveti birbirine zıt yöndedir. Su içerisindeki nesnenin yerleşimine bağlı olarak ağırlık ve kaldırma kuvvetleri, araca farklı yönlerde etki eden kuvvet ve dönme etkileri meydana getirebilmektedir. Ağırlık ve kaldırma kuvveti noktasının hidrodinamik moment noktasına olan uzaklığından kaynaklanan kaldırma kuvveti ve ağırlık ifadeleri cisim üzerinde hidrodinamik moment oluşturmaktadır [16].

2.2.2 Hidrodinamik Bileşenler

İçerisinde hareket ettiği akışkan ortamı nedeniyle su altı araçları farklı dinamik özellikler gösterir. Hidrodinamik denklem setlerini oluşturan hidrodinamik katsayılar iki gruptan oluşmaktadır [13].

1. Statik hidrodinamik katsayılar
2. Dinamik hidrodinamik katsayılar
    a. Lineer manevra katsayıları
    b. Lineer olmayan manevra katsayıları
    c. Bileşik manevra katsayıları
    d. Ek su ataleti katsayıları

2.2.2.1 Statik Hidrodinamik Katsayılar

Su altı aracının doğrusal bir hızla ilerlediği durumlarda gözlemlenmeyen herhangi bir manevra hareketinden kaynaklanan katsayılara statik hidrodinamik katsayılar denir. Bu katsayıların oluşmasını sağlayan etkiler, manevra kaynaklı değil, hücum açıları ve kontrol yüzeylerinin sapma açılarına bağlıdır. Bu nedenle, bu katsayılar statik katsayılar olarak adlandırılır.

Statik katsayılar, doğrusal hızda ilerleyen aracın hücum ve sapma açılarıyla ilişkili olarak üç eksen boyunca oluşan kuvvet ve moment değerlerinin, doğrusal hızlara ve kontrol yüzeyi sapma açılarına göre türevlerinin boyutsuzlaştırılmasıyla elde edilir. Bu boyutsuzlaştırma işlemi Denklem 2.22'de gösterilmektedir [13].

X_{uu}=x ekseninde meydana gelen herhangi bir hidrodinamik kuvvet

X'_{uu}= x ekseninde meydana gelen herhangi bir hidrodinamik kuvvetin boyutsuz hali

$$X_{uu} = \frac{\partial^2 X}{\partial u \partial u}\ 1 \ \rightarrow\ X = X_{uu}u^2 \ \ \rightarrow\ \ X\left(X'_{uu}\frac{1}{2}\rho l^2\right)u^2 \ \rightarrow\ X'_{uu} = \frac{x}{\frac{1}{2}\rho u^2 l^2} \quad (2.22)$$

Kuvvetin boyutsuzlaştırılması Denklem 2.18'de gösterilmişti, aynı şekilde bir eksen etrafındaki moment değeri de boyutsuzlaştırılır. Araç, hücum açısı ve ufki dümen sapma açısıyla seyir yapıyorsa yunuslama momenti oluşur. Ayrıca, hücum açısı nedeniyle u ve w doğrusal hızları ortaya çıkar. Bu hızlar Denklem 2.23 ve 2.24'te olduğu gibi hesaplanır. Bu hız bileşenleri kullanılarak moment denklemi Denklem 2.25'te olduğu gibi boyutsuzlaştırılır.

$$u = U_0 \cos\alpha \quad (2.23)$$

$$w = U_0 \sin\alpha \tag{2.24}$$

$$M_w = \frac{\partial M}{\partial w} \;\rightarrow\; M = M_w w \;\rightarrow\; M\left(M'_w w \frac{1}{2}\rho l^3\right)u \;\rightarrow\; M'_w = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho u w l^3} \tag{2.25}$$

Eğer aracın kontrol yüzeyleri sapma açısına sahip ise aşağıdaki Denklem (2.26)'deki gibi ek bir katsayı daha oluşacaktır.

$$M\left(M'_{\delta_e}\frac{1}{2}\rho l^3\right)u^2 \;\rightarrow\; M'_{\delta_e} = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho u^2 l^3} \tag{2.26}$$

Böylelikle, hücum açısı ve sapma açısının var olduğu durumda oluşan yunuslama momenti hesaplanması için gerekli olan katsayılar bulunmuş olur.

2.2.2.2 Dinamik Hidrodinamik Katsayılar

Statik hidrodinamik katsayıların tersine dinamik hidrodinamik katsayılar, araç manevralı ve ivmeli bir hareket yaptığında oluşur. Dinamik hidrodinamik katsayılar dört gruptan oluşmaktadır.

a) Lineer manevra katsayıları
b) Lineer olmayan manevra katsayıları
c) Bileşik manevra katsayıları
d) Ek su ve ataleti katsayıları

- **Lineer Manevra Katsayıları**

Lineer manevra katsayıları, su altı aracının altı serbestlik derecesindeki manevralı hareketleri sırasında meydana gelen kuvvet ve momentlerin, aynı manevra hareketinde meydana gelen doğrusal ve açısal hızlara bağlı türevlerinden oluşur.

Manevra sırasında, su altı aracı üzerinde en belirgin kuvvetler dalma kuvveti ve yunuslama momentidir. q açısal hızı ile yunuslama hareketi yapan bir su altı aracı için, bu katsayılar aşağıda verilen Denklem 2.27, 2.28 ve 2.29'da görüldüğü gibi elde edilir [13].

- $M = \left(M'_q q \frac{1}{2}\rho l^4\right)u \quad \rightarrow \quad M'_q = \frac{M}{\left(\frac{1}{2}\rho q u l^4\right)}$ (2.27)
- $N = \left(N'_q q \frac{1}{2}\rho l^3\right)u \quad \rightarrow \quad N'_q = \frac{M}{\left(\frac{1}{2}\rho q u l^3\right)}$ (2.28)
- $M = \left(M'_{q\delta e}\delta e \frac{1}{2}\rho l^4\right)u \quad \rightarrow \quad M'_{q\delta e} = \frac{M}{\left(\frac{1}{2}\rho q \delta e u l^4\right)}$ (2.29)

- **Lineer Olmayan Manevra Katsayıları**

Lineer manevra katsayılarının 2. dereceden türevlerinden oluşan katsayılara lineer olmayan manevra katsayıları denir. Ancak su altı araçlarının dinamiğine bakıldığında, tüm lineer manevra katsayılarının 2. dereceden türevleri için bu tanım doğru olmayabilir.

Ayrıca, manevra esnasında meydana gelen kuvvet ve momentlerin genellikle 2. dereceden türevleri mevcuttur. Yunuslama momentinden kaynaklanan lineer olmayan manevra katsayıları Denklem 2.30, 2.31, 2.32 ve 2.33'te verilmiştir.

$$M = \left(M'_{qq} qq \frac{1}{2}\rho l^5\right) \quad \rightarrow \quad M'_{qq} = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho qq l^5} \tag{2.30}$$

$$M = \left(M'_{rr} rr \frac{1}{2}\rho l^5\right) \quad \rightarrow \quad M'_{rr} = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho rr l^5} \tag{2.31}$$

$$M = \left(M'_{pp} pp \frac{1}{2}\rho l^5\right) \quad \rightarrow \quad M'_{pp} = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho pp l^5} \tag{2.32}$$

$$M = \left(M'_{ww} ww \frac{1}{2}\rho l^4\right) \quad \rightarrow \quad M'_{ww} = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho ww l^4} \tag{2.33}$$

- **Akuple Manevra Katsayıları**

Su altı aracı sistemleri her zaman tek bir etki altında manevra yapmazlar; manevraların birlikte görüldüğü durumlarda akuple manevra katsayıları oluşur. Farklı manevraların yol açtığı iki doğrusal hız, iki açısal hız veya bir doğrusal ve bir açısal hız aynı anda sisteme etki edebilir. Bu durum genellikle yuvarlanma hareketi yanında yunuslama veya sapma hareketinin oluşmasında gözlemlenir. Su altı araçları genellikle dönmek için yuvarlanma hareketine zorlanırlar. Bu durumda yuvarlanma açısal hızı (p) ile sapma (r) veya yunuslama (q) açısal hızı birlikte etki eder. Bu durum M_{rp} katsayısını ortaya çıkarır [13].

Aracın bir düzlemdeki hareketi başka bir düzlemdeki hareketini etkileyebilir. Örneğin, yunuslama ve sapma hareketlerinin aynı anda görüldüğü durumlarda N_{qr} ve K_{qr} gibi katsayılar oluşur. Bu üç katsayı Denklem 2.34, 2.35 ve 2.36'da verilmiştir.

$$M = \left(M'_{wq} wq \frac{1}{2}\rho l^4\right) \quad \rightarrow \quad M'_{wq} = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho qq l^4} \tag{2.34}$$

$$M = \left(M'_{rp} rp \frac{1}{2}\rho l^5\right) \quad \rightarrow \quad M'_{rp} = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho rpl^5} \tag{2.35}$$

$$N = \left(M'_{qr} qr \frac{1}{2}\rho l^5\right) \quad \rightarrow \quad N'_{qr} = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho qrl^5} \tag{2.36}$$

Sonuç olarak, birçok hareketin birleşmesiyle oluşan akuple manevra katsayıları, su altı ortamlarının hidrodinamik modellemesini simülasyon ortamında zorlaştırmaktadır. Bu durum su altı test mekanizmalarına olan ihtiyacı artırmaktadır, çünkü akuple manevra katsayıları düzlemsel hareket mekanizması test yöntemiyle kolayca hesaplanmaktadır.

