İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SU ALTI ARAÇLARI İÇİN YENİ GELİŞTİRİLEN HİDRODİNAMİK MODELLEME YÖNTEMLERİ KULLANILARAK OTONOM BİR SU ALTI ARACININ HİDRODİNAMİK KARAKTERİSTİĞİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sertaç ARSLAN

Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı

Uçak ve Uzay Mühendisliği Disiplinler Arası Yüksek Lisans Programı

HAZİRAN 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SU ALTI ARAÇLARI İÇİN YENİ GELİŞTİRİLEN HİDRODİNAMİK MODELLEME YÖNTEMLERİ KULLANILARAK OTONOM BİR SU ALTI ARACININ HİDRODİNAMİK KARAKTERİSTİĞİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sertaç ARSLAN
(511101127)

Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı

Uçak ve Uzay Mühendisliği Disiplinler Arası Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Hayri ACAR

Tez Eş Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Şerif KAVSAOĞLU

HAZİRAN 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 511101127 numaralı Yüksek Lisans / Doktora Öğrencisi **Sertaç ARSLAN** ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"SU ALTI ARAÇLARI İÇİN YENİ GELİŞTİRİLEN HİDRODİNAMİK MODELLEME YÖNTEMLERİ KULLANILARAK OTONOM BİR SU ALTI ARACININ HİDRODİNAMİK KARAKTERİSTİĞİNİN İNCELENMESİ"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Yrd. Doç. Dr. Hayri ACAR** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Eş Danışman :	**Prof. Dr. Mehmet Ş. KAVSAOĞLU** Anadolu Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Fırat Oğuz EDİS** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Kadir SARIÖZ İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Hasan GÜNEŞ İstanbul Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : **03 Mayıs 2013**
Savunma Tarihi : **04 Haziran 2013**

Su altı dünyasında yapılan çalışmalar uğruna ömrünü adamış tüm bilim insanlarına,

ÖNSÖZ

Hidrodinamik konusunda yapılmış teorik, ampirik ve hesaplamalı çalışmalardan oluşan bu yüksek lisans tezi, su altı dünyasının yüksek dereceli dinamik özelliklerini ve su altı dünyasında geçerli olan hareket denklemlerini barındırarak, su altında hareket eden bir otonom su altı aracının hidrodinamik karakteristiğinin çıkartılması adına yapılmış bir kaynaktır. Yapılan çalışma kullanılarak, bir su altı aracının kavramsal tasarım aşamasından itibaren, istenilen hidrodinamik performans değerleri sağlanana kadar geçen süre zarfında hidrodinamik tasarım ve analiz çalışmaları kapsamında yapılan faaliyetler hakkında bilgi edinilebilir. Günümüzün gelişen ve rekabetçi teknolojisinde su altı hidrodinamiği konusunda ülkemizde bulunan test altyapıları ve yapılan akademik çalışmalar, diğer ülkeler tarafından sahip olunan imkânlar ve yapılan çalışmalar ile kıyaslandığında ne yazık ki yetersiz durumdadır. Bu kapsamda yapılan tez çalışması su altı hidrodinamiği konusundaki Türkçe kaynak eksikliğini nispeten giderebilmeyi amaçlamaktadır.

Su altı hidrodinamiği konusunda benimle çalışmayı kabul eden ve tezimin hazırlama aşamasından tamamlama aşamasına kadar geçen sürede tecrübeleri, bilgileri ve yol gösterimleri ile desteklerini üzerimden esirgemeyen İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak Mühendisliği Bölümünde Öğretim Görevlisi olan tez danışman hocam Sn. Yrd. Doç. Dr. Hayri ACAR'a ve Eskişehir Anadolu Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi Dekanı olan eş danışman hocam Sn. Prof. Dr. Mehmet Şerif KAVSAOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca su altı hidrodinamiği konusunda yüksek lisans tezi yapmamı destekleyen ve ROKETSAN A.Ş.'deki çalışma hayatım süresince yüksek lisans yapmam konusunda anlayışlı davranışları ile beni cesaretlendiren ROKETSAN A.Ş. bünyesinde çalışan amirlerime teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak da, hayatım boyunca yaptığım tüm çalışmalarda olduğu gibi yüksek lisans tezim süresince de manevi desteklerini hiçbir zaman üzerimden esirgemeyen ve desteklerini her daim yanımda hissettiğim hayat arkadaşım Ceylan ARSLAN'a, bir tanecik kardeşim Sena ARSLAN'a ve aile üyelerime şükranlarımı sunarım.

Haziran 2013

Sertaç ARSLAN
Uçak Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xiii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xv**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xvii**
SEMBOL LİSTESİ ..... **xxi**
ÖZET ..... **xxv**
SUMMARY ..... **xxvii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Otonom Su Altı Araçlarının Tanımı ve Kullanım Alanları 2
1.2 Otonom Su Altı Araçlarının Tarihçesi 3
1.3 Robotik Su Altı Araçlarının Sınıflandırılması 5
1.3.1 Otonom su altı araçlarının sınıflandırılması 5
1.3.1.1 Bilimsel araştırma amaçlı kullanılan otonom su altı araçları 6
1.3.1.2 Askeri araştırma amaçlı kullanılan otonom su altı araçları 6
1.3.1.3 Ticari araştırma amaçlı kullanılan otonom su altı araçları 7
1.3.1.4 Hobi amaçlı kullanılan otonom su altı araçları 7
1.4 Ülkemizde ve Diğer Ülkelerde Bulunan Farklı Tipteki Otonom Su Altı Araçlarının İncelenmesi 8
1.4.1 Dünya üzerinde çeşitli ülkelerde bulunan otonom su altı araçları 8
1.4.1.1 C-SCOUT Otonom su altı aracı 8
1.4.1.2 SNUUV I Otonom su altı aracı 10
1.4.1.3 ISIMI Otonom su altı aracı 11
1.4.1.4 REMUS Otonom su altı aracı ……..... 11
1.4.2 Türkiye'de üretilen otonom su altı araçları 13
1.4.2.1 Milli AUV Otonom su altı aracı 13
1.4.2.2 ÇANAKKALE Otonom su altı aracı 14
1.4.2.3 GMK-C Otonom su altı aracı 15
1.5 Tezin Amacı ve Motivasyonu 16
2. AUTOSUB OTONOM SU ALTI ARACI **19**
2.1 Tanımı ve Görevleri 19
2.2 Teknik Özellikleri 20
2.3 Geometrik Özellikleri ve Kontrol Yüzeyleri 21
2.4 Ağırlığı ve Taşıma Kuvveti 22
2.5 Ağırlık ve Hacim Merkezleri 23
3. TEMEL HAREKET DENKLEMLERİNİN VE ELEMANLARININ TANITILMASI **25**
3.1 Hidrodinamik Eksen Takımları 25
3.1.1 Gövde eksen takımı 25
3.1.2 Dünya eksen takımı 27

3.2 Araç Kinematiği 27
3.2.1 Dünya eksen takımından gövde eksen takımına geçiş 27
3.3 Aracın Katı Cisim Dinamiği 29
3.4 Kabul Edilen Varsayımlar 31
3.4.1 Çevresel Varsayımlar 31
3.4.2 Araç ve sistem dinamiği için kabul edilen varsayımlar 32
4. HİDRODİNAMİK DENKLEM SETİNİN OLUŞTURULMASI VE BİLEŞENLERİNİN TANITILMASI 33
4.1 Standart Denizaltı Hareket Denklemlerinin Oluşturulması ve Tarihçesi 33
4.2 Altı Serbestlik Dereceli Hidrodinamik Denklem Setinin Türetilmesi 35
4.3 Hidrostatik Bileşenler 40
4.4 Hidrodinamik Bileşenler 41
4.4.1 Statik hidrodinamik katsayılar 42
4.4.2 Dinamik hidrodinamik katsayılar 43
4.4.2.1 Lineer manevra katsayıları 43
4.4.2.2 Lineer olmayan manevra katsayıları 44
4.4.2.3 Akuple manevra katsayıları 45
4.4.2.4 Ek su kütlesi ve ataleti katsayıları 46
5. SU ALTI MODEL TEST DÜZENEKLERİ 49
5.1 Doğrusal Çekme Tankı Test Düzeneği 49
5.2 Düzlemsel Hareket Mekanizması (*Planar Motion Mechanism*) 51
5.3 Döner Kol Mekanizması Test Düzeneği (*Rotating Arm Mechanism*) 53
5.4 Konileme Hareket Mekanizması (*Coning Motion Mechanism*) 54
6. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ HESAPLAMA YÖNTEMLERİ 57
6.1 Katı Model Dosyasının Oluşturulması 57
6.2 Çözüm Ağının Oluşturulması 58
6.2.1 GAMBIT çözüm ağı oluşturma programı 58
6.3 Sınır Tabakaların Oluşturulması 60
6.3.1 TGRID otomatik çözüm ağı oluşturma programı 61
6.4 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Hesaplama Modelinin Kurulması 62
6.4.1 ANSYS Fluent hesaplamalı akışkanlar dinamiği analiz programı 63
6.5 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analiz Sürecinin Akış Diyagramı 64
7. SU ALTI ARAÇLARI İÇİN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ HESAPLAMA YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ 67
7.1 Statik HAD Analiz Modeli Doğrulama Çalışması 68
7.1.1 DARPA denizaltı modeli statik denek taşı çalışması 68
7.1.1.1 DARPA modelinin denek taşı konfigürasyonlarının geliştirilmesi 68
7.1.1.2 Test ve analiz koşulları 70
7.1.1.3 Çözüm ağının oluşturulması 71
7.1.1.4 Statik hidrodinamik verilerin doğrulanması 73
7.1.2 Autosub Otonom su altı aracı statik denek taşı çalışması 79
7.1.2.1 Test ve analiz koşulları 79
7.1.2.2 Çözüm ağının oluşturulması 80
7.1.2.3 Statik hidrodinamik verilerin doğrulanması 82
7.2 Dinamik HAD Analiz Modeli Doğrulama Çalışması 85
7.2.1 Autosub Otonom su altı aracı statik denek taşı çalışması 85
7.2.1.1 Test ve analiz koşulları 86
7.2.1.2 Çözüm ağının oluşturulması 87
7.2.1.3 Dinamik hidrodinamik verilerin doğrulanması 89

8. EK SU HİDRODİNAMİK KATSAYILARININ HESAPLANMASI İÇİN AMPİRİK HESAPLAMA YÖNTEMİNİN KURULMASI 93
8.1 Temel Geometrik Cisimler İçin Ek Su Kütlesi Hesaplama Yöntemlerinin Geliştirilmesi 93
8.1.1 Küre için geliştirilmiş ek su kütlesi hesaplama yöntemi 93
8.1.2 Silindir için geliştirilmiş ek su kütlesi hesaplama yöntemi 95
8.1.3 Elipsoit için geliştirilmiş ek su kütlesi hesaplama yöntemi 95
8.2 Su Altı Araçları İçin Ek Su Katsayılarının Hesaplama Yöntemlerinin Geliştirilmesi 97
8.2.1 Su altı araçları için ek su kütlesi katsayılarının hesaplanması 97
8.2.1.1 $X_{\dot{u}}{}'$ Ek su kütlesi katsayısının hesaplanması 97
8.2.1.2 $Z_{\dot{w}}{}'$ ve $Y_{\dot{v}}{}'$ Ek su kütlesi katsayılarının hesaplanması 98
8.2.2 Su altı araçları için ek su ataleti katsayılarının hesaplanması 100
8.2.2.1 $M_{\dot{q}}{}'$ ve $N_{\dot{r}}{}'$ Ek su ataleti katsayılarının hesaplanması 100
8.2.2.2 $K_{\dot{p}}{}'$ Ek su ataleti katsayısının hesaplanması 102
9. AUTOSUB OTONOM SU ALTI ARACININ HİDRODİNAMİK VERİ TABANININ HAZIRLANMASI 105
9.1 Statik Hidrodinamik Veri Tabanının Hazırlanması ve Sonuçlarının İncelenmesi 105
9.1.1 Eksenel kuvvet sonuçlarının incelenmesi 107
9.1.2 Yanal kuvvet sonuçlarının incelenmesi 112
9.1.3 Yunuslama momenti sonuçlarının incelenmesi 115
9.2 Dinamik Hidrodinamik Veri Tabanının Hazırlanması ve Sonuçlarının İncelenmesi 119
9.2.1 Yunuslama manevrası sonuçlarının incelenmesi 120
9.2.2 Sapma manevrası sonuçlarının incelenmesi 125
9.2.3 Yuvarlanma manevrası sonuçlarının incelenmesi 127
9.2.4 Ek su katsayılarının hesaplanması 131
10. STABİLİTE VE PERFORMANS HESAPLAMALARI 135
10.1 Statik Hesaplamaları 135
10.1.1 Statik stabilitenin incelenmesi 136
10.1.1.1 Doğrusal statik stabilitenin incelenmesi 136
10.1.1.2 Stabilite marjının ve hidrodinamik merkezin incelenmesi 138
10.1.1.3 Yatay statik stabilitenin incelenmesi 140
10.1.2 Manevra kabiliyetinin incelenmesi 142
10.1.2.1 Sapma manevrası kabiliyetinin incelenmesi 143
10.1.2.2 Yunuslama manevrası kabiliyetinin incelenmesi 146
10.1 Performans Hesaplamaları 148
10.2.1 Dönüş yarıçapının hesaplanması 149
11. SONUÇLAR VE YORUMLAR 153
11.1 Yapılan Çalışmalar Sonucunda Elde Edilen Sonuçlar ve Yorumlar 153
11.2 Tez Kapsamında Yapılan Çalışmaların Hidrodinamik Dünyasına Katkıları 156
11.3 Sonsöz 158
KAYNAKLAR 161
EKLER 165
ÖZGEÇMİŞ 169