- **Ek Su Kütlesi ve Ataleti Katsayıları**

Ek su kütlesi, ivmeli hareket halindeki su altı aracının, suyun viskoz kuvvetleri nedeniyle beraberinde hareketlendirdiği su kütlesi olarak tanımlanabilir. Bu durum, hareket problemlerinde önemli bir yer tutar, çünkü su altı aracı ilerlerken bir kütleye de hareket kazandırdığından artık bu toplam kütle bir sistem oluşturmuştur. İncelenecek olan hareket de bu yeni sistem üzerinden yapılmalıdır. Ek kütle, su altı aracının ivmesiyle orantılıdır ve kendisini su altı aracına etki eden basınç olarak gösterir. Bu basınç değeri kuvvetlerde ve momentlerde değişime sebep olur. Bu nedenle, sabit hızda seyreden bir su altı aracında bu etkinin oluşmadığı, ivmeli bir hareket olduğunda ise bu etkilerin ortaya çıktığı anlaşılmalıdır [13]. Su altı yeterince derinde seyrediyorsa, su yüzeyinde dalgalanmanın olmadığı ve ek kütle katsayılarının sabit olduğu kabul edilebilir. Bu kabul ile ek kütle matrisi aşağıdaki Denklem 2.37'de olduğu gibi yazılır.

$$M_A = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & X_{\dot{v}} & X_{\dot{w}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{u}} & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{w}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & Z_{\dot{v}} & Z_{\dot{w}} & Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\dot{u}} & K_{\dot{v}} & K_{\dot{w}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & M_{\dot{v}} & M_{\dot{w}} & M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{v}} & N_{\dot{w}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \tag{2.37}$$

Su altı araçlarında ek kütle matrisi her zaman pozitif ve matris elemanları, diyagonal elemanlardan çok daha küçüktür. Bu nedenle, birçok problemden bu küçük katsayılar ihmal edilerek sadece diyagonal elemanlar kullanılır. Bu ihmal yapılarak sadeleştirme yapıldığında, yeni ek kütle matrisi aşağıdaki Denklem 2.38'de olduğu gibi yazılır.

$$M_A = -diag[X_{\dot{u}} \quad Y_{\dot{v}} \quad Z_{\dot{w}} \quad K_{\dot{p}} \quad M_{\dot{q}} \quad N_{\dot{r}}] \tag{2.38}$$

Ek su kütlesi dahil edilecek problemlerde, bu diyagonal matris elemanları olan katsayıların hesaplanması ve işlemlere dahil edilmesi gerekmektedir.

3
METODOLOJİ

3.1 Ana Denklemler

Bu problemin modellenmesinde kullanılacak denklemler Navier-Stokes denklemleridir.

Navier-Stokes denklemleri süreklilik ve hareket denklemlerinden meydana gelen akışkanlar mekaniğinin temelini oluşturan denklemlerdir. Bu denklemler kütlenin, enerjinin ve momentumun korunumunun matematiksel gösterimleridir. Bu denklemlere göre, momentumdaki değişim akışkan parçacıklarının üzerinde etki eden kuvvetlerin toplamına eşittir [15]. Star CCM+ tüm akış problemleri için kütle ve momentum korunum denklemlerini çözer.

- Kütlenin korunumu denklemi:

Kütlenin korunumu denklemi süreklilik denklemi olarak da bilinmektedir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla.\left(\rho \vec{U}\right) = S_m \tag{3.1}$$

$$\vec{U} = \text{hız vektörü}, \qquad \rho = \text{yoğunluk}, \qquad \text{t} = \text{zaman}$$

Denklem 3.1 olarak ifade edilen denklem kütle korunumu denkleminin en genel halidir. Hem sıkıştırılabilir hem de sıkıştırılamaz akışlar için geçerlidir. Eğer çözmek istediğimiz problem zamana bağlı değil ve akışkanımız sıkıştırılamaz ise, zaman türevleri ve ρ sıfıra eşittir. Bu tez kapsamındaki problemde zamandan bağımsız ve akış sıkıştırılamaz olduğundan 3.1' deki denklem 3.2' deki denkleme dönüşür.

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

- Momentum korunumu denklemleri:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla.(\rho u U) = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f x \tag{3.3}$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla.(\rho v U) = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f y \tag{3.4}$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla.(\rho w U) = -\frac{\partial \rho}{\partial w} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f z \quad (3.5)$$

Denklem 3.3, 3.4 ve 3.5'te momentum korunum denklemlerini görebiliriz. Akış sıkıştırılamaz, akışkanın Newtonyen ve viskoziten akış boyunca sabit olduğu kabul edilirse denklem 3.6'da olduğu gibi denklemler aşağıdaki denklem 3.7, 3.8 ve 3.9'daki formlara dönüşmektedir.

$$\nabla.U = 0 \quad (3.6)$$

$$\frac{\rho Du}{Dt} = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \mu \nabla^2 u + \rho.fx \quad (3.7)$$

$$\frac{\rho Dv}{Dt} = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \mu \nabla^2 v + \rho.fy \quad (3.8)$$

$$\frac{\rho Dw}{Dt} = -\frac{\partial \rho}{\partial z} + \mu \nabla^2 w + \rho.fz \quad (3.9)$$

Böylelikle süreklilik ve momentum denklemleri enerji denkleminden ayrılmıştır. Sıkıştırılamaz akış için hız ve basınç alanlarının çözülmesi, denklemi çözmektedir

3.2 RANS Denklemleri (Reynolds Averaged Navier-Stokes)

Gerçek akışkanların yapmış olduğu hareket sonucunda Reynolds sayısına göre laminer veya türbülanslı akım oluşabilmektedir. Türbülanslı akımın yapısı karmaşık olduğu için Navier-Stokes denklemleri ile doğrudan çözülmesi zordur. Türbülanslı akım alanında herhangi bir noktada hız ve basınç gibi akım parametrelerinin şiddeti ve yönü zamana bağlı düzensiz olarak değişmektedir [16]. Buna göre hız ve basıncın herhangi bir andaki değeri ortalama ve anlık sapmaların toplamı denklem 3.10'daki şekli ile yazılabilir:

$$u = \bar{u} + u' \qquad v = \bar{v} + v' \qquad w = \overline{w} + w' \quad (3.10)$$

Burada $\bar{u}, \bar{v}, \overline{w}$ hız ve basınca ait ortalama değerleri, u', v', w' ise ortalama değerlere ait anlık sapmaları belirtmektedir. Denklem 4.6' da verilen u, v, w değerlerini süreklilik denkleminde yerine yazacak olursak denklem 3.11'i elde edebiliriz;

$$\frac{\partial}{\partial x}\overline{(u} + u') + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v} + v') + \frac{\partial}{\partial z}(\overline{w} + w') = 0 \quad (3.11)$$

Denklemlerde gerekli düzenlemeler yapıldığı koşulda denklem 3.12, 3.13 ve 3.14'teki gibi zaman ortalamalı Navier-Stokes denklemleri bulunur.

$$\rho\left(\frac{\overline{\partial u}}{\partial t}+\bar{u}\frac{\overline{\partial u}}{\partial x}+\bar{v}\frac{\overline{\partial u}}{\partial y}+\bar{w}\frac{\overline{\partial u}}{\partial z}\right) = fx-\frac{\overline{\partial_P}}{\partial x}+\mu\nabla\bar{u}-\rho\left(\frac{\overline{\partial u'u'}}{\partial x}+\frac{\overline{\partial u'v'}}{\partial y}+\frac{\overline{\partial u'\omega'}}{\partial z}\right) \quad (3.12)$$

$$\rho\left(\frac{\overline{\partial v}}{\partial t}+\bar{u}\frac{\overline{\partial v}}{\partial x}+\bar{v}\frac{\overline{\partial v}}{\partial y}+\bar{w}\frac{\overline{\partial v}}{\partial z}\right) = fy-\frac{\overline{\partial_P}}{\partial y}+\mu\nabla\bar{v}-\rho\left(\frac{\overline{\partial v'u'}}{\partial x}+\frac{\overline{\partial v'v'}}{\partial y}+\frac{\overline{\partial v'\omega'}}{\partial z}\right) \quad (3.13)$$

$$\rho\left(\frac{\overline{\partial w}}{\partial t}+\bar{u}\frac{\overline{\partial w}}{\partial x}+\bar{v}\frac{\overline{\partial w}}{\partial y}+\bar{w}\frac{\overline{\partial w}}{\partial z}\right) = fz-\frac{\overline{\partial_P}}{\partial z}+\mu\nabla\bar{w}-\rho\left(\frac{\overline{\partial w'u'}}{\partial x}+\frac{\overline{\partial w'v'}}{\partial y}+\frac{\overline{\partial w'\omega'}}{\partial z}\right) \quad (3.14)$$

3.3 Türbülans Modeli

K-ω modeli en çok tercih edilen türbülans modellerinden birisidir. Bu model akışın türbülans özelliklerini daha iyi tanımlayabilmek için 2 tane taşınım denklemi kullanır. Bu 2 denklemli model taşınımı ve dağılma etkilerinin hesaba katılmasını sağlar. İlk taşınım değişkeni kinetik enerjiyi tanımlayan k sembolü ile gösterilen değişkendir. İkincisi ise ω sembolü ile gösterilen spesifik dağılma oranı değişkenidir. Bu değişken türbülansın boyutunu tanımlar. Bu problemde "k-ω SST" modeli tercih edildi. K-ω SST modeli, sınır tabakayı modellemek için girdap viskozitesi yaklaşımını kullanır. Böylelikle sınır tabakadaki kesme kuvvetleri daha doğru bir şekilde denklemlere katılmış olur [16].

Denklem 3.15 ve 3.16'daki gibi taşınım denklemleri ve denklem 3.17'deki gibi girdap viskozitesi formülü aşağıdaki gibi verilebilir:

Türbülans Kinetik Enerjisi:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial k_j} = Pk - \beta^* k\omega \frac{\partial}{\partial x_j}\left((v + v_t\sigma_k)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right) \tag{3.15}$$

Spesifik Dağılma Oranı:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial k_j} = \alpha S^2 - \beta\omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j}\left((v + v_t\sigma_\omega)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + 2(1 - F_1)\sigma\omega^2 \frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial xi}\frac{\omega}{\partial xi} \tag{3.16}$$

Kinematik Girdap Viskozitesi:

$$v_T = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1\omega, SF_2)} \tag{3.17}$$

3.4 Duvar Fonksiyonları

Katı cisimlerin yakınlarında, gradyanların çok geniş olmasından dolayı akış özelliklerinin çözümlenmesi zordur. Yüksek Reynolds sayılarındaki akışlarda, sınır tabakayı doğru bir şekilde modellemek için çok sayıda küçük hücreye ihtiyaç vardır. Bu, hesaplama yükünü arttıran önemli bir etkendir. Hesaplamayı kolaylaştırmak için bu hücre yaklaşımı yerine, duvar fonksiyonları kullanılabilinir. Aşağıdaki formüller duvar formüllerini ifade etmektedir. Genel olarak, yüksek y+ durumlarında duvar fonksiyonları kullanılırken düşük y+ değerlerinde akışının düşük Reynolds sayılı bir lamine akış olduğu varsayılmaktadır. Tüm y+ yaklaşımında ise ortak bir g katsayısı oluşturulmaktadır. Bu g sayısı denklem 3.18'de ve lokal Reynold sayısı denklem 3.19 ile hesaplanmaktadır.

$$g = \exp\left(-\frac{Re_y}{11}\right) \tag{3.18}$$

$$Re_y = \sqrt{\frac{ky}{v}} \tag{3.19}$$

3.5 Sonlu Hacimler Yöntemi

Sayısal modellemenin yapılabilmesi için kısmi diferansiyel denklemler sonlu hacimler yöntemi ile çözülür. Kısaca akım alanı küçük kontrol hacimlerine bölünür. Denklemler bu hacimler için çözülür. Komşu hacimlerdeki koşullar akımın

hacimden hacme nasıl değişeceğini belirler. Sonlu hacimler yöntemiyle yoğunluk, basınç ve diğer bilinmeyen alanlar, zaman akış hacminde çözülebilir [17].
Genel taşınım denklemleri integral formunda denklem 3.20'de aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\int_S \rho \emptyset V . ndS = \int_S F \nabla \emptyset . ndS + \int_\Omega q_\emptyset d\Omega \quad (3.20)$$

3.6 Çözüm Algoritması

Akuple akış modeline göre kütlenin, momentumun ve enerjinin korunumu denklemleri aynı anda çözülmektedir. Akış zamandan bağımsız olduğu için herhangi bir zaman adımı belirlemek gerektirmemektedir. Çözüm süresi ile hücre sayısı arasında lineer bir ilişki olduğu için, çözüm ağ yapısının kalitesinden çok etkilenmemektedir.