KISALTMALAR

AUV	**:** Autonomous Underwater Vehicle
UUV	**:** Unmanned Underwater Vehicle
C-SCOUT	**:** Canadian Self-Contained Off-the-shelf Underwater test bed
DHM	**:** Düzlemsel Hareket Mekanizması
HAD	**:** Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
CFD	**:** Computational Fluid Dynamics
NSRDC	**:** Naval Ship Research and Development Center
OSA	**:** Otonom Su Altı Aracı
RANS	**:** Reynolds Averaged Navier Stokes
REMUS	**:** Remote Environmental Measuring UnitS
ROV	**:** Remotely operated underwater vehicle
RPM	**:** Revolutions per Minute
SNUUV	**:** Seoul National University Underwater Vehicle

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : SNUUV I aracının teknik ve geometrik özellikleri 10
Çizelge 1.2 : ISIMI Otonom su altı aracının özellikleri 11
Çizelge 1.3 : REMUS Otonom su altı aracının modelleri 12
Çizelge 1.4 : REMUS Otonom su altı aracının özellikleri 13
Çizelge 1.5 : Milli AUV su altı aracının özellikleri 14
Çizelge 1.6 : ÇANAKKALE Mobil mayın imha şarjının özellikleri 14
Çizelge 1.7 : GMK-C Otonom su altı aracının özellikleri 15
Çizelge 2.1 : Autosub Aracının teknik özellikleri 21
Çizelge 2.2 : Autosub Aracının geometrik özellikleri 21
Çizelge 2.3 : Autosub otonom su altı aracının kütle özellikleri 23
Çizelge 2.4 : Autosub aracının burun noktasına göre ağırlık ve hidrostatik kaldırma merkezi yerleri. 24
Çizelge 5.1 : Doğrusal çekme tankı test düzeneği ile hesaplanabilen katsayılar 50
Çizelge 5.2 : Düzlemsel hareket mekanizması kullanılarak hesaplanabilen katsayılar 53
Çizelge 5.3 : Döner kol test mekanizması ile hesaplanabilen katsayılar 54
Çizelge 5.4 : Konileme hareket mekanizması ile hesaplanabilen hidrodinamik katsayılar 56
Çizelge 7.1 : Sapma manevrası analizlerinden elde edilen hidrodinamik değerler . 90
Çizelge 7.2 : Dinamik denek taşı çalışmasından elde edilen sonuçların karşılaştırılması 91
Çizelge 8.1 : Kürenin en boy oranına göre K parametresinin değişimi 96
Çizelge 9.1 : Statik hidrodinamik veri tabanı analiz noktaları 106
Çizelge 9.2 : Statik hidrodinamik veri tabanında hesaplanan hidrodinamik parametreler 106
Çizelge 9.3 : Farklı seyir hızlarında oluşan sürükleme kuvvetleri ve Reynolds sayıları 108
Çizelge 9.4 : Autosub aracının yunuslama manevrası analizlerinin yapıldığı seyir koşulları 121
Çizelge 9.5 : Yunuslama manevrası analizlerinde incelenecek hidrodinamik parametreler ve bağlı olduğu değişkenler. 122
Çizelge 9.6 : Farklı seyir hızlarında Autosub aracının sahip olduğu yunuslama momenti sönümlemesi katsayıları 123
Çizelge 9.7 : Farklı seyir hızlarında Autosub aracının sahip olduğu düşey öteleme kuvvetinin yunuslama açısal hızına göre değişim katsayıları 125
Çizelge 9.8 : Sapma manevrası sırasında oluşan hidrodinamik parametreler ve bağlı olduğu değişkenler 126
Çizelge 9.9 : Yuvarlanma açısal hızı ile yapılan HAD analizi seyir koşulları 128
Çizelge 9.10 : Yuvarlan manevrası sonucunda oluşan hidrodinamik parametreler ve bağlı olduğu değişkenler 128

Çizelge 9.11 : Farklı seyir hızlarında Autosub aracının sahip olduğu yuvarlanma momentinin yuvarlanma açısal hızına göre değişim katsayıları..... 130
Çizelge 9.12 : Farklı seyir hızlarında Autosub aracının sahip olduğu sapma momentinin yuvarlanma açısal hızına göre değişim katsayıları..... 131
Çizelge 9.13 : Ek su katsayılarının oluşmasına neden olan hareket tipleri..... 132
Çizelge 9.14 : Autosub Aracının ek su katsayıları..... 132
Çizelge 9.15 : Doğrusal ivmeli hareket sonucunda Autosub aracının üzerinde oluşan ek su kütlesi değerleri..... 133
Çizelge 9.16 : Açısal ivmeli hareket sonucunda Autosub aracının üzerinde oluşan ek su ataleti değerleri..... 133

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Görev halindeki bir otonom su altı aracı 2
Şekil 1.2 : İlk insansız su altı aracı, *Whitehead Torpedo* 4
Şekil 1.3 : Su altı yer haritasının görüntüsünü almakta olan bir OSA 6
Şekil 1.4 : Hücum halindeki bir harp torpidosu 7
Şekil 1.5 : C-SCOUT aracının ful konfigürasyon hali 9
Şekil 1.6 : C-SCOUT aracının temel konfigürasyon hali 9
Şekil 1.7 : SNUUV I otonom su altı aracı 10
Şekil 1.8 : ISIMI Otonom su altı aracı 11
Şekil 1.9 : REMUS Su altı aracını kontrol eden programın kullanıcı ara yüzü 12
Şekil 1.10 : REMUS Otonom su altı aracı 13
Şekil 1.11 : Milli AUV otonom su altı aracı 14
Şekil 1.12 : ÇANAKKALE Otonom su altı aracı 15
Şekil 1.13 : GMK-C Otonom su altı aracı 16
Şekil 2.1 : Autosub otonom su altı aracı 19
Şekil 2.2 : Autosub Otonom su altı aracının alt sistemleri 20
Şekil 2.3 : NACA 0015 Hidrofoili..... 22
Şekil 2.4 : Autosub otonom su altı aracının kanatçık konfigürasyonu 22
Şekil 3.1 : Hidrodinamik eksen takımı 26
Şekil 3.2 : Dünya eksen takımından gövde eksen takımına geçişte kullanılan Euler açılarının sırası 28
Şekil 5.1 : Doğrusal çekme tankı test düzeneği 50
Şekil 5.2 : Düzlemsel hareket mekanizması test düzeneği 51
Şekil 5.3 : Sıfır hücum açısında saf yunuslama hareketi 52
Şekil 5.4 : Sıfır yunuslama açısal hızında düşey öteleme hareketi 52
Şekil 5.5 : Döner kol mekanizması test düzeneği şematik resmi ve görseli 53
Şekil 5.6 : Döner kol test mekanizmasındaki döner kol 54
Şekil 5.7 : Konileme hareket mekanizması test düzeneği 55
Şekil 6.1 : Autosub su altı aracının katı model görüntüsü..... 57
Şekil 6.2 : Autosub'ın statik hidrodinamik analizleri için oluşturulan akış hacmi.. 58
Şekil 6.3 : Autosub'ın kenar, yüzey ve hacim çözüm ağı oluşturma süreci..... 59
Şekil 6.4 : Gambit çözüm ağı oluşturma programı kullanıcı ara yüzü 59
Şekil 6.5 : Sınır tabakanın fiziksel gösterimi 61
Şekil 6.6 : Autosub aracı için tanımlanan sınır tabaka ağ yapısı 61
Şekil 6.7 : TGrid 5.0.6 çözüm ağı oluşturma programı kullanıcı ara yüzü 62
Şekil 6.8 : ANSYS Fluent 13.0 HAD analiz programı kullanıcı ara yüzü 64
Şekil 6.9 : HAD analiz sürecinin akış diyagramı 65
Şekil 7.1 : DARPA denizaltı modeli 68
Şekil 7.2 : DARPA denizaltı modeli teknik resmi 69
Şekil 7.3 : DARPA modelinin yalın gövde konfigürasyonu 69
Şekil 7.4 : DARPA modelinin gövde artı yelken konfigürasyonu 70
Şekil 7.5 : DARPA modelinin gövde artı yelken artı kanatçık konfigürasyonu 70

Şekil 7.6 : Yüzey çözüm ağı oluşturulmuş DARPA modeli ful konfigürasyonu. ... 71
Şekil 7.7 : DARPA modeli için oluşturulmuş sınır tabaka ağları 72
Şekil 7.8 : DARPA modeline ait akış hacmi için oluşturulan çözüm ağı yapısı 72
Şekil 7.9 : Hücum açısının ve manevra hareketinin olmadığı bir seyir koşulu için tanımlana sınır koşulları. 73
Şekil 7.10 : DARPA yalın gövde konfigürasyonunun basınç katsayısı karşılaştırmalı grafikleri 74
Şekil 7.11 : DARPA yalın gövde konfigürasyonunun sürtünme kuvveti katsayısı karşılaştırmalı grafikleri 75
Şekil 7.12 : DAPRA gövde artı yelken konfigürasyonunun sürtünme kuvveti katsayısı karşılaştırmalı grafikleri 75
Şekil 7.13 : DAPRA gövde artı yelken konfigürasyonunun basınç katsayısı karşılaştırmalı grafikleri 76
Şekil 7.14 : DARPA modelinin kanatçıklarında belirlenmiş istasyon yerleri. 76
Şekil 7.15 : Kanatçığın 1. istasyon noktasında basınç katsayısı dağılımı 77
Şekil 7.16 : Kanatçığın 2. istasyon noktasında basınç katsayısı dağılımı 77
Şekil 7.17 : Kanatçığın 3. istasyon noktasında basınç katsayısı dağılımı 78
Şekil 7.18 : DARPA modeli üzerinde oluşan hidrodinamik basınç dağılımı görseli 78
Şekil 7.19 : Autosub otonom su altı aracı katı modeli 79
Şekil 7.20 : Autosub aracı yüzey çözüm ağı yapısı 80
Şekil 7.21 : Autosub aracı için tanımlanan sınır tabaka ağ yapısı 80
Şekil 7.22 : Autosub aracı için tanımlanan hacim ağ yapısı 81
Şekil 7.23 : Hücum açılı bir HAD analiz koşulu İçin tanımlanan sınır koşulları 81
Şekil 7.24 : Sürükleme kuvveti katsayısının, w' hız oranına göre değişim grafiği .. 83
Şekil 7.25 : Z Yönündeki kuvvet katsayısının, w' hız oranına göre değişim grafiği 83
Şekil 7.26 : Yunuslama momenti katsayısının, w' hız oranına göre değişim grafiği 84
Şekil 7.27 : Autosub aracının üzerinde oluşan basınç dağılımı 84
Şekil 7.28 : Autosub su altı aracının döner kol testlerinin yapıldığı deney havuzu . 86
Şekil 7.29 : Autosub aracının bir dönüş yarıçapı ile dönme hareketinin benzetimi. . 87
Şekil 7.30 : Autosub otonom su altı aracının dinamik HAD analizleri için oluşturulan yüzey çözüm ağı 88
Şekil 7.31 : Autosub aracının sınır tabaka ağ yapısı 88
Şekil 7.32 : Autosub aracının bir dönüş yarıçapı ile dönme hareketinin benzetiminin yapıldığı çözüm ağı yapısı. 89
Şekil 7.33 : Denek taşı çalışmasındaki sapma açısal hızlarına göre hesaplanan sapma momenti değerlerinin değişimi 91
Şekil 7.34 : Döner kol mekanizması benzetimi sonucunda akış hacmi ve model üzerinde oluşan hız dağılımı 92
Şekil 8.1 : İvmeli hareket yapan küre için polar koordinat takımı 94
Şekil 8.2 : Ek su kütlesi hesabı geliştirilen elipsoit geometrisi 96
Şekil 8.3 : Yatay kuyruklar için tanımlanan parametrik ifadeler 99
Şekil 8.4 : Düz plaka için $k'p$'ın açıklık oranı ile değişimi 101
Şekil 9.1 : Autosub otonom su altı aracı hidrodinamik yük dağılımı 107
Şekil 9.2 : Autosub'ın farklı hızlarda sahip olduğu sürükleme kuvveti değerleri 108
Şekil 9.3 : Autosub Aracının $C_d -$ Reynolds sayısı grafiği 109
Şekil 9.4 : Temel geometrik cisimler için $C_d -$ Reynolds değişimi 110
Şekil 9.5 : Eksenel kuvvetin farklı hız kademelerinde hücum açısı ile değişimi . 111
Şekil 9.6 : Eksenel kuvvetin farklı hız kademeleri için δ_e ile değişimi 111
Şekil 9.7 : Sapma kuvvetinin farklı hız kademelerinde sapma açısı ile değişimi . 113
Şekil 9.8 : Sapma kuvvetinin farklı sapma açılarında δ_r ile değişimi 114

Şekil 9.9 : Sapma kuvvetinin farklı seyir hızlarında δ_r ile değişimi 114
Şekil 9.10 : Yunuslama momentinin farklı seyir hızlarında hücum açısı ile değişimi 116
Şekil 9.11 : Yunuslama momentinin farklı kontrol yüzeyi sapma açılarında hücum açısı ile değişimi 117
Şekil 9.12 : Yunuslama momentinin farklı hızlarda kontrol yüzeyi sapma açısı ile değişimi 117
Şekil 9.13 : Autosub Aracının yunulama manevrası için oluşturulan akış hacmi. .. 120
Şekil 9.14 : Farklı hızlarda yunuslama momentinin yunuslama açısal hızına göre değişimi. 122
Şekil 9.15 : Farklı hızlarda düşey öteleme kuvvetinin yunuslama açısal hızına göre değişimi. 124
Şekil 9.16 : Yuvarlanma açısal hızının tanımlanması için oluşturulan akış hacmi. 127
Şekil 9.17 : Çeşitli hızlarda hareket eden Autosub'ın yunuslama açısal hızına göre yunuslama momenti değişimi..... 129
Şekil 9.18 : Çeşitli hızlarda hareket eden Autosub'ın yunuslama açısal hızına göre sapma momenti değişimi..... 130
Şekil 10.1 : Autosub aracının 10 Knot seyir hızında farklı hücum açılarında sahip olduğu yunuslama momenti katsayıları..... 137
Şekil 10.2 : Yunuslama momenti ve düşey öteleme kuvvetinin hücum açılarına göre değişimi. 138
Şekil 10.3 : Autosub aracının hidrodinamik merkezi ve negatif stabilite marjını ... 140
Şekil 10.4 : Autosub aracının 10 Knot seyir hızında farklı sapma açılarında sahip olduğu sapma momenti katsayıları..... 141
Şekil 10.5 : Autosub aracının sapma manevrası 144
Şekil 10.6 : Pozitif $\boldsymbol{\delta_r}$ komutu ile sapma manevrasının notasyonu 144

SEMBOL LİSTESİ

X : İlerleme kuvveti

Y : Sapma kuvveti

Z : Düşey öteleme kuvveti

K : Dönme momenti

M : Yunuslama momenti

N : Sapma momenti

u : İlerleme doğrusal hızı

v : Sapma doğrusal hızı

w : Düşey öteleme doğrusal hızı

p : Dönme açısal hızı

q : Yunuslama açısal hızı

r : Sapma açısal hızı

$\boldsymbol{\alpha}$ **:** Hücum açısı

$\boldsymbol{\beta}$ **:** Sapma açısı

$\boldsymbol{\phi}$ **:** Yuvarlanma açısı

$\boldsymbol{\Phi}$ **:** Yuvarlanma euler açısı

$\boldsymbol{\theta}$ **:** Yunuslama euler açısı

$\boldsymbol{\psi}$ **:** Sapma euler açıları

η : Pozisyon vektörü

γ : Oryantasyon vektörü

ζ : Doğrusal hız vektörü

υ : Açısal hız vektörü

τ : Kuvvet vektörü

ς : Moment Vektörü

ω : Açısal hız

$\dot{\boldsymbol{u}}$ **:** X ekseni yönündeki ivme

$\dot{\boldsymbol{v}}$ **:** Y ekseni yönündeki ivme

$\dot{\boldsymbol{w}}$ **:** Z ekseni yönündeki ivme

R : Dönme yarıçapı

$\mathbf{H_x}$ **:** X yönündeki açısal momentum

$\mathbf{H_y}$ **:** Y yönündeki açısal momentum

$\mathbf{H_z}$ **:** Z yönündeki açısal momentum

$\mathbf{I_x}$ **:** Aracın X eksenine göre eylemsizlik momenti

$\mathbf{I_y}$ **:** Aracın Y eksenine göre eylemsizlik momenti

$\mathbf{I_z}$ **:** Aracın Z eksenine göre eylemsizlik momenti

$\boldsymbol{X'}$ **:** Eksenel kuvvet katsayısı

$\boldsymbol{Y'}$ **:** Sapma kuvveti katsayısı

$\boldsymbol{Z'}$ **:** Düşey öteleme kuvveti katsayısı

$\boldsymbol{K'}$ **:** Yuvarlanma momenti katsayısı

$\boldsymbol{M'}$ **:** Yunuslama momenti katsayısı

$\boldsymbol{N'}$ **:** Sapma momenti katsayısı

$\boldsymbol{l}$ **:** Aracın boyu

$\boldsymbol{\rho}$ **:** İçinde hareket edilen sıvının yoğunluğu

$\boldsymbol{U_0}$ **:** Serbest akım hızı

$\boldsymbol{u'}$ **:** İlerleme doğrusal hızının serbest akım hızına oranı

$\boldsymbol{v'}$ **:** Sapma doğrusal hızının serbest akım hızına oranı

$\boldsymbol{w'}$ **:** Düşey öteleme doğrusal hızının serbest akım hızına oranı

$\boldsymbol{p'}$ **:** Yuvarlanma açısal hızının serbest akım hızına oranı

$\boldsymbol{q'}$ **:** Yunuslama açısal hızının serbest akım hızına oranı

$\boldsymbol{r'}$ **:** Sapma açısal hızının serbest akım hızına oranı

$\boldsymbol{X_0}$ **:** Başlangıç konumundaki ilerleme kuvvetinin değeri

$\boldsymbol{x_G}$ **:** Ağırlık merkezinin X doğrultusundaki konumu

$\boldsymbol{y_G}$ **:** Ağırlık merkezinin Y doğrultusundaki konumu

$\boldsymbol{z_G}$ **:** Ağırlık merkezinin Z doğrultusundaki konumu

m : Aracın kütlesi

$\dot{\boldsymbol{p}}$ **:** Yuvarlanma açısal ivmesi

$\dot{\boldsymbol{q}}$ **:** Yunuslama açısal ivmesi

$\dot{\boldsymbol{r}}$ **:** Sapma açısal ivmesi

$\boldsymbol{\delta e}$ **:**Yatay kontrol yüzeyi sapma açısı

$\boldsymbol{\delta r}$ **:** Düşey kontrol yüzeyi sapma açısı

$\boldsymbol{\delta a}$ **:** Yuvarlanma momenti kontrolünü sağlayan kontrol yüzeyi sapma açısı

$\boldsymbol{W}$ **:** Aracın ağırlığı

$\boldsymbol{B}$ **:** Aracın hidrostatik kaldırma kuvveti

$\mathbf{I_{xz}}$ **:** Aracın XZ eksenlerine göre çarpım atalet momenti

$\mathbf{I_{yz}}$ **:** Aracın YZ eksenlerine göre çarpım atalet momenti

$\mathbf{I_{xy}}$ **:** Aracın XY eksenlerine göre çarpım atalet momenti

F **:** Kuvvet

$\boldsymbol{x_B}$ **:** Hidrostatik kaldırma merkezinin X doğrultusundaki konumu

$\boldsymbol{y_B}$ **:** Hidrostatik kaldırma merkezinin Y doğrultusundaki konumu

$\boldsymbol{z_B}$ **:** Hidrostatik kaldırma merkezinin Z doğrultusundaki konumu

Re **:** Reynolds sayısı

$\boldsymbol{\alpha_c}$ **:** Koniklik açısı

ν **:** Kinematik viskozite

$\Delta \boldsymbol{y}$ **:** Sınır tabaka ilk kalınlığı

$\boldsymbol{C_D}$ **:** Sürükleme kuvveti katsayısı

$\boldsymbol{C_Z}$ **:** Düşey öteleme kuvveti katsayısı

$\boldsymbol{C_M}$ **:** Yunuslama momenti katsayısı

$\boldsymbol{\varphi}$ **:** Hız potansiyeli

$\boldsymbol{I}$ **:** Cisim yer değiştirdiğinde hareket ettirdiği suyun hacmi

$\boldsymbol{\nabla}$ **:** Laplace operatörü

$\boldsymbol{m_{df}}$ **:** Modelin taşırdığı su kütlesi

$\boldsymbol{S_b}$ **:** Gövdenin maksimum kesit alanı

$\boldsymbol{c_r}$ **:** Kontrol yüzeyi kök veter uzunluğu

$\boldsymbol{c_t}$ **:** Kontrol yüzeyi uç veter uzunluğu

$\boldsymbol{b}$ **:** Kontrol yüzeyi genişliği

AR **:** Açıklık oranı

S **:** Yüzeyi alanı

$\boldsymbol{I_{y_{df}}}$ **:** Gövde tarafından taşırılan suyun y eksenine göre atalet momenti

$\boldsymbol{X_{ncb}}$ **:** Su altı aracının hacim merkezinin burun noktasına olan X uzaklığını

$\boldsymbol{X_{ncg}}$ **:** Su altı aracının ağırlık merkezinin burun noktasına olan X uzaklığını

$\boldsymbol{X_{nht}}$ **:** Su altı aracının yatay kuyruğunun hacim merkezinin aracın burun noktasına olan X uzaklığı

$\boldsymbol{Z_{uct}}$ **:** Su altı aracının düşey kuyruğunun hacim merkezinin aracın ağırlık merkezine olan düşey uzaklığı

$\boldsymbol{k'_p}$ **:** Düz plaka için ek su ataleti katsayısı

$\boldsymbol{V_\infty}$ **:** Aracın seyir hızı

SU ALTI ARAÇLARI İÇİN YENİ GELİŞTİRİLEN HİDRODİNAMİK MODELLEME YÖNTEMLERİ KULLANILARAK OTONOM BİR SU ALTI ARACININ HİDRODİNAMİK KARAKTERİSTİĞİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

İnsansız su altı araçları günümüzde farklı amaçlar için kullanılabilen, sahip oldukları görevler ve alt sistemler sebebiyle farklı mühendislik disiplinlerini bir arada bulunduran kompleks sistemlerdir.

Bir su altı aracının hangi amaç için kullanılacağına göre ilk olarak aracın teknik isterleri belirlenir. Aracın teknik isterleri sistem ve alt sistem seviyesinde ayrıklaştırılarak her bir sistemin kendi içinde tasarım gereksinimleri ortaya çıkmaktadır. Belirlenen sistem seviyesi ve alt sistem seviyesi gereksinimler doğrultusunda tasarlanacak bir su altı aracında farklı mühendislik disiplinlerin birbirleri ile kapalı çevrim iletişim halinde olmaları gerekmektedir. Bu süreçte su altı araçlarının sistem seviyesinde değerlendirilebilecek en temel mühendislik alanı hidrodinamiktir.

Bir su altı aracına tanımlanan görevin yerine getirilmesinde hidrodinamik bölümü çok etkin bir rol oynamaktadır. Su altı aracının sahip olması istenilen özelliklere göre hidrodinamik tasarım belirlenir ve özgünleştirilerek, iyileştirilir. Hidrodinamik tasarımın nihai hale gelebilmesi için, o tasarımın hidrodinamik karakteristiğinin ortaya çıkartılması, hidrodinamik performansının belirlenmesi ve bu performansın tasarım gereksinimlerini karşılayabildiğinin gösterilmesi gerekmektedir. Bu iteratif sürecin içerisindeki en önemli aşamalardan biri aracın hidrodinamik karakteristiğinin ortaya çıkartılırken yapılan hidrodinamik katsayıların hesaplama işlemidir.

Hidrodinamik katsayılar aracın hidrodinamik karakteristiğini belirleyen en önemli değerlerdir. Şöyle ki hidrodinamik performansın belirlenebilmesi ve tasarıma geri besleme yapılabilmesi için o aracın hidrodinamik katsayılarından oluşan veri tabanının oluşturulması ve performans hesaplamalarına beslenmesi gerekmektedir. Hidrodinamik tasarım da ancak, performans hesaplamaları sonucunda kabul&red edilebilir veya iyileştirilebilir. Dolayısıyla, hidrodinamik katsayıların doğru bir şekilde elde edilmesi, gerekli tasarımın yapılabilmesi ve istenilen performans karakteristiğine sahip olunabilmesi açısından oldukça önemlidir.

Hidrodinamik katsayılar genel olarak üç farklı yöntem ile elde edilmektedir. Bunlar; deneysel yöntemler, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemleri ve ampirik yöntemlerdir.

Deneysel yöntemler en güvenilir ve sağlıklı sonuç veren yöntemler olmasına rağmen, ciddi bir maddi kaynak gerektirmeleri, kurulumu ve kullanımı için de ciddi bir iş gücü gerektirmeleri sebebi ile her zaman tercih edilememektedir. Dolayısıyla deneysel yöntemler yerine alternatif yöntemler olan HAD yöntemleri ve ampirik yöntemler hidrodinamik tasarım ve analiz çalışmalarında kullanılabilmektedir.

Bu çalışmada da, otonom bir su altı aracının hidrodinamik katsayıları HAD yöntemleri ve ampirik yöntemler kullanılarak hesaplanmıştır.

Yapılan çalışmada öncelikli olarak su altı dünyasının özelliklerinden bahsedilmiş ve su altı dünyasında hareket eden cisimler için kullanılan hareket denklem setleri tanıtılmıştır. Bu denklem setleri kullanılarak hangi hidrodinamik katsayıların bizim sistemimiz için önemli oldu ve hesaplanması gerektiği incelenmiştir. Ardından otonom bir su altı aracı için hidrodinamik katsayılarının hesaplanması ve veri tabanı oluşturma işlemlerine başlanmıştır.

Kullanılacak hesaplama yöntemlerinin bizim sistemimiz için doğru çalıştığından emin olmak adına, denek taşı çalışmaları yapılmış ve kullanılacak hesaplama modelleri doğrulanmıştır.

Doğrulanan HAD ve ampirik hesaplama yöntemleri kullanılarak otonom su altı aracının altı serbestlik derecesinde hidrodinamik veri tabanı oluşturulmuştur.

Oluşturulan veri tabanı kullanılarak aracın stabilite ve performans karakteristiği incelenmiş ve tasarım ile ilgili yorumlara varılmıştır.