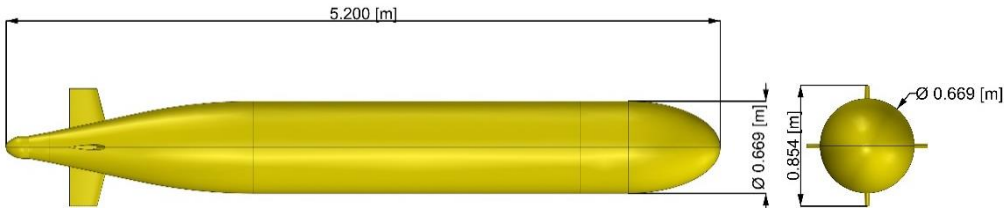
4
NÜMERİK HESAPLAMALAR

4.1 Autosub Su Altı Aracı Modeli

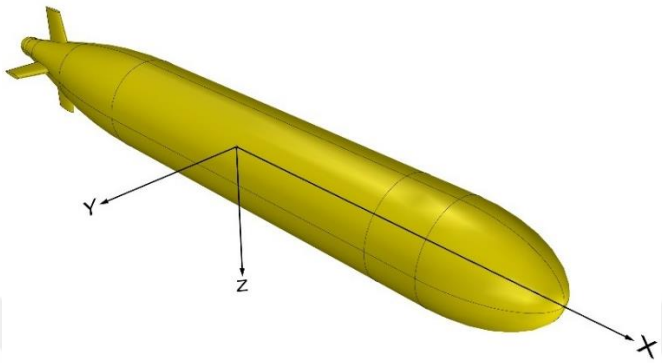
Otonom su altı aracı modeli Autosub, geçmişten günümüze kadar gelişmiştir. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, Wormley'deki Ulusal Okyanusografya Merkezi (NOC), otonom su altı araçları için bilimsel uygulamalar geliştirmek amacıyla bir program başlatmıştır. Farklı amaçlara yönelik olarak tasarlanmış olan Autosub su altı aracı, birden fazla geometriye sahiptir. Autosub aracının yaklaşık olarak 7 metre uzunluğunda ve 0,9 metre çapında olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada kullanılacak Autosub modeli 3/4 ölçeğinde Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de görüldüğü gibi tasarlanmıştır. Autosub modelinin geometrik özellikleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1 Autosub Su Altı Aracı Modeli Geometrik Özellikleri

L_{OA}	5.2 m
D	0.669 m
L_N	1.022 m
Burun Şekli	Eliptik
L_B	2.020 m
S_B	0.352 m^2
L_{AFT}	1.799 m
CG_N	2.310 m
B_T	0.854 m
c	0.200 m
Tarama Açısı (Ön Kenar)	14.40°
Tarama Açısı (Arka Kenar)	0°
Kuyruk Kanat Profili	NACA0015



Şekil 4.1 Autosub geometisinin üst ve arkadan görünüşü



Şekil 4.2 Autosub geometrisinin perspektif görünüşü

4.2 Statik Sürüklenme Koşulunun İncelenmesi

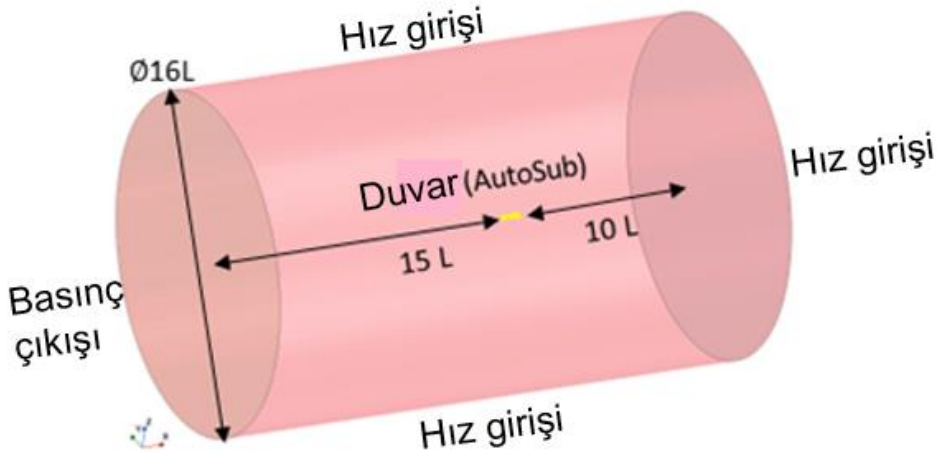
4.2.1 Ağ Bağımsızlığı Çalışması

Ana hedef, yapılan analizlerin makul bir hata düzeyiyle hesaplamalar sağlamasını ve aynı zamanda hesaplama maliyetini azaltmak için eleman sayısını en aza indirecek bir çözüm ağ yapısı oluşturmaktı. Bu hedefe ulaşabilmek adına, öncelikle bir ağ bağımsızlık çalışması gerçekleştirildi. Bu çalışmanın temelini, Autosub su altı aracı için mevcut olan deneysel veriler oluşturdu. Deneysel sonuçlar, ağ bağımsızlık analizlerinde bir parametre olarak da kullanıldı. Bu şekilde, hesaplamalarda doğru ve güvenilir sonuçlar elde etmek amacıyla deneysel verilerin, ağ yapısı üzerindeki bağımlılığı ve etkisini anlamak için detaylı bir inceleme yapıldı.

4.2.2 Akış Hacmi ve Sınır Koşullarının Belirlenmesi

Sınır koşulları için oluşturulan silindirik formdaki geometrinin boyutları Şekil 4.3'te belirtilmektedir. Akış hacmi, su altı aracı boyu (L) olarak tanımlandığında 10L kadar ki mesafe ön tarafta, 15L kadar arka tarafta ve silindirin çapı su altı aracının boyunun 16 katı olacak şekilde oluşturulmuştur. Oluşturulan bu silindirik akış hacminin ön yüzeyinde ve yan yüzeylerinde hız girişi tanımlanmıştır. Arka yüzey de ise 0 Pa basınç değeri olacak şekilde basınç çıkışı tanımlanarak sınır

koşulları belirlenmiştir. Her sürüklenme açısı için bir hız vektörü tanımlanmakta ve hız giriş yüzeylerine atanmaktadır. Akış hacminin oluşumu ve sınır koşullarının belirlenmesi işlemi Star CCM+ programında yapılmıştır.



Şekil 4.3 Statik sürüklenme testi için sınır koşulları

4.2.3 Fizik Modeli

Tüm hesaplamalarda kararlı durum RANS denklemleri kullanılmıştır. Yapılan analiz çalışmalarında Star CCM+ ticari yazılımı kullanılmıştır. Analizlerde duvar fonksiyonları kullanılarak sınır tabaka içerisindeki viskoz etkiler elde edilmiştir. K-w SST türbülans modelinin kullanıldığı analizlerde, 30<y+<300 koşulunu sağlayacak şekilde ilk katman kalınlığı oluşturulmuştur. Katman kalınlığı hesabı Denklem 4.1'de verildiği gibi Reynolds sayısına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Y+ değerini elde etmek için toplamda 10 katman oluşturulmuştur. İlk katmanın kalınlığını hesaplamak için Denklem 4.2 kullanılmıştır [8].

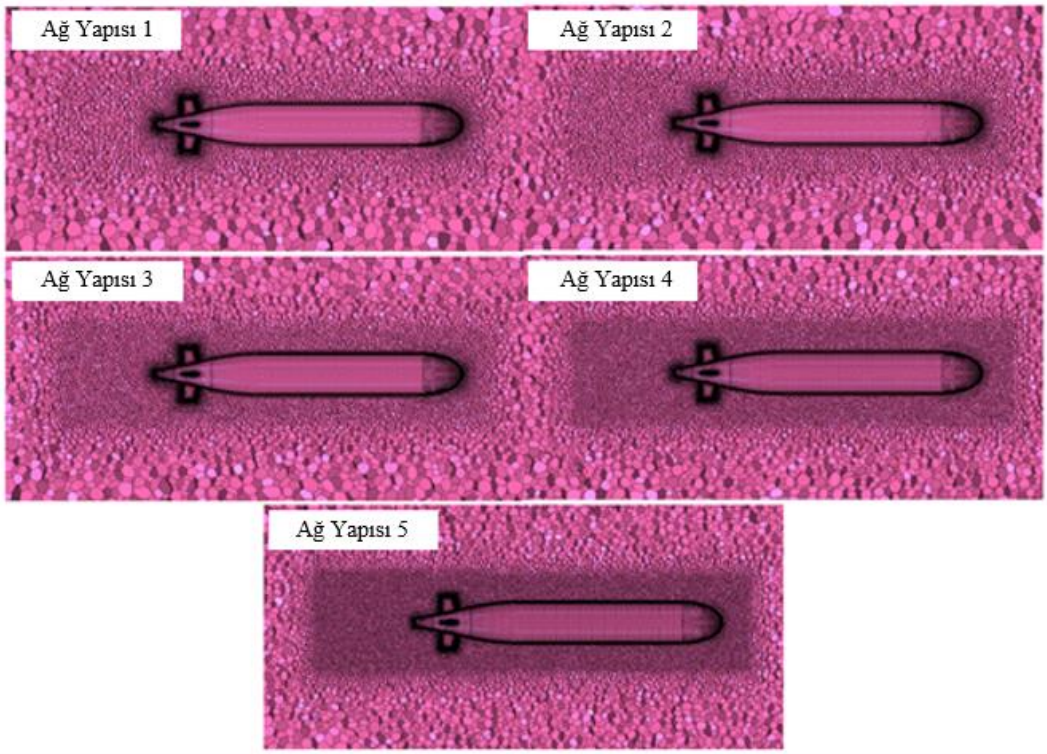
$$\Delta y = L\Delta y^{+}\sqrt{80}R_n^{-13/14} \tag{4.1}$$

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

4.2.4 Statik Sürüklenme Testi için Oluşturulan Çözüm Ağı

Bu çalışmada değişen eleman sayılarına sahip beş farklı ağ boyutu oluşturulmuştur. Şekil 4.4'te Autosub su altı aracı modelinin yüzey ağları gösterilmiştir. Ağ boyutu sayısı ITTC (Uluslararası Çekme Tankı Konferansı) yönergeleri tarafından önerildiği gibi $\sqrt{2}$ oranında bir artışı takip etmektedir [11].