Ayrıca havacılık dünyasında pek karşılaşmadığımız ancak, su altı dünyasına özgü bazı yeni terimlerden bahsedilmiştir. Bu terimlerin, sistem dinamiği üzerine olan etkisi incelenmiş ve hesaplama yöntemleri üzerinde durulmuştur. Geliştirilen ampirik hesaplama yöntemleri kullanılarak otonom su altı aracı üzerinde oluşan bu yeni terimler incelenmiş ve hesaplanmıştır.

Yapılan bu çalışmalar ışığında, su altı dünyasında hareket eden araçlar için kullanılması gereken hidrodinamik denklem setleri ve dikkate alınması gereken bazı hidrodinamik kavramlar belirlenmiştir. Ayrıca, oluşturulan denklem setlerinde bulunan hidrodinamik katsayıların hesaplanması için su altı araçlarına özgü yeni hidrodinamik modelleme yöntemleri oluşturulmuştur. Bu yöntemler kullanılarak su altında hareket eden herhangi bir aracın 6 serbestlik derecesinde hidrodinamik veri tabanı hazırlanabilecek ve performans hesaplamaları yapılarak hidrodinamik karakteristiği belirlenebilecektir. Belirlenen hidrodinamik karakateristik istenilen performans gereksinimlerini karşılayabiliyorsa tasarım doğrulanacak aksi halde, tasarım optimizasyon yöntemlerine gidilecektir.

INVESTIGATION OF HYDRODYNAMIC CHARACTERISTIC OF AN AUV BY USING NEW DEVELOPED HYDRODYNAMIC MODELING TECHNIQUES FOR UNDERWATER VEHICLES

SUMMARY

In these days unmanned underwater vehicles (UUV) could be used for different purpose those are complex systems and contain different engineering expertise area because of their mission profiles and subsystems. In order to define the area of usage of an UUV, firstly design requirements of UUV must be determined. Each design requirements of subsystems are determined by separating the design requirements of whole system. According to these system and subsystem requirements of UUV, different engineering areas should have closed loop interaction with each other. In this process, one of the main engineering areas in the system design is the hydrodynamic.

Hydrodynamic design is determined, developed and optimize according to desired specifications of UUV and also hydrodynamic design has an effective role in the validation of missions of UUVs. In order to complete hydrodynamic design of an UUV, hydrodynamic characteristic of the design must be determined, performance calculation of the hydrodynamic form must be performed and the design must be validated. In this iterative process, one of the most important levels is the calculation of the hydrodynamic coefficients.

In the hydrodynamic coefficients, which mostly affect the maneuverability of an AUV, are static and the linear damping coefficients. A rectangular cartesian coordinate system, attached to the center of gravity of vehicle, is used in the project. The three components of the hydrodynamic force along the directions x, y, z are denoted by X, Y, Z respectively, and the three components of the hydrodynamic moments by L, M, N. The path of the vehicle is then assumed to be intentionally altered slightly by deflection of various control surfaces on the vehicle. The three components of force X, Y, Z and the three components of the moments L, M, N are expanded up to second order terms in the linear velocities; u, v, w and the angular velocities; p, q, r where these velocities now represent perturbations to the equilibrium condition of steady state forward motion. The expression for the forces and moments are derived from "*Standard Equations of Motion for Submarine Simulations*".

There are many kinds of hydrodynamic coefficients in the standard equations of motion for submarine simulations, which could be evaluated to describe the dynamics of the vehicle. In this project static, linear damping, and nonlinear damping coefficients are calculated by using CFD methods and linear inertia coefficients are calculated with empirical methods. Firstly, CFD analysis process would be investigated. Hydrodynamic coefficients are the main significative factors that strongly affect the performance, controllability and maneuverability characteristics of an autonomous underwater vehicle. These coefficients are generally obtained by different methods such as experimental, numerical and empirical.

Although the experimental methods are the most reliable one among these, hydrodynamic coefficients are not generally obtained experimentally; due to financial problems, time-related problems and deficiencies of model basins. Another approach by which these coefficients can be obtained is the numerical methods, such as computational fluid dynamics. In this project, all hydrodynamic coefficients of an AUV are calculated in six degree of freedom, by using computational and empirical methods. Firstly, a new hydrodynamic calculation model for underwater vehicles is created and verified. After the verification of CFD solution model, hydrodynamics database of an AUV is constituted and then stability and performance characteristics are determined. Hydrodynamic coefficients are the most important parameters to determine the hydrodynamic characteristic of any UUV. In order to determine the hydrodynamic performance and give feedbacks to hydrodynamic design to optimization, hydrodynamic database must be prepared and the performance calculation must be carried out. Because of that reason, according to performance calculation the hydrodynamic design could be accepted or rejected. Consequently, calculation of the hydrodynamic coefficient properly is very important in order to perform required design and gets the desired performance values. Hydrodynamic coefficients are calculated in three different methods commonly. These are experimental methods, computational fluid dynamics (CFD) methods and empirical methods. In these alternatives, in spite of the fact that the most reliable methods to calculate hydrodynamic coefficients are the experimental techniques, also these are the most expensive ones to determine the hydrodynamic coefficients. Because of this reason, experimental methods cannot be used in every design steps of the AUVs. Instead of experimental methods, numerical (computational fluid dynamics) and empirical techniques can be used. To calculate the hydrodynamic coefficients, new CFD calculation models and empirical methods can be developed by using test-case documents, which have experimental datum to compare and verify the solutions.

In the first step of the project, special features of underwater world are explained and equations of motion are introduced for underwater vehicles. Sensitive hydrodynamic coefficients for the project are investigated in these equations of motion, then calculation and preparation process of the hydrodynamic database of an AUV gets started. In this project, fundamental hydrodynamic coefficients in six degree of freedom such as surge, heave, sway forces and pitch, yaw and roll moments are calculated for different cruise conditions. Also, stability and performance characteristics of an AUV are determined. In order to calculate these coefficients, linear and nonlinear steady state computational fluid dynamics (CFD) analyses are done. But before this step, CFD solution model of hydrodynamic calculations must be verified, to get correct results from CFD analyses. In order to verify the solution methods of CFD calculation model, test-case documents are studied. These documents include geometry of any underwater vehicle, test conditions and test results. For the verification study, hydrodynamic test results and geometry of DARPA Suboff Model is used. In order to start the hydrodynamic analysis process firstly, solid model of an AUV must be created. The solid model is created in CATIA 3D modeling software and then fluid domain is constituted. In order to constitute the grid of the AUV GAMBIT 2.4 software is used. Edge, surface and volume meshes of the geometry are created in GAMBIT software. Also, to define the boundary layer over the geometry TGRID 5.0 software is used. At the end of this process, fluid domain and grid files of an AUV gets ready to perform hydrodynamic analyses in CFD analysis software.

In the CFD analysis processes ANSYS Fluent 13.0 software is used. Some characteristic features for hydrodynamic analyses as a solver model, turbulence model, boundary conditions, Y+ values, characteristic features for the fluid and solution techniques are defined in Fluent 13.0. After the complementation of setup case for hydrodynamic analyses, lots of CFD analyses are carried out for different cruise conditions and hydrodynamic database is constituted.

In order to verify CFD and empirical calculation techniques of hydrodynamic coefficients, test case studies are performed and the calculation model which will be used in this study is verified. In this study, a comprehensive study has been made to verify the CFD tools for the hydrodynamic analysis of the underwater bodies such as submarines. In order to evaluate the capabilities and accuracy of the tools used in this project, Darpa Suboff model has been selected as a test case, because of the availability of extensive validation data for field variables as well as for integral quantities. The experimental data of Darpa Suboff is available at David Taylor Research Center. By using the verified CFD and empirical calculation methods, hydrodynamic database of an AUV is prepared in six degree of freedom. Through the hydrodynamic database, stability and performance calculation of an AUV is performed and stability and performance characteristic of the AUV are determined. Also, some difference between the aerodynamics and hydrodynamics are studied and defined some characteristic features of hydrodynamic are introduced. Sensitivity of these new terms to the system dynamics is investigated and the calculation techniques are developed to calculate these special terms for an AUV.

Furthermore, a comprehensive study has been made to constitute hydrodynamic database of Autosub AUV in six degree of freedom. Different static and dynamic hydrodynamic analyses are performed of Autosub for different cruise conditions. In static hydrodynamic analyses, cruise speeds, control surface deflections and angle of attacks in different planes are variable parameters. However, rotational and acceleration maneuvering conditions are simulated in dynamic hydrodynamic analyses.

Calculated hydrodynamic forces and moments for different cruise conditions can be used in conceptual design process of Autosub AUV model. According to pitching moment coefficients versus angle of attack graphics for different velocities, longitudinal static stability of the vehicle is discussed. Center of pressure locations of the vehicle for different angle of attacks is determined and normal forces distribution of each part of the vehicle, which cause to pitching moment, is extracted and static stability of Autosub is discussed. For the hydrodynamic analyses in 6DOF, verified CFD methods are used.

In summary, in the framework of the performed studies, hydrodynamic equations of motion for underwater vehicles are developed and some considerable features of underwater world are introduced. Also new calculation model, unique to underwater world are investigated for hydrodynamic coefficients which are sensitive in the equations of motions. By using these developed CFD and empirical calculation methods, hydrodynamic database of any underwater vehicles could be calculated and through the database hydrodynamic performance characteristics could be determined. If the determined performance parameters could cover the desired requirements, the hydrodynamic design gets accepted, if the determined performance parameters could not cover the desired design requirements, the hydrodynamic design must be optimized.

1. GİRİŞ

Son yıllarda gelişen teknoloji ile beraber insansız araçların kullanımı her sektörde giderek artmaktadır. Böylelikle hem riskli görevler için insan sağlığı riske atılmamış olmaktadır, hem de insan bedeninin yapamayacağı veya büyük hata oranı ile yapabileceği görevler insansız araçlar sayesinde başarılı bir biçimde yerine getirilebilmektedir. Her insansız aracın kullanım alanlarına göre teknik isterleri ve tasarım gereksinimleri vardır. Özellikle insansız olan ve belirli bir seyir dinamiğine göre otopilot kontrolünde hareket eden araçların teknik isterleri, üzerinde ciddi çalışılması gerek konulardandır. İnsansız araçların teknik isterlerinin karşılanabilmesi için o teknik isterleri yerine getirebilecek tasarımların oluşturulması ve doğrulanması gerekmektedir. Doğru tasarımın yapılabilmesi ve doğrulanabilmesi için, tasarımı meydana getiren ana bileşenlerin iyi kurgulanmış ve analiz edilmiş olması gerekmektedir. Bu ana bileşenlerin başında gelen çalışma alanlarında biri de hidrodinamik tasarım ve analiz faaliyetleridir. Hidrodinamik bilimi, akışkanlar dinamiğinin bir alt dalıdır ve sıkıştırılamaz akışkanlar ile ilgilenmektedir. Genel olarak hidrodinamik, sıvıya batırılmış katı cisimler üzerinde, onların hareketiyle ilgili olarak sıvıların gösterdiği direnci, direncin oluşmasının sebeplerini ve neden olduğu etkileri, sıvıların sahip olduğu karakteristik özellikleri ve sıvıların hareketini inceleyen bilim dalıdır. Su altı dünyasının etkin kullanılabilmesi için, hidrodinamik etkilerin dikkate alınarak planlama yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda yapılan su altı araştırmaları için kullanılan en önemli araçlardan biri otonom su altı araçlarıdır (OSA). OSA'ların su altı dünyasında etkin kullanılabilmesi için yapılan çalışmalar her geçen gün önem kazanmaktadır. OSA'lar bilimsel, ticari ve askeri alanlarda farklı amaçlar için sıklıkla kullanılabilirken, kullanıldıkları amaca göre farklı tasarımlara ve performans değerlerine sahip olurlar [1,2]. Görev tanımlarının karşılanabilmesi için ise geliştirilen OSA'ların hidrodinamik açıdan iyi tasarlanması ve analiz edilmesi gerekmektedir.

1.1 Otonom Su Altı Araçlarının Tanımı ve Kullanım Alanları

OSA'lar sahip oldukları veri işleme sistemleri, navigasyon sistemleri, kontrol sistemleri, otopilot algoritmaları ve güç yönetim sistemleri sayesinde farklı görevler için programlanabilen, çeşitli su altı koşullarında, uzaktan gerçek zamanlı insan kontrolü olmadan ve insansız seyir yapabilen belirli bir hidrodinamik forma sahip robotik araçlardır [3]. OSA'lar kontrol operatörleri ile periyodik olarak iletişim kurarak güdümlenebildiği gibi, devamlı olarak uydudan sinyal alarak kendilerine tanımlanan koordinatlar da gidebilirler. Bir takım OSA'lar ise sahip oldukları akustik sensörler sayesinde elde ettikleri su altı akustik bilgilerini işleyerek kendilerine otonom kontrol sağlarlar. Şekil 1.1'de görev halindeki bir OSA gösterilmektedir.



Şekil 1.1 : Görev halindeki bir otonom su altı aracı [42].

OSA'lar bilim adamlarına, askeri personele ve ticari amaçla kullanan insanlara kullanım amaçlarına göre çok büyük faydalar sağlamaktadırlar. Su altında insan vücudunun dayanamayacağı basınç ve sıcaklık ortamlarında OSA'lar görevlerini yerine getirebilir ve böylelikle insanların kendi başlarına ulaşamayacağı bölgelere OSA'lar sayesinde ulaşılabilmektedir. OSA'lar genel olarak modüler yapıda tasarlanırlar. Bu özellikleri sayesinde, farklı alt parçalar entegre edilerek veya alternatif konfigürasyonlara bürünerek aynı OSA farklı amaçlar için kullanılabilir. OSA'ların sahip oldukları bu özellik onlar üzerinden sağlanan faydayı arttırmakta ve

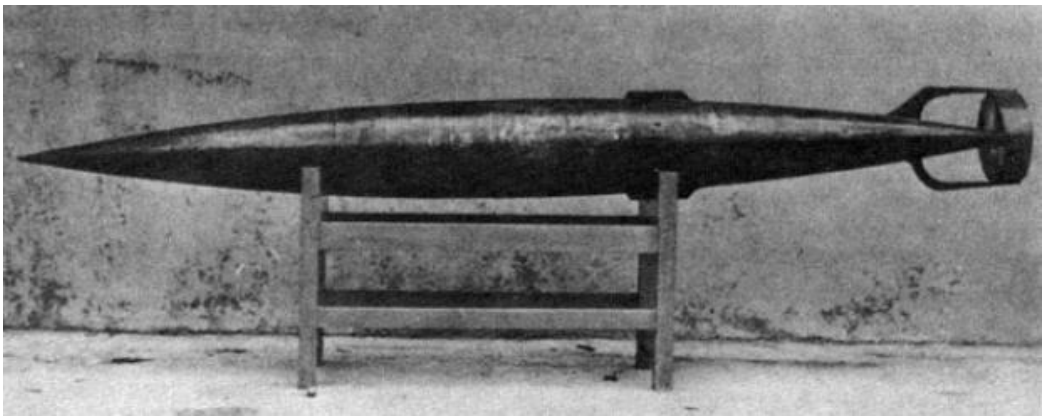
operasyon maliyetini azaltmaktadır. Görüldüğü gibi OSA'lar bilimsel çalışmalar, askeri operasyon, bilgi toplama ve alternatif ticari amaçlar için kullanılabilen çok fonksiyonlu su altı araçlarıdır. OSA'ların sınıflandırılması ve kullanım amaçları ile ilgili detaylı bilgi önümüzdeki bölümlerde verilecektir.

1.2 Otonom Su Altı Araçlarının Tarihçesi

Yakın geçmişimizde sıklıkla kullanılmaya başlanılan su altı araçlarının temeli aslında günümüzden yüzyıllar öncesine dayanmaktadır. Su altı araçları ile ilgili ilk varsayımlar ve çalışmalar kâğıt üstünde, kavramsal olarak *Leonardo Da Vinci* tarafından yürütülmüştür. O dönemde su altı testi yapılması imkânı olmadığından veya yapılsa bile güvenlik önlemleri açısında çok yetersiz koşullar olduğundan, yapılan çalışmalardan etkili sonuçlar alınamamıştır [4].

Ancak o dönemden yaklaşık üç yüz yıl sonra, 1775 yılında Amerikalı *Bushnell Kardeşler* tarafından ilk deniz altı tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen deniz altı tek kişilik oturma kapasitesinde, dar ve elipsoidal bir geometriye sahiptir. Ancak, üretimi gerçekleştirilmiş olan bu ilk deniz altı 1776 yılında New York Limanı'na yapılan saldırı sonucunda patlatılmış ve ortadan kaldırılmıştır. Deniz altı araçları alanındaki askeri çalışmalar bu tarihten sonra hızlanarak devam etmiştir. Deniz altı araçlarının yanı sıra paralelden, insansız su altı araçları ve su altı silah sistemleri alanlarında da gelişmeler gerçekleştirilmiştir [3,4].

Geçmişte fiziksel insan gücü, uzaktan kontrollü silah gücüne göre çok daha etkin durumda bulunuyorken günümüzde bu durum ters orantılı olarak değişmekte ve insan gücünün yerini otonom araçlar ve kontrollü silah teknolojileri almaktadır. Nitekim torpido, bu alanda tasarımı doğrulanmış ilk insansız su altı aracı olarak kabul edilebilir. Su altı dünyasında otonom araçların faaliyete sokulması ve işlevselliğinin artması yönündeki ilk çalışmaların ürünü *Whitehead Torpedo*'dur. Bu araç *Robert Whitehead* tarafından 19. yüzyılın ikinci yarısında geliştirilmiş ve su altı dünyasında insansız olarak tasarlanacak gelecek araçlar için bir ilk adım olmuştur [1,5]. Tasarlanan bu ilk su altı aracı sahip olduğu itki ve kontrol sistemleri açısından önem taşımaktadır. Aracın itki sistemi içten yanmalı motor ve bataryalardan beslenen elektrik sürücülerinden oluşmaktadır. Bu araç herhangi bir güdümü bulunmayan, bir mermi gibi hareket eden ve bir katı cisme çarptığı zaman patlayan bir sistemdir.



Şekil 1.2 : İlk insansız su altı aracı, *Whitehead Torpedo* [1].

Bu ve benzeri sistemlerin geliştirilmesine, su altı alanında ilkleri oluşturan Birleşik Devletler Deniz Muharebe Başkanlığı tarafından 18. Yüzyıldan günümüze kadar ciddi şekilde devam edilmiştir. Bu kapsamda bilimsel araştırma amacıyla geliştirilen ilk insansız su altı araçlarından biri *Stan Murphy* ve *Bob Francois* tarafından, Washington Üniversitesinde bulunan Uygulamalı Fizik Laboratuvarında, 1957 yılında geliştirilmiştir. Daha sonralarında ise, *Terry Ewart* tarafından *Special Purpose Underwater Research Vehicle* adıyla, Kuzey Kutbu bölgelerinde oşinografi verisi toplaması amacıyla ürün haline getirilmiştir. Geliştirilen ilk OSA'lar arasında gösterilen bir başka OSA ise 1970'lerde *Massachusetts Institute of Technology* Üniversitesi tarafından geliştirilmiştir [1-5,42].

1980'li yıllarda bilgisayar teknolojilerindeki gelişimler ve kompleks yazılımların ve kontrol algoritmalarının farklı sistemlere entegrasyonunun gerçekleşmesi sayesinde su altında hareket eden uzaktan kontrollü ve otonom araçlarının geliştirilmesi konusunda ciddi ilerlemeler sağlanmıştır. 1990'lı yıllarda operasyonel sistemler içeren OSA'lar, prototip hallerinden ürün haline getirilmeye başlanmıştır ve bu tarihlerden itibaren kendilerine tanımlanan görevleri yerine getirebilecek otonomluk kabiliyetine sahip olmaya başlamışlardır.

2000'li yıllara gelindiğinde ise otonom su altı araçları sahip oldukları derinlik ve akustik sensörleri sayesinde hedeflenme, pas geçme gibi özellikleri yerine getirebilirken aynı zamanda, hedefin yakınlığını tespit eden manyetik sensör ve kendine özelleştirilmiş görevleri için gereken sensörler ile de donatılmışlardır. Günümüzdeki OSA'lar otonom kontrol edilebilmeleri haricinde gerçek zamanlı komutlara göre de kontrol edilerek sürekli, komuta merkezi ile iletişim halinde bulunabilirler. Ancak, günümüzdeki bilimsel ve askeri gereksinimler su altı

araçlarının yüksek otonomluk derecesine ve teknik yeterliliğe sahip olması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Tarihte özellikle askeri ve bilimsel çalışmalar kapsamında OSA'lara duyulan ihtiyaç, OSA'ların tasarım ve geliştirme sürecine ivme kazandırmıştır. Günümüzde OSA'ların sahip oldukları üstün ve otonom özellikler insan gücünün daha etkin kullanılmasına olanak sağlamaktadır.

1.3 Robotik Su Altı Araçlarının Sınıflandırılması

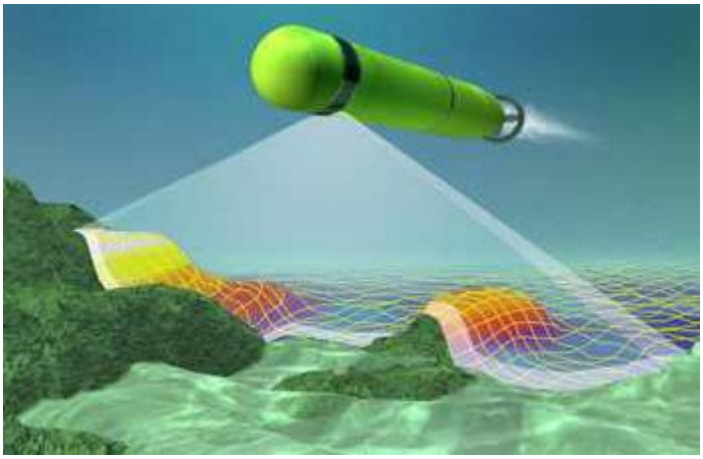
Robotik su altı araçları temelde iki alt guruba ayrılırlar. Bunlar; uzaktan kontrollü su altı araçları (*Remoteli operated underwater vehicle*, ROV) ve otonom su altı araçlarıdır. Uzaktan kontrollü su altı araçları operatör ile gerçek zamanlı iletişim kurarak ve operatörler tarafından anlık komutlar ile kontrol edilerek görevlerini yerine getirirler. Fakat OSA'larda böyle bir durum söz konusu değildir. OSA'lar sahip oldukları alt sistemler sayesinde, operatörlerden ile gerçek zamanlı komut almadan da görevlerini yerine getirebilirler. Uzaktan kontrollü su altı araçları OSA'lar gibi belirli bir hidrodinamik forma sahip değildirler. Ancak, bu araçların manevra kabiliyetleri ve hareketleri için sahip oldukları serbestlik dereceleri OSA'lardan daha fazla olabilmektedir. Bu sayede, batık veya deniz altı mağarası gibi çok dar ve karmaşık bölgelere kolaylıkla girebilir ve o bölgelerden veri sağlayabilirler. Fakat bu araçlar OSA'lar gibi yüksek hızda hareket edemediğinden ve otonom kontrol sistemleri olmadığından, kullanım alanları OSA'lar kadar geniş değildir [1,2]. Bu tez çalışmasında OSA'lar üzerinde çalışıldığından uzaktan kontrollü su altı araçlar ile ilgili ayrıntılı bilgi verilmeyecektir. Bunun yerine farklı OSA çeşitleri incelenecek ve çeşitli OSA'ların kullanıma alanlarından bahsedilecektir.

1.3.1 Otonom su altı araçlarının sınıflandırılması

OSA'lar sahip oldukları görev tanımlarına göre farklı tasarım konfigürasyonlarına sahip olurlar. OSA'ların tasarımı, tasarlanacak OSA'nın sahip olması beklenen, güvenilirlik, modülerlik, dayanıklılık ve seyir süresi özelliklerine göre özgünleştirilir. Farklı teknik isterleri karşılayabilmesine göre özgünleştirilmiş çeşitli OSA'lar, su altlarında değişik amaçlar için ve değişik uygulamalarda kullanılırlar. Bu uygulama alanlarını, bilimsel, askeri, ticari ve hobi olarak sınıflara ayırabiliriz [1,4].

1.3.1.1 Bilimsel araştırma amaçlı kullanılan otonom su altı araçları

Bilim ve araştırma ile ilgilenen insanların deniz altı bölgelerinde araştırma, inceleme yapması ve veri toplaması için OSA'lar çoğunlukla kullanılmaktadır. Özellikle okyanus ve kutup bölgelerinde OSA'lar, elde ettikleri su altı görüntüleri sayesinde su altı yer haritasının çıkartılmasında ve o bölgelerde inceleme yapılmasında çok aktif bir biçimde kullanılmaktadır. Ayrıca su altı bölgelerinde sıcaklık, tuzluluk, çözülmüş oksijen oranı gibi suyun karakteristik özellikleri ve oşinografi verisi elde etmek için de OSA'lar yoğunlukla kullanılabilmektedir. Buna ilaveten deniz altında var olan mikroskobik canlıların incelenmesinde ve onlar ile ilgili bilgi toplanmasında da OSA'ların aktif olarak kullanılmaktadır. Su altında kullanılacak olan OSA'ya, elde edilmek istenen veriye göre doğru sensör takılarak su altında istenilen alanında bilgi toplanabilir ve araştırma yapılabilir. Aşağıdaki resimde su altı yer haritasının görüntüsünü almakta olan bir OSA görülmektedir [1,6].



Şekil 1.3 : Su altı yer haritasının görüntüsünü almakta olan bir OSA [1].

1.3.1.2 Askeri amaçlı kullanılan otonom su altı araçları

Askeri alanda da OSA'lar oldukça etkin kullanılmaktadırlar. Örneğin riskli bir askeri bölgede mayın incelemesi yapmak için OSA'lar kullanılabilmektedir. Bunu haricinde askeri alanda OSA'ların en yaygın kullanılma alanı torpidolardır. Torpidolar OSA'lar gibi otonom kontrol sağlayabilen ve sahip oldukları alt sistemler sayesinde istenilen bölgeye gidebilen yüksek manevra kabiliyetine sahip modüler su altı araçlarıdır [1,5,6]. Bu araçlar, sahip oldukları alt bölümlere göre ikiye ayrılır. Konfigürasyonları içinde harp başlığı ve eğitim başlığı taşımasına göre bu araçlar; harp torpidosu ve eğitim torpidosu olarak iki farklı amaç için kullanılırlar. Harp

torpidosu patlayıcı amaçlıdır ve istenilen bölgeye güdümlenerek o bölgeye yönlendirilir Aşağıda hücum halinde olan bir harp torpido görülmektedir.



Şekil 1.4 : Hücum halindeki bir harp torpidosu [43].