Ağın Autosub modeline yakın sıklaştırıldığı gözlemlenebilir. Bu iyileştirme, modele yakın akış bölgesini daha iyi çözümlemeyi ve bu alanda daha doğru analiz yapılmasını amaçlamaktadır.



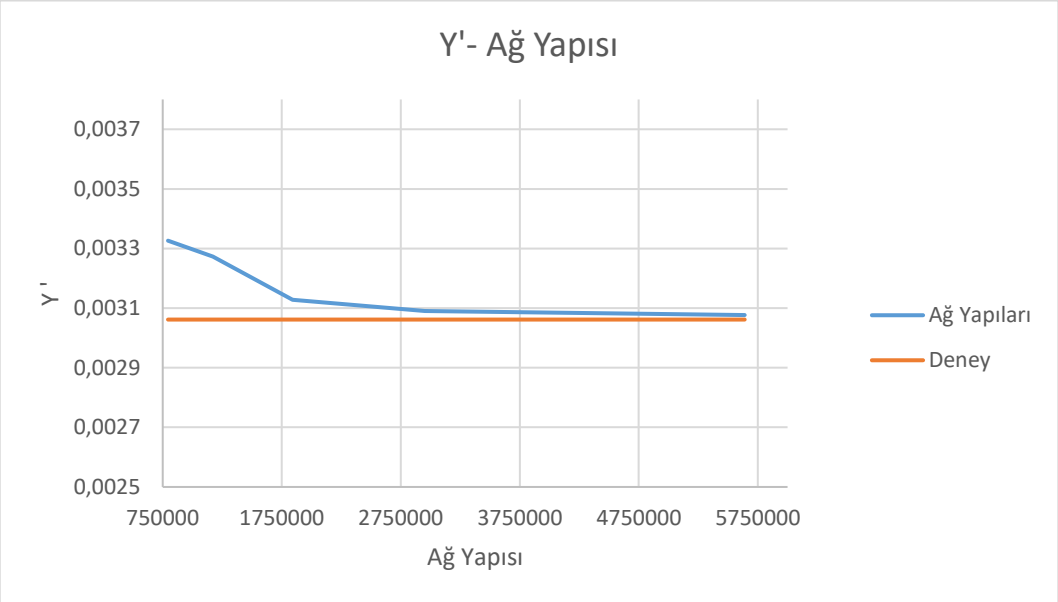
Şekil 4.4 Ağ yapıları

4.2.5 Belirsizlik Analizi

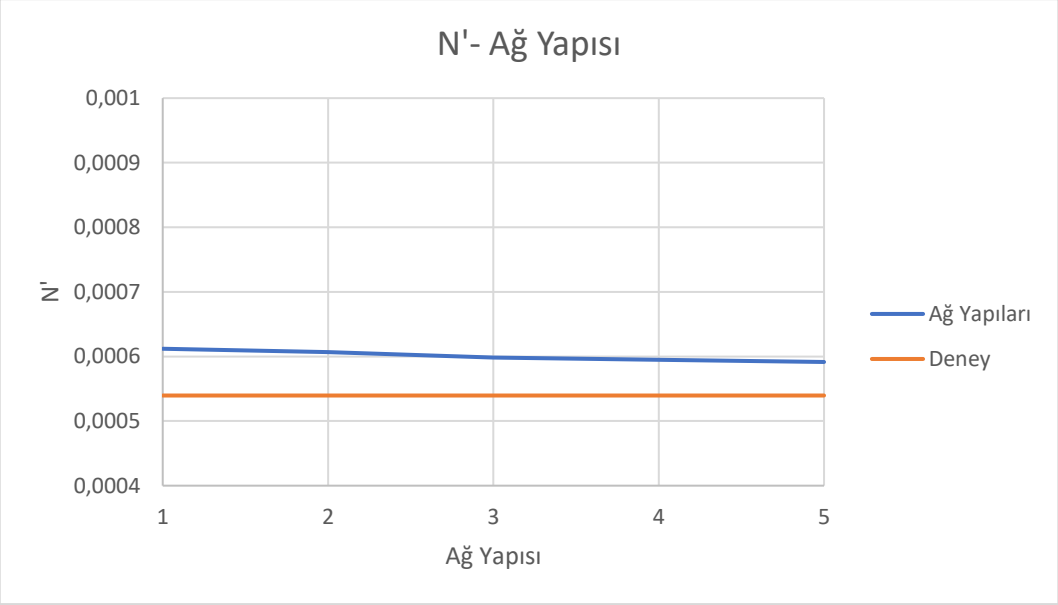
Ağ yapısının doğrulanmasında Grid Yakınsama İndeksi (GCI) olarak bilinen yöntem kullanılmıştır. 6^{o} sürüklenme açısına sahip senaryo için belirsizlik analizi yapılmıştır. Hız vektörü 6^{o}'lik açıya göre hesaplanmıştır. Tablo 4.2'de kullanılan ağ yapıları için eleman sayıları ve sonuçları belirtilmiştir. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da statik sürüklenme durumu için kuvvet ve moment grafikleri verilmiştir. Analizler, 4 çekirdekli bir işlemci kullanan Windows işletim sistemi üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.2 6º Statik Sürüklenme Sonuçları

	Eleman Sayısı	Y	Y'	N	N'	Hata (%) Y'	Hata (%) N'
Deney [8]	-	298,9826	0,003062	274,0047	0,00054	-	-
Ağ Yapısı 1	794489	324,8269	0,003326	310,7741	0,000612	8,6441	13,4193
Ağ Yapısı 2	1170857	319,5991	0,003273	308,1391	0,000607	6,8956	12,4576
Ağ Yapısı 3	1841095	305,4607	0,003128	301,9573	0,000595	2,1667	10,2015
Ağ Yapısı 4	2952064	301,7904	0,00309	302,1399	0,000595	0,9391	10,2682
Ağ Yapısı 5	5639856	300,4577	0,00307	300,3557	0,000591	0,4934	9,6169



Şekil 4.5 6º Statik sürüklenme için yanal öteleme kuvveti (Y')



Şekil 4.6 6º Statik sürüklenme için sapma momenti (N')

Roache çalışmasında Grid Convergence Index (GCI) yöntemini sunmuştur [18]. Pek çok farklı yöntem olmakla birlikte bu yöntem, HAD çalışmalarının önemli alanlarından biri olan ağ iyileştirmeye odaklanmaktadır. Ağ iyileştirme çalışmalarındaki karmaşıklığı azaltmak için sunulan bu yöntem, birçok farklı çalışmada kullanılmış ve araştırmacılar tarafından kabul görmüştür. Bahsedilen yöntem Çelik ve ekibi tarafından düzenlenerek tekrar sunulmuştur [19]. Bu çalışmada GCI'nın bu düzenlenmiş yöntemi şu şekilde kullanılmıştır.

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

Denklem 4.3'te N hücre sayısını ve V_i hücrenin hacmini temsil etmektedir. Ağ iyileştirme faktörü Denklem 4.4 ile bulunmaktadır. h_1, h_2 ve h_3 sırasıyla ince, orta ve kaba ağ yapılarını temsil etmektedir.

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

İnce ve orta arasındaki inceltme faktörü hesaplandıktan sonra orta ve kaba Denklem 4.5'te p olan görünür sıra hesaplanmaktadır.

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

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

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

$$\varepsilon_{32} = \phi_3 - \phi_2 \; ; \; \varepsilon_{21} = \phi_2 - \phi_1 \tag{4.8}$$

ϕ_k, k'inci karenin çözümüdür. Bu, yanal öteleme kuvveti gibi bir çözümden skaler bir değer olarak seçilebilir. Denklem 4.8 yardımıyla ε_{21}ve ε_{32} hesaplanmış ve bu parametreler Denklem 4.7'deki s değerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. S'nin negatif değeri salınımlı yakınsaklık anlamına gelir. Görünür sıra p, Denklem 4.5 ve Denklem 4.6 yardımıyla hesaplanmıştır. Denklem 4.5'te görüldüğü gibi p denkleminde p'ye bağlı bir fonksiyon vardır ki o da q(p)'dir. Bu nedenle p hesaplanırken ilk tahmin yapılmış ve iteratif olarak p bulunmuştur.

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

Yakınsama faktörü R, Denklem 4.9 yardımıyla elde edilmektedir.

$$\phi_{ext}^{21} = \frac{\left(r_{21}^{p} \phi_1 - \phi_2 \right)}{r_{21}^{p} - 1} \tag{4.10}$$

Denklem 4.10'daki ϕ_{ext}^{21} seçilen ϕ'nin ekstrapole edilmiş skaler değeridir.

$$e_a^{21} = \left| \frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1} \right| \tag{4.11}$$

$$e_{ext}^{21} = \left| \frac{\phi_{ext}^{21} - \phi_1}{\phi_{ext}^{21}} \right| \tag{4.12}$$

Denklem 4.11'den e_a^{21} yaklaşık hata, denklem 4.12'den e_{ext}^{21} ise tahmin hatası hesaplanabilir.

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

Sonuç olarak Ağ Yakınsama İndeksi (GCI) Denklem 4.13 yardımıyla bulunabilmektedir.