Eğitim torpidoları ise, olası savaş anlarında torpidoların nasıl kullanılacağının eğitimini almak için kullanılan, harp başlığı olmayan torpidolardır. Askeri uygulamalar ölüm riskinin olduğu uygulamalar olduğu için, insansız araçların kullanılması insan sağlığı açısından oldukça önemlidir. Bu amaçla, dünya üzerindeki birçok ülkenin deniz kuvvetlerinde çeşitli konfigürasyonlarda torpidolar ve mayın arama araçları mevcuttur.

1.3.1.3 Ticari amaçlı kullanılan otonom su altı araçları

Ticari uygulamalarda OSA'ların kullanım alanlarını incelediğimizde, OSA'ların yoğunluklu olarak petrol ve gaz endüstrisinde kullanıldığı ortaya çıkmaktadır. Bu sektörlerde deniz tabanından petrol ve gaz çıkarmak için herhangi bir yapı kurulacağı zaman o bölgenin detaylı haritası elde edilmekte ve yer altı yapısına engebesiz ve petrol çıkarmak için gerekli donanımların rahatça kullanılabileceği su altı zeminleri tercih edilmektedir. Ayrıca OSA'lar sayesinde turistlik amaçlı batırılmış veya tarihte batmış yapıların yerleri belirlenerek o bölgelere dalış yapılabilmekte ve dalış turizmine katkı sağlanmaktadır [1,2].

1.3.1.4 Hobi amaçlı kullanılan otonom su altı araçları

Hobi amaçlı tasarlanan ve kullanılan OSA'larda bulunmaktadır. OSA'ların belirli görevleri yerine getirmesi üzerine yarışmalar düzenlenmektedir. Bu yarışmalara

öğrenci grupları veya tekil katılınabilmektedir. Bu kategoride farklı konfigürasyonlarda isteğe göre OSA'lar tasarlanabilip, kendilerine tanımlanan görevi yerine getirebilecek alt sistemler ile donatılabilirler. Ancak kişisel kabiliyet ve sınırlı imkânlar ile yapılan bu araçlar çok fonksiyonlu olamamaktadır ve önemli görevleri yerine getirmek amaçlı kullanılamamaktadır. Hobi amacıyla tasarlanan OSA'lar çoğunlukla anlık komuta sistemine göre güdülen, kendi kontrol sistemleri olmayan ve daha çok göl, havuz ve göletlerde kullanılan tipte OSA'lardır [1].

1.4 Ülkemizde ve Diğer Ülkelerde Bulunan Farklı Tipteki Otonom Su Altı Araçlarının İncelenmesi

Bir önceki bölümde anlatıldığı gibi farklı amaçlar için tasarlanan, değişik konfigürasyonlarda birçok OSA bulunmaktadır. Bu bölümde Türkiye'de ve Dünya üzerindeki çeşitli ülkelerde bulunan, farklı konfigürasyonlardaki çeşitli OSA'lar hakkında detaylı bilgi verilecektir.

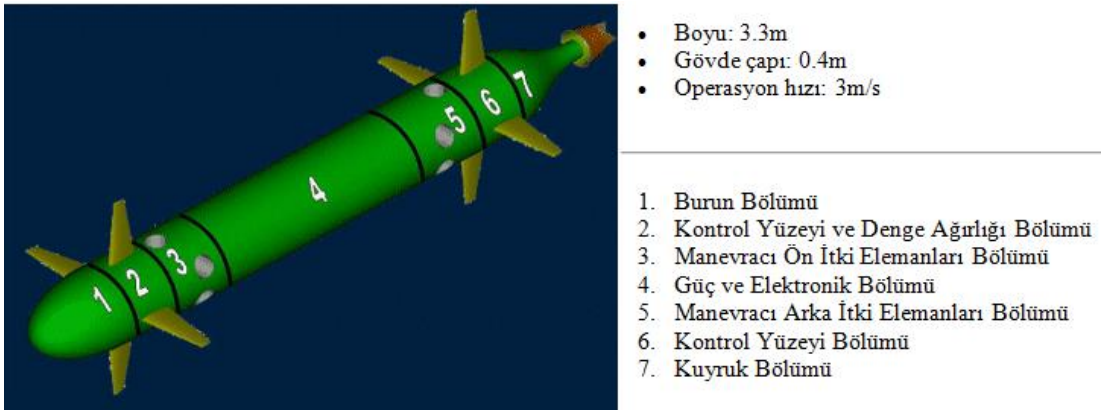
1.4.1 Dünya üzerinde çeşitli ülkelerde bulunan otonom su altı araçları

1.4.1.1 C-SCOUT Otonom su altı aracı

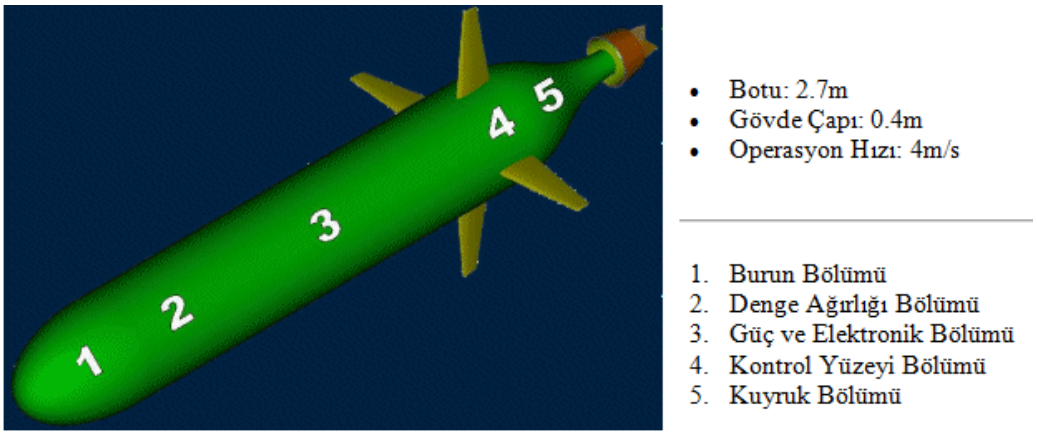
C-SCOUT (*Canadian Self-Contained Off-the-shelf Underwater testbed*) otonom su altı aracı Kanada, *Newnfoundland*'da bulunan *Memorial University of Newnfoundland ve National Research Council's Institute for Marine Dynamics* ortak girişimi ile *Offshore Enviromental Engineering Using Autonmous Underwater Vehicles* projesi kapsamında, bilimsel çalışmalar amaçlı geliştirilmiştir. Bu su altı aracı, üniversitede bulunan lisans ve lisansüstü öğrencileri su altı araçları ve bu araçların alt sistemleri hakkında uygulamalı ve deneysel bilgilerinin olması amacıyla üniversitede projelendirilmiştir. C-SCOUT su altı aracı tasarımı tamamlandıktan sonra, okyanus dibini görüntüleme, araştırma, inceleme, buz dağı profili çıkartma, oşinografik veri toplama ve mayın detektörü gibi farklı görevler için kullanılabilecektir. Dolayısıyla bu OSA, farklı görevleri yerine getirebilmesi adına modüler olarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu sayede OSA'nın alt modülleri değiştirilerek farklı konfigürasyonda su altı araçları elde edilebilmekte ve araç farklı su altı görevleri yerine getirebilecek konfigürasyona ulaşabilmektedir.

Değiştirilebilen alt modüller, elektronik bölümü, kontrol tahrik sistemleri, sahip olduğu çeşitli sensörler, denge sağlayıcı ağırlıklar ve itki elemanlarıdır. Ancak bu

OSA, sahip olduğu tüm konfigürasyonlarda uzun menzil seyir yapabilecek ve gerektiğinde hızlı gidebilecek türden bir hidrodinamik forma sahiptir. C-SCOUT'un tüm algılayıcılarının ve kontrolcülerinin kullanıldığı temelde iki konfigürasyonu vardır. Bu iki konfigürasyonda da gövdeye parçalar eklenerek aracın boyu uzatılabilir. Aracın Temel Parçaları Elipsoidal burun, silindirik orta gövde, kontrol yüzeylerinin bulunduğu arka gövde bölümü ve pervanedir. Aracın ful konfigürasyonunda, temel konfigürasyonuna ek olarak ön bölümde dört adet kontrol yüzeyi ile ön gövde ve arka gövde üzerinde ilaveten altışar adet itki elemanı bulunmaktadır. Bu fazladan itki elemanları sayesinde aracın, manevra kabiliyetini artarken, seyir hızı düşmektedir. Dolayısıyla yapılacak göreve göre, kullanılacak konfigürasyona karar verilmektedir [7,8]. Aşağıda C-SCOUT otonom su altı aracının temel ve ful konfigürasyonlarına ait görseller yer almaktadır.



Şekil 1.5 : C-SCOUT aracının ful konfigürasyon hali [44].



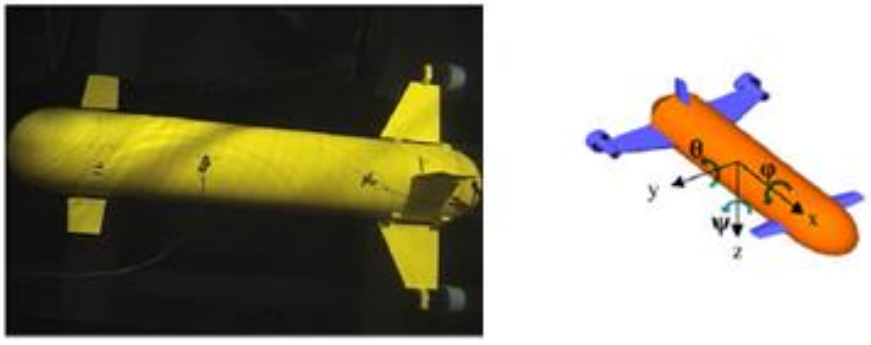
Şekil 1.6 : C-SCOUT aracının temel konfigürasyon hali [44].

1.4.1.2 SNUUV I Otonom su altı aracı

SNUUV I (*Seoul National University Underwater Vehicle*) otonom su altı *SEUL* Üniversitesi ve Kore Ulusal Araştırma Laboratuvarı ortaklaşa iş paylaşımı ile Bakanlık bilim ve Teknoloji geliştirme programı çerçevesinde 2000 yılından itibaren geliştirilmektedir. Aracın tasarlanması fikri, akustik ölçüm cihazları ve otonom kontrol mekanizmaları kullanarak otonom su altı araçları için kontrolcüler tasarlamak ve bu araçların otonom kontrollerini sağlamak fikrinden doğmuştur. Bu araç, otonom navigasyon sistemine sahip ve uzaktan ölçüm yapan OSA'lar için bir denek taşı konumundadır. Aracın esas tasarım amacı, deneyler sonucunda elde edilen hidrodinamik veriler kullanılarak, aracın stabilite ve kontrol uygulamaları için kontrolcüler tasarlamaktır. Aracın derinlik ve manevra kontrolü *sliding mode* ve *PID* kontrolörler ile yapılmaktadır. Araç delta tipinde kuyruk yapısına sahiptir. Ayrıca, aracın manevra kabiliyetini arttırmak için ön bölüme de kontrol yüzeyleri koyulmuş ve arka bölümdeki itki elemanları hareketli olarak tasarlanmıştır. Bir saatlik süre boyunca 2 m/s ortalama operasyon hızı ile hareket edebilen bu araç, 100 metre derinlikteki su basıncına dayanabilecek yapıda tasarlanmıştır [9]. Araç ile ilgili teknik, geometrik ve mekanik özellikler Şekil 1.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 1.1 : SNUUV I aracının teknik ve geometrik özellikleri [9].

Boyutları	Çapı (0,25m) × Boyu (1,35 m)
Hidrostatik kaldırma kuvveti	428,6 N
Suda taşırdığı su hacmi	0,0505 m^3
Maksimum inebildiği derinlik	100 m
Maksimum operasyon zamanı	1 saat
Maksimum hızı	2 m/s
Kanatçık profili	NACA 0012
Ağırlığı	428,6 N



Şekil 1.7 : SNUUV I otonom su altı aracı [9].

1.4.1.3 ISIMI Otonom su altı aracı

ISIMI su altı aracı küçük OSA'lar sınıfında olup, aracın temel tasarım konsepti kolayca atışı yapılabilen, yeni geliştirilecek OSA teknolojileri için hızlıca deneysel geri besleme alınabilen ve herhangi bir özel operasyon aletine gerek kalmadan operasyon yaptırılabilen bir araç olmasıdır. Araç kolayca taşınabilmesi için 1 metre uzunluğunda ve 35 kg ağırlığındadır. 1988 yılında *MIT* tarafından, *Charlles* Nehri'nden oşinografik veri toplaması amacıyla tasarlanmıştır. Araç en az 2 deniz mili hızında en az 3 saat seyir yapabilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu araçta diğer birçok OSA gibi modülerdir ve farklı görevler için kullanılabilir. *ISIMI* su altı aracı 3 temel alt sistemden oluşmaktadır. Bunlar, mekanik alt sistem, kontrol sitemi ve komünikasyon sistemidir. Mekanik alt sistemi gövde içerisindeki mekanik elemanları, aktarma elemanlarını, itki elemanlarını ve kontrol yüzeylerini içerir. Kontrol sistemi bilgisayar ve elektrik ara yüz kartlarını, sensörlerini ve yazılımsal bölümleri içerir. Komünikasyon sistemi ise, aracın komuta merkezi ile bağlantı ara yüzleri içermektedir [10]. *ISIMI* sualtı aracının temel konfigürasyonu ve geometrik özellikleri aşağıda gösterilmiştir.

Çizelge 1.2 : ISIMI Otonom su altı aracının özellikleri [10].

Boyu	1196 mm
Çapı	170 mm
Kütlesi	15 kg
Operasyon hızı	1 m/s
Maksimum hızı	2 m/s



Şekil 1.8 : ISIMI Otonom su altı aracı [10].

1.4.1.4 REMUS Otonom su altı aracı

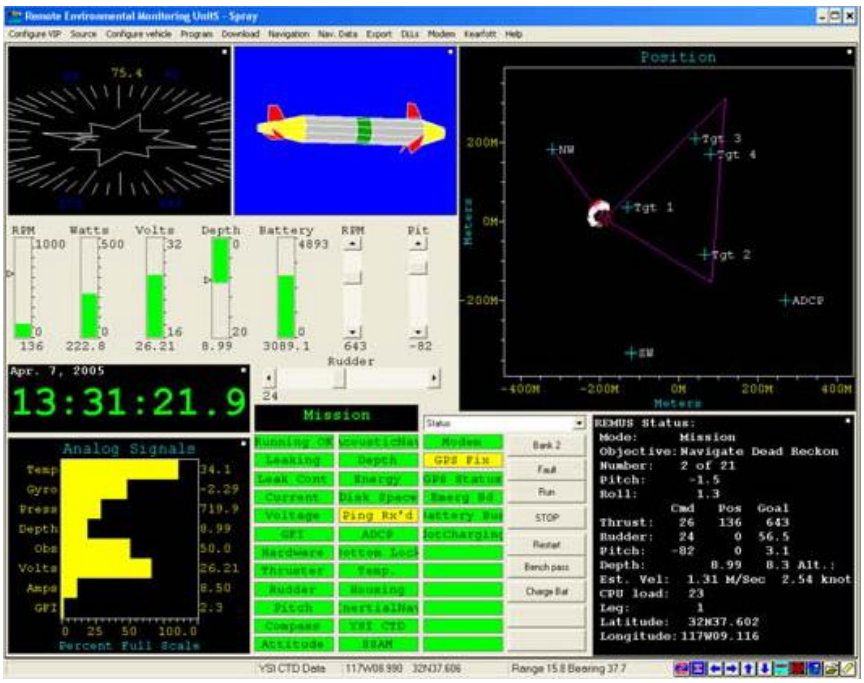
REMUS (*Remote Enviromental Measuring UnitS*) otonom su altı aracı, ABD *Woods Hole Oşinografi Enstitüsü* tarafından düşük maliyetli bir otonom su altı aracı olarak tasarlanmıştır. *REMUS* aracı modüler olarak tasarlanmıştır, dolayısıyla parçaları değiştirilerek farklı menzillerdeki görevler için kurgulanabilir. Öncelikli görevi görüntüleme yapmaktır. Bu tip torpido şekilli insansız su altı araçları çoğunlukla okyanusun derin bölgelerinde ölçüm almak için kullanılır. Bu araç ayrıca, araştırma,

inceleme ve su altı haritası çıkartma görevleri için de yoğunlukla kullanılmaktadır. *REMUS* ilerleme ve manevra hareketleri için pervane ve kontrol yüzeylerini kullanmaktadır. Su altına girdikten sonra akustik navigasyon aktif hale gelir ve komuta merkezinden bağımsız olarak veri toplar. Remus aracının farklı derinliklerdeki görevleri için farklı konfigürasyonları vardır [11,12]. Bu konfigürasyonlar ve özellikleri Çizelge 1.1' de verilmiştir.

Çizelge 1.3 : REMUS Otonom su altı aracının modelleri [11].

Araç Modeli	Kütlesi	Operasyon Menzili
REMUS 100	36 kg	100 metre
REMUS 600	200kg	600 metre
REMUS 6000	700 kg	6000 metre
REMUS TIV	270 kg	450 metre

Remus aracı ile su üstünden iletişim kurmak oldukça kolaydır, basit bir dizüstü bilgisayar ile kontrol edilebilir. Remus aracının kontrol edildiği programın ara yüzü aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 1.9 : REMUS Su altı aracını kontrol eden programın kullanıcı ara yüzü [11].

Remus aracının 100 modelinin temel seviyedeki teknik özellikleri ve resmi bir sonraki sayfada verilmiştir.

Çizelge 1.4 : REMUS Otonom su altı aracının özellikleri [45].

Çapı	19 cm
Boyu	158 mm
Kütlesi	36 kg
Maksimum operasyon derinliği	20 metre
Tarayabileceği alan genişliği	800mm× 1000mm
Operasyon sıcaklık aralığı	0 ile 37 C^o arasında
Operasyonel hız aralığı	0,25 m/s – 2,8 m/s



Şekil 1.10 : REMUS Otonom su altı aracı [45].

1.4.2 Türkiye'de üretilen otonom su altı araçları

1.4.2.1 Milli AUV otonom su altı aracı

GATE Elektronik Firması tarafından geliştirilen günümüz modern teknolojilerini kullanan hafif ve düşük maliyetli bir insansız su altı aracı olan Milli AUV, aşağıdaki kabiliyetlere sahiptir:

- Muhasım ülkeler tarafından liman ve boğaz giriş çıkışlarının uzaktan torpido mayınlarla kirletilip kirletilmediğini tespit etmek,
- Mayın tanı – teşhis ve imha çalışmalarında kullanılmak,
- Eğitim amaçlı tatbikatlarda kayıp olan eğitim torpidoları gibi cihazları arama ve kurtarma faaliyetlerini yürütmek,
- Seyir hidrografi çalışmaları ile amfibi harekâtta ön kuvvet harekâtı kapsamında su altına yönelik çeşitli araştırmalarda da değerlendirilmek maksadıyla görüntü ve sonar verileriyle birlikte çevre ve konum verilerinin iletimini kablosuz olarak uzaktan veya önceden programlanan rotalarda kontrollü hareket edebilmek [46].

AUV Sistemi sivil uygulamalar için kullanıldığı takdirde Su Altı Araştırma Gemileri ve su altı araştırma laboratuvarlarında doğrudan ilgili platforma entegre edilerek kullanılabilecektir. GATE Elektronik tarafından geliştirilen OSA'nın resmi ve diğer temel özellikleri aşağıdaki gibidir.

Çizelge 1.5 : Milli AUV su altı aracının özellikleri [46].

Operasyon modu	Otonom, yarı otonom, manuel
Çalışma derinliği	1000 m (Kablosuz), 300 m Kablolu
Gövde malzemesi	Kompozit ve 6061 serisi alüminyum
Kütlesi	270 kg
Boyutları	Çapı (0,7 m) × Boyu (2,4 m)
Maksimum operasyon hızı	8 Knot
Otonom kabiliyetleri	İstikamet koruma, sabit derinlikte seyir yapabilme
Görevleri	Mayın tespiti, su altı taraması, teşhisi, araştırması



Şekil 1.11 : Milli AUV otonom su altı aracı [46].

1.4.2.2 ÇANAKKALE Tek kullanımlık mobil mayın imha şarjı

GATE Elektronik Firması tarafından geliştirilen ÇANAKKALE SSR, uzaktan kumanda edilebilen, mayın tarama ve mayın avlama sistemlerinde dalgıçların mayın harbindeki rolünü üstlenebilecek bir su altı aracıdır. Mobil mayın imha şarjlarının kullanımı sayesinde tespit edilen mayının imhası için şarj yerleştirme faaliyetinde dalgıç kullanımı önlenir, limitli olan dalgıç ve toplam dalış sürelerinin efektif kullanımı sağlanır. Halen mevcut ROV (*Remotely Operational Vehicle*) cihazları veya dalgıçlar vasıtasıyla yapılan mayın imhası işleminin süresi de tek kullanımlık mobil mayın imha şarjları ile oldukça kısalmaktadır [46]. ÇANAKKALE aracı ile ilgili özellikler Çizelge1.6'da ve aracın görseli Şekil 1.12'de verilmiştir.

Çizelge 1.6 : ÇANAKKALE Mobil mayın imha şarjının özellikleri [46].

Boyutları	Çapı (0,45 m) × Boyu (2,5 m)
Operasyon derinliği	300 m
Operasyon hızı	6 Knot
Kütlesi	100 kg
Patlayıcı taşıma kapasitesi	25 kg



Şekil 1.12 : ÇANAKKALE Otonom su altı aracı [46].

1.4.2.3 GMK-C Otonom su altı gözlem aracı

GATE Elektronik Firması tarafından geliştirilen GMK – C otonom su altı aracı her türlü platforma hızlı ve kolay bir şekilde entegre edilebilme özelliği, operasyon kolaylığı ve düşük bakım gereksinimi, modüler yapısı, kullanım kolaylığı, kablolu ve kablosuz (otonom) kullanıma uygunluğu ile sınıfında tercih edilen bir üründür [46]. GMK – C otonom su altı aracının özellikleri aşağıda sıralandığı gibidir.

- Mayın tespit edebilme
- Hafif, küçük ve dayanıklı yapı
- Kablolu ve kablosuz (otonom) operasyon imkânı
- Kolay kullanılabilir görev yönetim sistemi
- Uzun süreli operasyon yapabilme
- 3 eksende manevra yapabilme (Yunuslama, yuvarlanma, sapma)

GMK–C otonom su altı aracının geometrik özellikleri Çizelge 1.7'de ve resmi Şekil 1.13'de verilmiştir.

Çizelge 1.7 : GMK-C Otonom su altı aracının özellikleri [46].

Operasyon modu	Otonom
Operasyon derinliği	100 m
Gövde malzemesi	6061 serisi alüminyum
Kütlesi	60 kg
Maksimum hızı	6 Knot
Operasyon hızı	3 Knot
Boyutları	Çapı (23,5 cm) × Boyu (1,5 m)



Şekil 1.13 : GMK-C Otonom su altı aracı [46].

Yukarıda anlatıldığı gibi dünya üzerinde çeşitli amaçlar için kullanılan birçok otonom su altı aracı tipi vardır. Bu araçlar sahip oldukları görev tanımlarına göre hidrodinamik formlara sahip oldukları gibi, tasarım gereksinimlerinin karşılanabilmesi için modüler yapıda olabilir ve farklı konfigürasyonlara sahip olabilirler. Ülkemizde de su altı alanında yapılan çalışmalar hızla ilerlemekte ve özgün otonom su altı araçları üretilmektedir.

1.5 Tezin Amacı ve Motivasyonu

Otonom su altı araçlarının geliştirilmesi, tasarımı süreçlerinde hidrodinamik tasarım ve modelleme konusu, aracın formunu, seyir dinamiğini, kontrolünü, performansını, manevra kabiliyetini, kararlılığını dolayısıyla aracın görevinin belirlenmesinde dikkate alınacak birçok parametreyi doğrudan ilgilendiren bir konudur. Bu durum göz önüne alındığında aracın yapmasının beklendiği görev tanımı ve teknik isteklerine göre hidrodinamik tasarımın iyi kurgulanması gerekmektedir. İnsansız su altı araçlarının hidrodinamik tasarımı ve modellemesi konusunda genel geçer kullanılan bir yöntem olmadığından bu konu geliştirilmeye çok açık bir konudur. Buna ilaveten ülkemizde su altı test olanaklarının yetersiz olması, yapılan tasarımların test ortamlarında doğrulanma imkanlarının olmaması, otonom su altı araçlarının tasarımının büyük oranda bilgisayar ortamında modelleme ve simülasyon yöntemleri ile yapılmasına sebep olmuştur. İçinde bulunduğumuz bu durum,

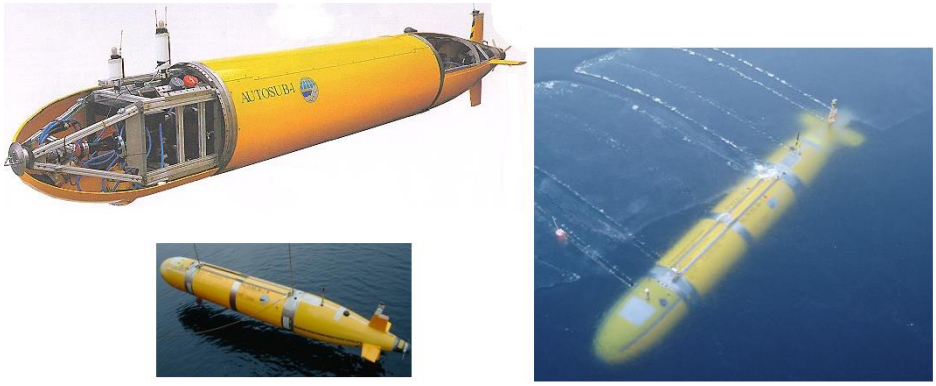
hidrodinamik tasarım, analiz, modelleme ve simülasyon konularının geliştirilmesine, doğrulanmasına ve bilgisayar ortamında iyi çözümlenmiş olmasına olan gerekliliği arttırmaktadır. Dolayısıyla yapılan bu tez çalışması kapsamında öncelikli olarak, su altı araçları için yeni bir hidrodinamik modelleme yönteminin geliştirilmesi ve bu yöntemin denek taşı çalışmaları ile doğrulanması amaçlanmıştır. Bu amaca ilaveten ikinci olarak da, geliştirilen ve doğrulanan hidrodinamik modelleme yöntemleri kullanılarak otonom bir insansız su altı aracının hidrodinamik analizlerinin yapılması, hidrodinamik performansının ve kararlılığının incelenmesi amaçlanmıştır. Hedeflenen çalışmalar tamamlandığında, su altı araçlarının farklı seyir koşullarında sergilemiş oldukları hidrodinamik performans ve kararlılıkları, yeni geliştirilen hidrodinamik hesaplama modelli kullanılarak hesaplanabilecek ve böylelikle yapılmış olan tasarımların istenilen performans gereksinimlerini karşılayabildiği kontrol edilerek, yapılan tasarımlar doğrulanacak ve optimize edilecektir.