Tablo 4.3 Belirsizlik Analizi Sonuçları

	Yan Öteleme Kuvveti (Y) [N]	Sapma Momenti (N) [N-m]
N_1	5639856	
N_2	2952064	
N_3	1841095	
N_4	117085	
N_5	794489	
r_{21}	1,2433	
r_{32}	1,1605	
ϕ_1	300,4577	300,3557
ϕ_2	301,7904	302,1399
ϕ_3	305,4607	303,9573
p	5,5636	1,7453
R	0,3631	0,9817
ϕ_{ext}^{21}	299,8925	296,4963
e_a^{21}	0,44%	0,59%
e_{ext}^{21}	0,19%	1,3%
GCI_{mesh5}^{21}	0,24%	1,6%

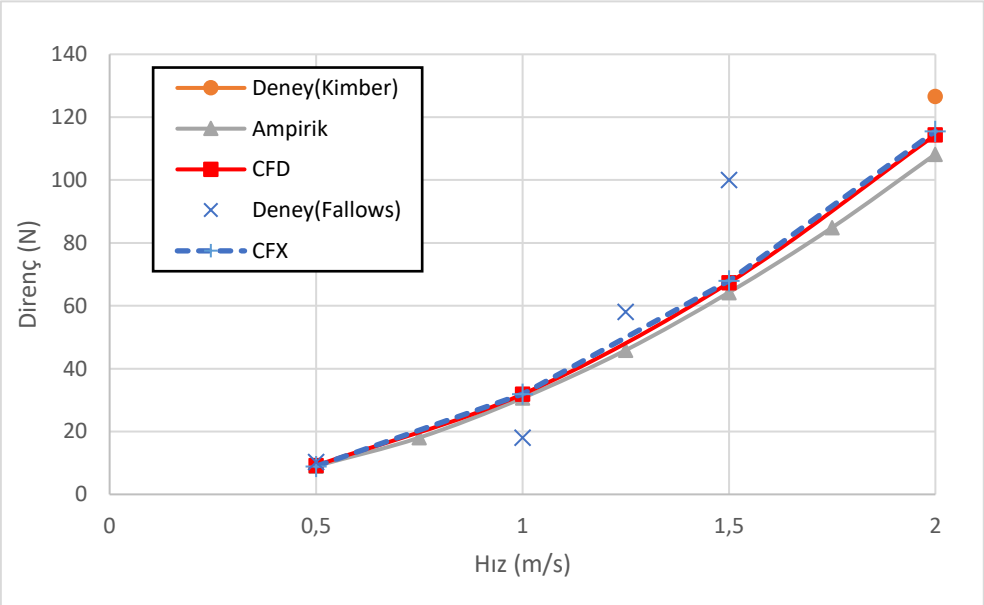
Tablo 4.3'te belirsizlik analizi sonucunda hesaplanan parametreler verilmiştir. Tablo 4.3, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'daki veriler incelendiğinde Ağ yapısı 4'ten sonra hata oranının sabitlendiği görülmektedir. Hesaplama maliyeti doğrudan etkileyen hücre sayısı Ağ yapısı 4 ile Ağ yapısı 5 arasında yaklaşık 1,9 kat artmaktadır. Çalışmanın bir sonraki bölümünde yapılacak analizlerde seçilen ağ yapısı kullanılacak olduğundan çözüm süresi hesaplama maliyeti açısından önemlidir. Kullanılan bilgisayarın kapasitesi dikkate alınarak hata oranındaki değişim göz ardı edilerek Ağ yapısı 4 yani N_2 ile çalışma devam ettirilmiştir.

4.3 Direnç Analizleri

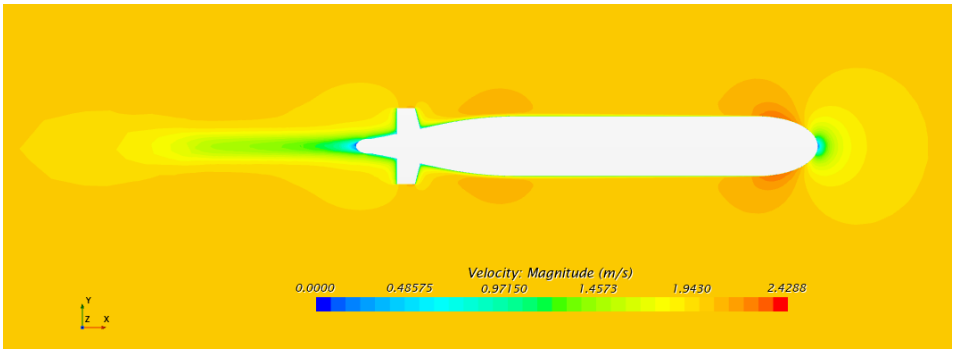
Direnç analizlerinde 7 metre uzunluğundaki tam ölçekli Autosub geometrisi kullanılmıştır. Sürüklenme analizlerinde kullanılan ağ boyutları, statik sürüklenme analizleri için yapılan ağ bağımsızlığı çalışmasında ağ yapısı 4 yapısından elde edilenlerle aynı olduğu görülmektedir. Akış hacmi tam ölçekli boyutla orantılı olacak şekilde yeniden oluşturulmuştur. Sonuç olarak ağ sayısında artış meydana gelmiştir. 0.5, 1.0, 1.5 ve 2 m/s hızlarda dört farklı analiz yapılmıştır. Bu analizlerin sonuçları Tablo 4.4 ve Şekil 4.7'de sunulmuştur. Autosub etrafındaki hız dağılımı da Şekil 4.8'de ifade edilmiştir.

Tablo 4.4 Direnç Sonuçları

Hız (m/s)	Deney Fallows	Deney Kimber	Ampirik Phillips et al.	CFX Phillips et al.	HAD	Hata % Ampirik	Hata % CFX
0,5	10,337	-	9,003	8,943	9,175	1,912	2,589
0,75	-	-	18,061	-	-	-	-
1	18,023	-	30,663	31,959	31,873	3,941	-0,270
1,25	58,064	-	45,886	-	-	-	-
1,5	100,017	-	64,242	67,926	67,328	4,801	-0,881
1,75	-	-	84,898	-	-	-	-
2	-	126,649	108,228	115,531	114,376	5,683	-1,001



Şekil 4.7 Autosub için direnç tahminlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.8 2 m/s'deki Direnç için hız dağılımı

Tablo 4.4'te görülebileceği gibi Phillips ve diğerlerinin sonuçları Fallows tarafından yapılan test sonuçlarıyla örtüşmemektedir [8]. Fallows tarafından

yapılan deneyde 2,5 metre uzunluktaki model su yüzeyinden 2,6 çap derinlikte çizilmiştir [6].

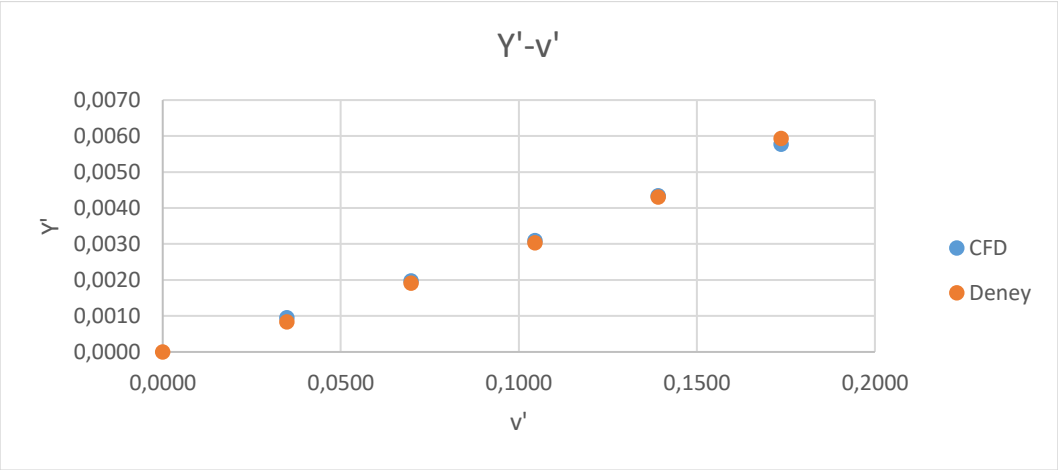
Bu da su altı aracının su yüzeyine yakın olduğu ve dalga ürettiği anlamına gelmektedir. Ayrıca deneyde 2,5 metre uzunluğunda bir model kullanılmıştır. Hız arttıkça hata payının artması, bu farklılığa neden olan faktörün dalga direnci olduğunu desteklemektedir. Fallows tarafından yayınlanan tezde test kurulumuyla ilgili bu sorunlardan bahsedilmiştir. Bir başka hata nedeni de test düzeneğinde büyük bir montaj direğinin bulunmasıdır. Bu yapının neden olduğu kuvvetler test sonuçlarını etkilemektedir. Bu nedenler deneysel sonuçlar, HAD analizi sonuçları ve ampirik sonuçlar arasındaki farkın nedenleridir. Öte yandan 2 m/s hız için HAD analizi sonucu Kimber ve Marshfield'in deneysel sonuçlarıyla %10 hata oranı ile örtüşmektedir. Ayrıca HAD analizleri sonuçları ampirik sonuçlarla birlikte %6'nın altında hata oranlarına sahiptir. Bunlara ek olarak Phillips ve diğerleri tarafından yapılan CFX çözümü ile %2,6'dan az hata oranı ile örtüşmektedir.

4.4 Statik Sürüklenme Analizleri

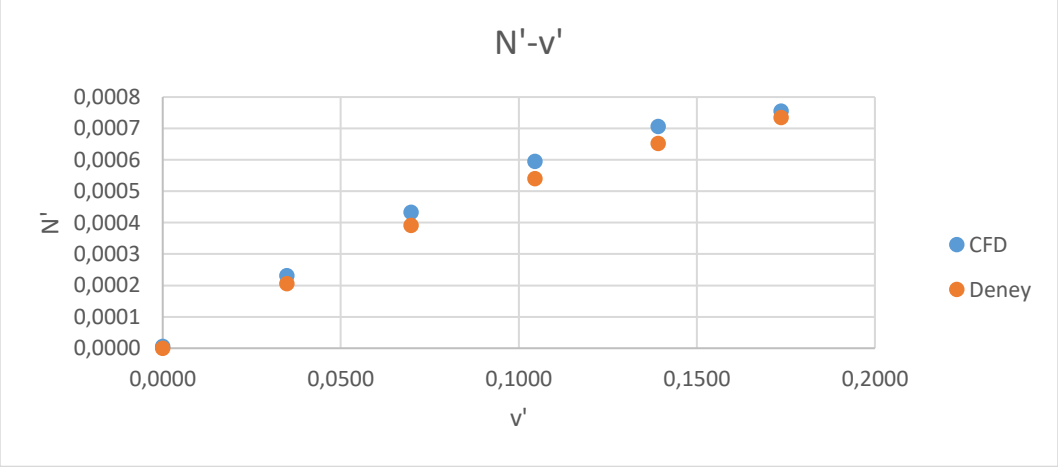
Analizler bölüm 4.2'de elde edilen Ağ yapısı 4 kullanılarak devam ettirilmiştir. 2,69 m/s hızla 0,2,4,6,8 ve 10 derecelik açılarda tanımlanan statik sürüklenme koşulu için altı analiz yapılmıştır. Tablo 4.5'te statik sürüklenme sonuçları gösterilmiştir. Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da kuvvetlerin ve momentlerin sürüklenme hızına göre değişimi görülebilmektedir.

Tablo 4.5 Statik Sürüklenme Sonuçları

Hücum Açısı	v' Sürük-lenme Hızı	Y'	N'	Y' Deney [8]	N' Deney [8]	Hata (%) Y'	Hata (%) N'
0	0	-1,2E-05	5,85E-06	0	0	-	-
2	0,03489	0,00095	0,000231	0,000836	0,000206	13,65	12,15
4	0,06976	0,001969	0,000433	0,001913	0,000391	2,93	10,68
6	0,10453	0,00309	0,000595	0,003032	0,00054	1,91	10,27
8	0,13917	0,004343	0,000707	0,004305	0,000652	0,88	8,44
10	0,17365	0,005769	0,000756	0,005931	0,000734	-2,73	2,88



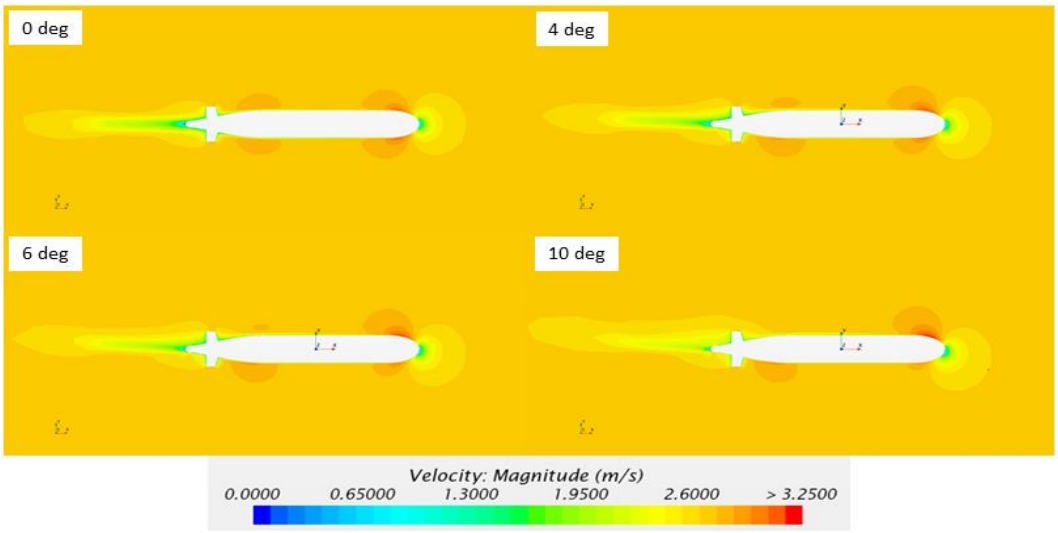
Şekil 4.9 Yanal öteleme kuvvetinin (Y') yanal öteleme hızı (v') ile değişimi



Şekil 4.10 Sapma momentinin (N') yanal öteleme hızı (v') ile değişimi

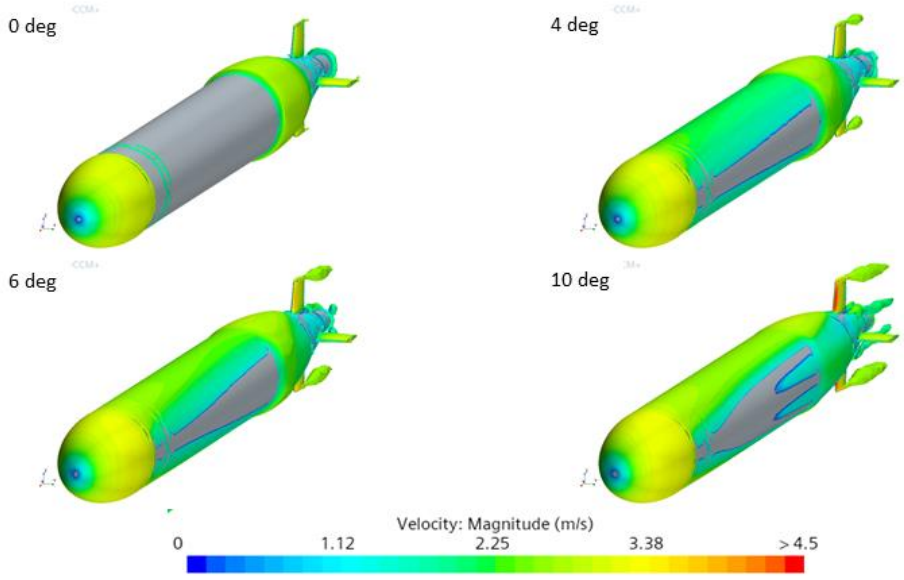
Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15 HAD analizlerinden elde edilen sonuçları göstermektedir. Elde edilen sonuçlardaki en yüksek ve en düşük değerler statik sürüklenme açısının değişmesine göre farklılık göstermektedir.

Karşılaştırmalı bir sonuç sağlamak amacıyla hız ve basınç aralığı her şekil için tek bir değerle sınırlandırılmıştır.



Şekil 4.11 Autosub etrafındaki hız dağılımı

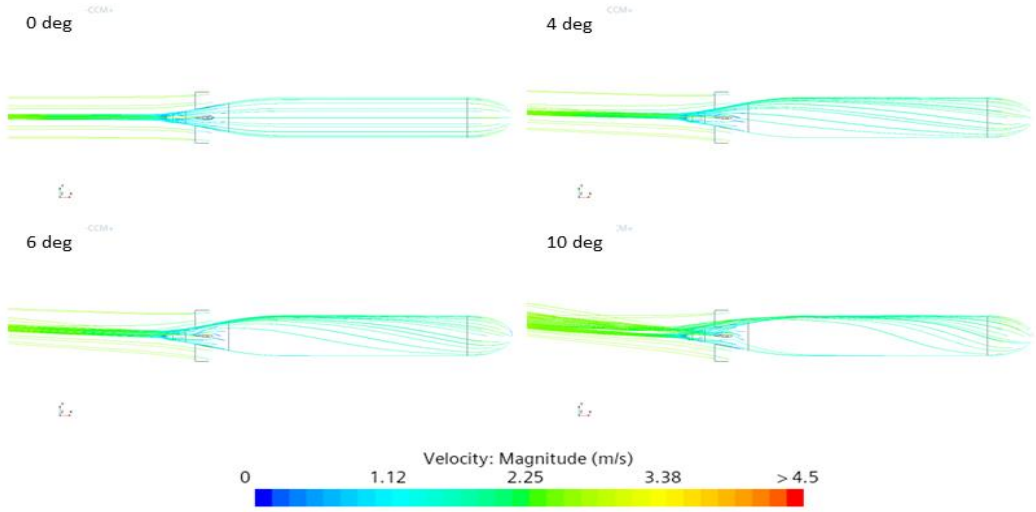
Şekil 4.11'de su altı aracının çevresindeki akış alanı gösterilmiştir. Statik sürüklenme açısı arttıkça su altı aracı etrafındaki akışın karakteristiğinin değiştiği görülmektedir.



Şekil 4.12 Q Criteria = Autosub etrafında 5 yüzey

Q-Criteria değeri 5'e eşit olan yüzeyler elde edildi. Bu yüzeylerdeki hız dağılımı Şekil 4.12'de gösterilmektedir. Q-Criteria değeri su altı aracının arkasındaki izi

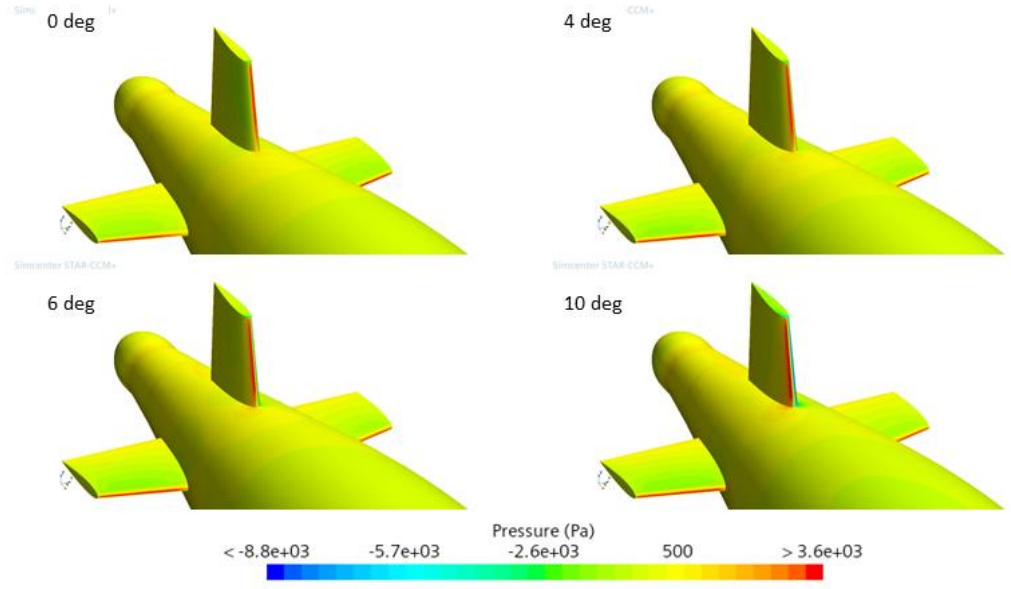
incelememize olanak sağlar. Görüldüğü gibi açı arttıkça elde edilen maksimum hız artmakta, iz açısı ve uzunluğu da artmaktadır.



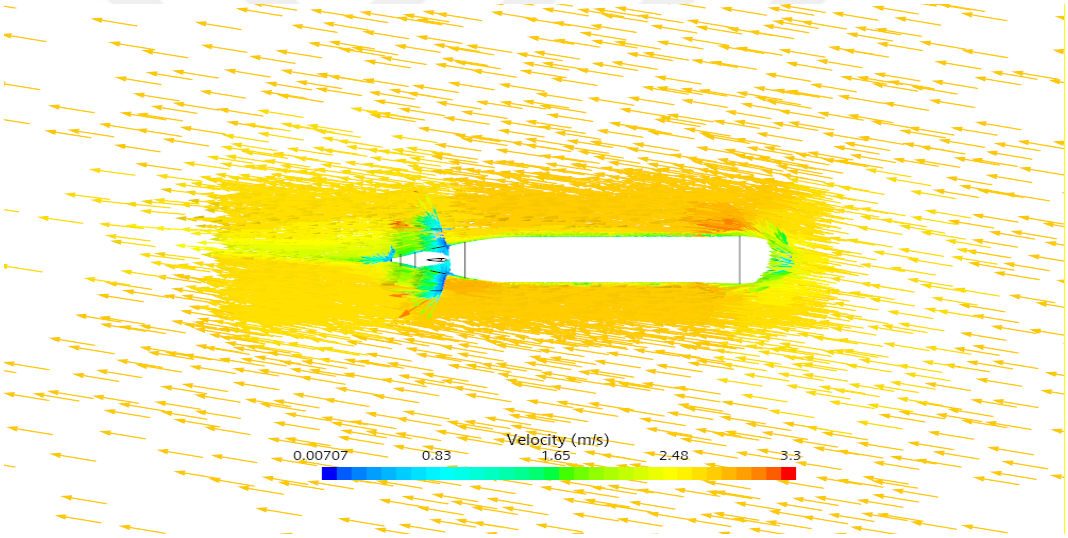
Şekil 4.13 Autosub etrafındaki akım çizgileri

Şekil 4.13'te su altı aracının yüzeylerinden çizilen akım çizgisini göstermektedir. Su altı aracı statik bir sürüklenme açısına maruz kaldığında çevresinde dönmeli bir akış gözlemlenir. Bu açı arttıkça su altı aracının arka kısmındaki akım çizgilerinin daha karmaşık ve daha yüksek hıza sahip olduğu şekillerde görülmektedir.

Şekil 4.14'te su altı aracının kıç gövdesindeki kanatçıklar gösterilmektedir. Açı değiştikçe bu kanatçıklar üzerindeki basınç dağılımı da değişir. Açı arttıkça kanat üzerindeki maksimum basınç bölgesi yer değiştirir. Bu da açı arttıkça kanatçıkların oluşturduğu kuvvetin artmasına neden olur. Bu etki, açı arttıkça sapma momentinin de artmasının nedenlerinden biridir.



Şekil 4.14 Autosub'un kıç gövdesindeki basınç dağılımları



Şekil 4.15 Autosub etrafındaki vektör alanı

Su altı aracının etrafındaki vektör alanı Şekil 4.15'te gösterilmektedir. 10 derecelik statik sürüklenme durumu için verilen bu görüntüde su altı aracına etki eden akışın açısı açıkça görülmektedir. Ortaya çıkan yanal öteleme kuvveti ve sapma momenti, vücudun belirli bir açıyla hareket eden akışından kaynaklanır. 2,69 m/s hızla gerçekleştirilen bu görüntünün kesitinde ise 3,3 m/s hıza ulaştığı görülüyor. Bu hız bölgeleri su altı aracı etrafındaki basınç bölgelerini etkileyerek yanal öteleme kuvveti ve sapma momentinin oluşmasına neden olur.

HAD analizleri ile elde edilen kuvvet ve moment değerleri deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında hata oranlarının %-5 ile %10 arasında değiştiği Tablo 4.5'te

görülmektedir. Hidrodinamik yanal öteleme kuvveti Y' ve sapma momenti N', Şekil 4.9 ve 4.10'da sunulmaktadır. Sunulan sonuçlar, analizden elde edilen yanal öteleme kuvvetleri ve sapma momentlerinin ağ yapısından bağımsız sonuçlar verdiğini ve sunulan deneysel sonuçlarla tutarlı olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak gelecekte yapılacak çalışmalarda kullanılabilecek bir analiz yöntemi sunulmuştur.

4.5 Farklı L/B Oranlarına Sahip Autosub için Statik Sürüklenme

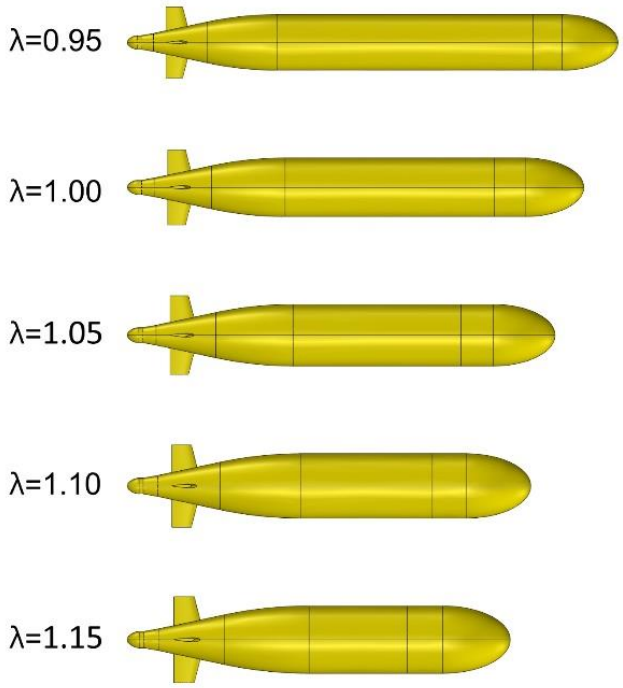
Bu kısımda çalışmanın ilk bölümünde Star CCM+ ile modellenen statik sürüklenme test düzeneği kullanılmıştır. Bu bölümde bir sonraki kısımda verilecek olan yeni geometriler ve ağ yapıları kullanılmıştır. Toplamda 24 analiz yapılmıştır. Yapılan 24 analiz ve önceki bölümlerde yapılan 6 analiz ele alınacaktır.

4.5.1 Farklı L/B Oranlarına Sahip Geometriler ve Ağ Yapıları

Bu bölümde farklı Autosub geometrileri oluşturulmuştur. Deplasman hacimleri eşit tutularak farklı L/B oranlarına sahip toplamda 5 geometri oluşturulmuştur. Geometrilerin oluşturulma aşamasında orijinal geometri 0.95, 1.05, 1.10 ve 1.15 oranlarında ölçeklendirilmiştir. Bu ölçeklendirmeden sonra yeni geometrilerin paralel gövdesi orijinal gövde ile aynı deplasmanı elde etmek için kısaltılmış ya da uzatılmıştır. Yeni geometrilerin L/B oranları orijinal geometrinin L/B oranıyla beraber Tablo 4.6'da sunulmuştur. Yeni ve orijinal Autosub geometrilerinin modelleri Şekil 4.16'da görülmektedir. Oran 1 ile ifade edilen geometri Autosub'un ¾ ölçekli geometri modelidir. Farklı boyutlardaki yeni geometrilerin ağırlık merkezleri ölçek oranına göre tanımlanmıştır.

Tablo 4.6 Yeni Geometrilerin L/B Oranları

Oran	UZUNLUK, L (m)	GENİŞLİK, B (m)	L/B
0,95	5,594	0,636	8,800
1,00	5,200	0,669	7,773
1,05	4,877	0,703	6,941
1,10	4,600	0,736	6,249
1,15	4,365	0,770	5,672

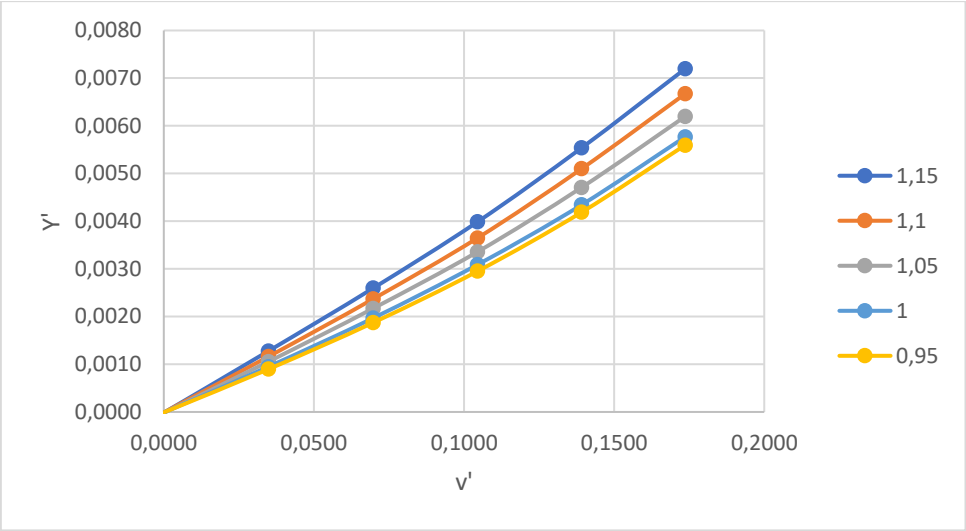


Şekil 4.16 Yeni geometrilerin modelleri

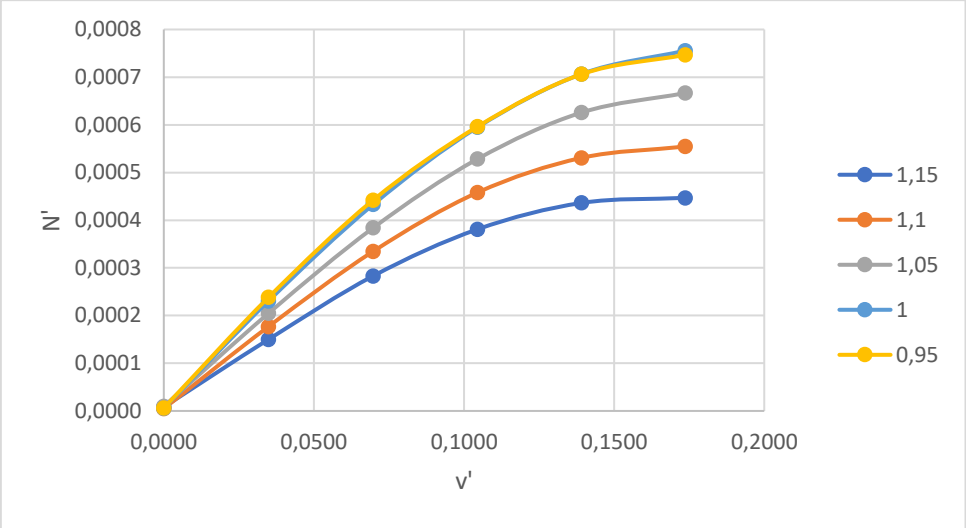
L/B oranında oluşturulan geometrilerin ağ yapıları ağ bağımsızlık çalışmasında ve belirsizlik analizinde seçilen boyutlarla oluşturulmuştur. Eleman sayısı 2,66x106 ile 2,98x106 arasında değişmektedir.

4.5.2 Sonuçlar ve Tartışma

Farklı L/B oranlarındaki geometriler ile yapılan analizlerin grafikleri Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de sunulmuştur. Şekil 4.17 Boyutsuz sürüklenme hızına karşı sürüklenme kuvvet katsayısını içerirken, Şekil 4.18 boyutsuz sapma momenti katsayılarını göstermektedir. Önceki bölümlerde verilen Denklem 2.2 ile Denklem 2.6 yardımıyla yanal öteleme kuvveti Y' ve sapma momenti N' elde edilmiştir. Denklem 2.7 ile de sürüklenme hızı v' hesaplanmıştır.

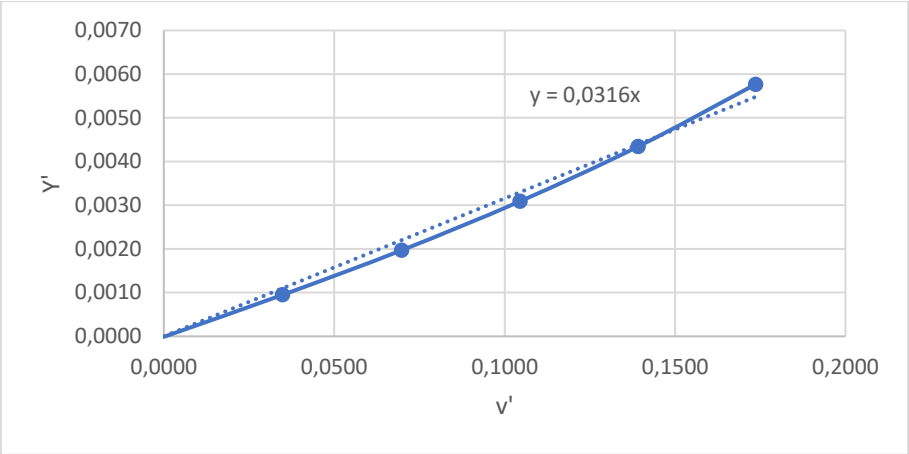


Şekil 4.17 L/B Oranındaki geometriler için sürüklenme hızları ile yanal öteleme kuvvetlerinin değişimleri



Şekil 4.18 L/B Oranındaki geometriler için sürüklenme hızları ile sapma momentinin değişimleri

Bu grafikler yanal öteleme ve sapma hareketleri için boyutsuz hız katsayıları olan değerlerini elde etmek için kullanılmıştır. Bu katsayıları elde etme örneği Şekil 4.19'da sunulmaktadır. Excel yardımıyla lineer bir denklem çizgisi oluşturulup eğim hesaplanmaktadır. Bu işlem tüm analiz sonuçları için tekrarlanmıştır ve Tablo 4.7'de gösterilmektedir.



Şekil 4.19 Hareketler için katsayıların elde edilmesi örneği

Tablo 4.7 Yanal Öteleme Kuvveti ve Sapma Momenti için Boyutsuz Oran Katsayıları

Oran	Y'_v,	N'_v,
0,95	0,0304	0,0051
1,00	0,0316	0,0050
1,05	0,0341	0,0044
1,10	0,0369	0,0037
1,15	0,0400	0,0031

Tablo 4.7 oran katsayıları değerlerinin göstermektedir. Bu tablodan su altı aracının boyu uzadığında Y'_v, yanal öteleme kuvveti boyutsuz oran katsayısı üzerinde bir artış, sapma momenti boyutsuz oran katsayısı N'_v, üzerinde bir azalma olduğu görülmektedir. Ölçek oranı arttıkça uzunluk değeri de artmaktadır. Şekil 4.19'da Autosub'un uzunluğu arttıkça boyutsuz yanal öteleme kuvvetinin arttığı görülmektedir. Ancak uzunluk artışı boyutsuz sapma momenti değerleri üzerinde azalmaya neden olmuştur. Benzer şekilde elde edilen değerler incelendiğinde moment değerleri azalırken kuvvet değerlerinin de arttığı görülmektedir. Bu durum, su altı aracına etkiyen kuvvet noktasının uzunluk arttıkça ağırlık merkezine yaklaştığını göstermektedir. Buradan çıkarılacak sonuç şöyle olmalıdır ki; aynı statik sürüklenme açısına sahip iki Autosub aracından uzun olanına daha fazla yanal bozucu kuvvet ve daha az bozucu moment etki etmektedir. Yeni bir geometri

tasarlanırken, tasarımın işleyişinden dolayı yanal kuvvetlerin kontrol edilmesi daha zor ise L/B oranının düşürülmesi amaçlanmalıdır. Ancak rotasyonel etkilerin daha kritik olduğu durumlarda L/B oranının arttırılması hedeflenmelidir.

5
SONUÇLAR

Bu çalışma, model ve tam ölçekli geometriler kullanılarak Autosub su altı aracı üzerindeki kuvvet ve moment hesaplamalarını içermektedir. Hesaplamalarda RANS denklemleri ve iki denklemli türbülans modelleri kullanılmıştır. 0, 2, 4, 6, 8 ve 10 derecelik açılar için statik sürüklenme analizleri yapılmıştır. Hesaplamalar 3/4 ölçekli bir model kullanılarak 2,69 m/s seyir hızında yapılmıştır. Optimum ağ yapısını belirlemek için 6^o statik sürüklenme koşulunda bir ağ bağımsızlığı çalışması ve belirsizlik analizi yapılmıştır. Ağ bağımsızlık çalışmasında deneysel sonuçların hata oranları ve analizde hesaplanan değerler kullanılmıştır. Optimum ağ yapısını belirledikten sonra diğer açılar için analizler tamamlanmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında aynı ağ boyutları kullanılarak tam ölçekli sürüklenme analizleri yapılmıştır. 0.5, 1, 1.5 ve 2 m/s hızlarda 7 metre tam ölçekli bir geometri için direnç analizleri yapılmıştır. Hesaplanan direnç kuvvetleri deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Açık literatürde direnç için sunulan iki deneysel sonuç bulunmaktadır. Kimber ve Marshall tarafından sunulan ilk çalışmada 2 m/s'lik bir direnç değeri mevcutken, Fallows daha geniş bir aralık için direnç değerlerini sunmuştur. Fallows'un deneysel sonuçları, farklı model derinlikleri için 0 ile 5 m/s arasında değişen hızları kapsadığından direnç değerleri dalga direncini de içermektedir [6]. Bu nedenle, HAD analizleri ile Fallows'un deney sonuçları karşılaştırıldığında bir sapma olduğu gözlemlenmektedir. Aynı şekilde daha önce Kimber ve Marshall tarafından elde edilen ampirik ve deneysel sonuçlar incelendiğinde yine bu sapma görülmektedir. Bu sapmanın nedeni Phillips ve diğerleri tarafından da tartışılmıştır [8]. Bu çalışmanın HAD analizi sonuçları, Phillips ve diğerleri tarafından sunulan HAD analizleri sonuçlarıyla uyumlu görünmektedir. Ayrıca HAD analizi sonuçları ile Phillips ve Kimber&Marshall tarafından yapılan deney sonuçları karşılaştırıldığında sırasıyla %2,6 ve %10 hata oranları gözlemlenmiştir.

Statik ötelenme analizleri farklı ötelenme açıları için yapılmış olup, Kimber ve Marshall tarafından yapılan deneysel sonuçlarla iyi bir uyum görülmektedir. Yanal öteleme kuvvetlerinde deneysel sonuçlardan sapma daha az iken, sapma

momentinde daha fazladır. Ancak en büyük hata oranı %10 olarak elde edildiğinden kabul edilebilir düzeydedir. Statik sürüklenme ve direnç analizlerinden elde edilen kuvvet ve moment değerlerinin sırasıyla %8-%13,5 ve %1,9-%5,6 hata oranı ile literatürdeki deneysel ve ampirik sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. HAD yöntemiyle saf ötelenme ve saf sapma momentlerinin yüksek doğrulukla elde edilebildiği görülmektedir. Çalışmanın son bölümünde ise ağ bağımsızlığı ve validasyon çalışması ile elde edilen ağ boyutları ve analiz düzeneği, farklı L/B oranlarına sahip farklı geometrilerle yapılan analizlerde kullanılmıştır. Bu analizlerin sonuçları değerlendirildiğinde L/B oranındaki artışın manevra türevleri üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur. L/B oranı arttıkça sürüklenme kuvvetinin neden olduğu katsayıların arttığı, sapma momentinin neden olduğu katsayıların azaldığı görülmüştür.

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] D. V. Efremov and E.M. Milanov, "Hydrodynamics of DARPA SUBOFF submarine at shallowly immersion conditions," *TransNav International J.*, vol. 13, pp. 337-342, Jun. 2019.

[4] A. Saeidinezhad, A. A. Dehghan, and M. D. Manshadi, "Experimental investigation of hydrodynamic characteristics of a submersible vehicle model with a non-axisymmetric nose in pitch maneuver," *Ocean Eng. J.*, vol. 100, pp. 26-34, May 2015.

[5] 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.

[6] C. D. Fallows, "Characterization of the propulsion system of autonomous underwater vehicles," Ph.D. dissertation, Dept. Ship Sci., Univ. Southampton, UK, 2004.

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

[8] 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 Symp. Numerical Towing Tank*, Dec. 2007.

[9] A. Phillips, M. Furlong, and S. R. Turnock, "Virtual Planar Motion Mechanism Tests of the Autonomous Underwater Vehicle Autosub," *in Proc. of the STG Conf. on CFD in ship design*, Hamburg, Germany, Sep. 2007.

[10] A. Phillips, M. Furlong, and S. R. Turnock, "The use of computational fluid dynamics to aid cost-effective hydrodynamic design of autonomous underwater vehicles," *IEEE Oceans*, vol. 224, pp. 239-254, Jun. 2010.

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

[12] T.H. Joung et al., "Shape optimization of an autonomous underwater vehicle with a ducted propeller using computational fluid dynamics analysis," *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 4, pp. 45-57, Mar. 2012.

[13] S. Arslan, "Su Altı Araçları İçin Yeni Geliştirilen Hidrodinamik Modelleme Yöntemleri Kullanılarak Otonom Bir Su Altı Aracının Hidrodinamik

Karakteristiğinin İncelenmesi," M.S. thesis, Dept. Aerospace Eng., Istanbul Tech. Univ., Istanbul, Turkey, 2013.

[14] M. Can, "Numerical Simulation of Hydrodynamic Planar Motion Mechanism Test for Underwater Vehicles," M.S. thesis, Dept. Appl. Sci., Middle East Univ., Ankara, Turkey, 2014.

[15] M. Marion and R. Temam, *Handbook of Numerical Analysis* (Navier-stokes equations: Theory and approximation). Ecully, France, 1998

[16] G. Alfonsi, "Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations for Turbulence Modeling," *J. Appl. Mech. Rev.* vol. 62, Jul. 2009.

[17] F. R. Menter, "Two Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," *AIAA J.*, vol. 32, pp. 1598-1605, Aug. 1994.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makaleler

1. S. N. Ciplakkaya and Y. A. Ozden, “Numerical Investigation of the Resistance and Static Drift Condition of the Autosub Submarine,” *J. Seatific*, vol. 3, Dec. 2023.