2. AUTOSUB OTONOM SU ALTI ARACI

Bu proje çalışmasında Autosub otonom su altı aracının su altında belirli seyir koşullarında hareket ederken üzerinde oluşan hidrodinamik kuvvet ve momentler altı serbestlik derecesine hesaplanmış ve Autosub su altı aracının hidrodinamik karakteristiği çıkartılmıştır. Hesaplanana hidrodinamik kullanılarak aracın stabilite ve performans hesapları gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda tüm hidrodinamik karakteristiği belirlenen Autosub otonom su altı aracının operasyonel, geometrik ve alt sistem özellikleri bu bölümde ayrı bir bölüm olarak incelenmiştir.

2.1 Tanımı ve Görevleri

Autosub, İngiltere Ulusal Oşinografi Merkezi ve Southampton Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Fakültesi tarafından geliştirilmiş, uzun menzilli büyük bir otonom su altı aracıdır. İlk olarak 1988 yılında projelendirilen Autosub'ın genel görevi görüntüleme yapmak, veri toplamak ve bunu merkez üssü ile paylaşmaktır [47].



Şekil 2.1 : Autosub otonom su altı aracı [47].

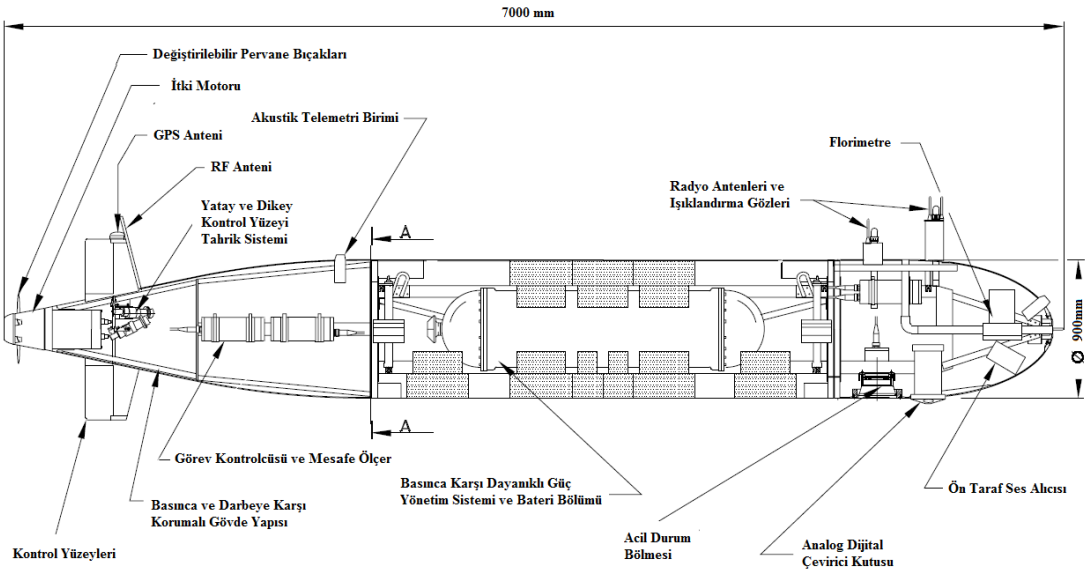
Bu aracın ölçebildiği terimler arasında, iletkenlik (suyun geçirgenliği), sıcaklık, iletimlilik, ışınım, fotosentetik aktif radyasyon, seyir hızı, türbülans, buzulların su altında kalan kısmının miktarı, suyun derinliği, tuzluluk gibi terimler sayılabilir. Autosub bu görevini sahip olduğu geniş çeşitlilikteki fiziki, biyolojik ve kimyasal özellikleri ölçebilen sensörlerine borçludur.

Aracın gerçekleştirdiği önemli görevlerden bazıları şöyledir; 2004 yılında Kuzey Kutbunda Grönland civarlarında görüntüleme yapıp deniz altı yer haritasını çıkartmıştır. Ayrıca 2009 yılında, Antarktika bölgesindeki Çam Adası Buzulları civarında deniz yüzeyinden 60 km derinlikte görüntüleme görevini başarıyla yerine getirmiştir. Yakın zamanlarda Autosub6000 isimli otonom su altı aracı, Kuzey İskoçya bölgesinde çok zor deniz şartlarının olduğu bölümlerde, sonar yardımıyla ve fotografik görüntüleme alarak bu gölgenin su altı yer haritasını çıkartmıştır.

Autosub aracı yukarda anlatıldığı şekillerde toplamda 271 görevi başarıyla gerçekleştirmiştir. Toplamda 750 saat görev süresi tamamlamıştır ve bu süre zarfında toplam 3596 km yol kat etmiştir. Bu yolların 1812 km'sini otonom bir şekilde ve eskortsuz tamamlamıştır. En derin görevini deniz yüzeyinden 1003 metrede gerçekleştirmiştir. En uzun görevinde ise, 50 saat boyunca veri toplamış ve bu sürede 262 km yol kat etmiştir. Autosub aracı geliştirilen yeni modelleri sayesinde farklı özelliklere sahip olabilmektedir ve önümüzdeki dönemlerde birçok yeni görev daha gerçekleştirecektir [13,14,15,47].

2.2 Teknik Özellikleri

Autosub su altı aracı sahip olduğu otonom özellikler ve geniş görev tanımı sebebiyle birçok alt sistem taşımaktadır. Şekil 2.2'deki resimde Autosub otonom su altı aracının teknik resmi, alt sistemleri ve alt sistemlerinin gövde içindeki yerleşimleri gösterilmiştir.



Şekil 2.2 : Autosub Otonom su altı aracının alt sistemleri [47].

Şekil 2.2'deki resimde görülen bazı alt sistemlerin özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 2.1: Autosub Aracının teknik özellikleri [13,14,47].

Baterileri	Mangan ve alkalin katkılı olan baterileri sayesinde, araca 500 km menzile sahip olabilmekte veya 6 gün aralıksız seyir yapabilmektedir.
Derinlik kapasitesi	Sahip olduğu Carbon Fiber gövde sayesinde 1600 metre derinliğe kadar inebilmektedir.
İtki Elemanları	DC fırçasız bir motor tarafından sürülen, redüktör dişlisi bulundurmayan 5 bıçaklı bir pervaneye sahiptir
Navigasyonu	500 metre mesafeyi tarayabilen, 150 Khz'lik bir dopleri bulunmaktadır. Ataletsel navigasyon sistemi, gidilen mesafenin yüzde 0.2 si kadar hassasiyette navigasyon verisi sağlamaktadır.
Sensörleri	Pozisyon bilgisi, yunuslama ve dönme verileri için, Seatex MRU 6 mesafe sensörünü, derinlik verisi ölçümü için ise 700 bar basına dayanabilen Digiquartz 430 kT sensörünü kullanmaktadır. 300 metreden mesafe bilgisini ölçebilen Simrad Mesotech 808 sensörünü kullanmaktadır.
Göreve özel paralı yük	1 m^3 hacime sahip veya 100 kg ağırlığındaki cisimleri paralı yük olarak kullanabilir.

2.3 Geometrik Özellikleri ve Kontrol Yüzeyleri

Sahip olduğu özellikler sayesinde birçok farklı görevi yerine getirebilen otonom kontrollü Autosub'ın geometrik özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 2.2 : Autosub Aracının geometrik özellikleri [13,14,47].

Boy	7 m
Çap	0,9 m
Burun Uzunluğu	1,0365 m
Burun Geometrisi	Eliptik
Orta Gövde Uzunluğu	3,8635 m
Orta Gövde Kesit Alanı	0,4712 m^2
Arka Gövde Uzunluğu	2,1000 m
Ağırlık Merkezinin Burundan Uzaklığı	3,1594 m
Kuyruk Açıklığı	1,1846
Kuyruk Uç Veteri	0,2827
Ok açısı (Hücum Kenarı)	14,9827^o
Ok Açısı (Firar Kenarı)	0^o

Uzunluğu 7 m ve maksimum çapı 0.9 m olarak tasarlanan Autosub, gövdenin arkasında bulunan "+" konfigürasyondaki 4 adet hareketli kontrol yüzeyi tarafından kontrol edilmektedir. Kontrol yüzeyi hidrofoilleri olarak NACA 0015 profilleri kullanılmıştır.

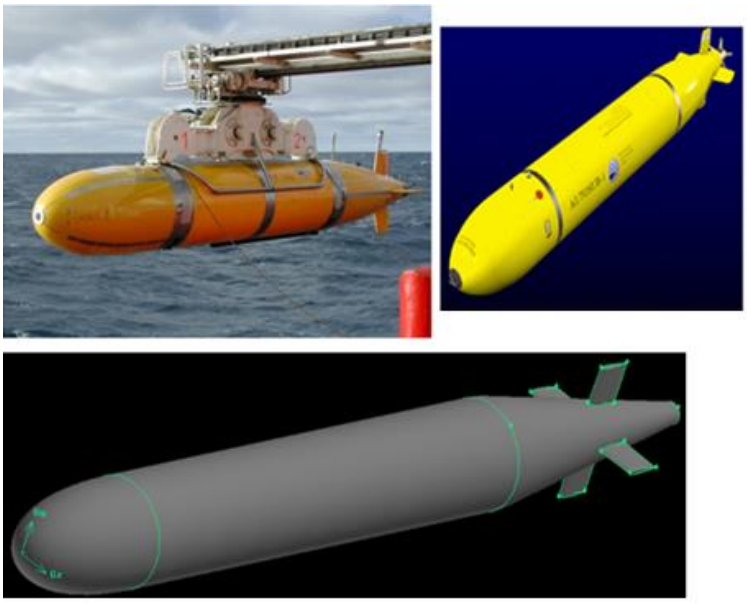
NACA 0015 Hidrofoili,

- Hidrofoil'in veteri: 0,294 metre
- Hidrofoil'in kalınlığı: 0,02 metre



Şekil 2.3 : NACA 0015 Hidrofoili [47]

Autosub otonom su altı aracı eksenel simetrik bir gövdeden ve "+" konfigürasyondaki, NACA 0015 hidrofoiline sahip 4 adet kanatçıktan oluşmaktadır. Autosub aracının resimleri ve katı model resmi aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 2.4 : Autosub otonom su altı aracının kanatçık konfigürasyonu [47].

2.4 Ağırlığı ve Taşıma Kuvveti

Autosub su altı aracı modüler olarak tasarlanmıştır. Bu özelliği sayesinde farklı konfigürasyonlara sahip olabilmekte ve farklı görevleri yerine getirebilmektedir. Bu aracın ağırlığı farklı görevler sırasında kullanılan batarya sayısına göre ve aracın hidrostatik dengelemesini yapmak için kullanılan dami ağırlıklara bağlı olarak

değişebilmektedir. Uzun süreli veya menzilli görevlerde daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulacağından kullanılan batarya sayısı artmakta dolayısıyla aracın ağırlığı da artmaktadır. Autosub aracının hidrostatik kaldırma kuvveti, ağırlığından daha fazladır. Bu durumda araç, pozitif sephiyelidir denilir. Aracın pozitif sephiyeli olmasının nedeni, bir görev sırasında aracın güç sağlayıcısında veya kontrol sistemlerinde herhangi bir arızalanma olduğu takdirde, aracın dibe batmayıp, su yüzeyine çıkması amacıyladır. Aksi halde araç kaybedilebilir. Autosub aracının ağırlık ve hidrostatik kaldırma kuvvet hesaplamalarında Bölüm 2.3'de anlatılan geometriye sahip olan konfigürasyondaki araç dikkate alınmıştır. Belirtilen özelliklere sahip aracın kütlesi ve suya batırıldığı zaman yer değiştirdiği suyun kütlesi Çizelge 2.3'te verilmiştir. Aşağıda verilen kütle değerleri, içinde bulunulan ortamın yerçekimi ivmesi değeri ile çarpılarak ağırlık değerlerine dönüştürülebilir.

Çizelge 2.3: Autosub otonom su altı aracının kütle özellikleri [13,14,47]

Kütlesi	1600 Kg
Suya daldırıldığı zaman yer değiştirdiği suyun kütlesi	3500 Kg

2.5 Ağırlık ve Hacim Merkezleri

Autosub su altı aracı modüler olduğundan, farklı konfigürasyonlarında aracın ağırlık ve hacim merkezlerinin yeri değişmektedir. Bu bölümde, Bölüm 2.3'de anlatılan özelliklere sahip araç için ağırlık ve hacim merkezi değerleri verilecektir. Bir su altı aracının üzerine etkiyen hidrostatik kaldırma kuvvetleri araca hacim merkezi üzerinden etki ederler. Dolayısıyla bir su altı aracının hacim merkezi aynı zamanda a aracın hidrostatik kaldırma merkezidir. Aracın hidrostatik hesaplamaları yapılırken aracın hidrostatik kaldırma ve ağırlık merkezlerinin yeri çok önemlidir. Ayrıca ileriki bölümlerde hidrodinamik hesaplamalar yapılırken, hesaplanacak momentler aracın ağırlık merkezi referans alınarak hesaplanacağından aracın ağırlık ve hacim merkezlerinin araç üzerindeki koordinatları önemlidir. Autosub su altı aracı eksenel simetrik bir gövdeye sahip olduğundan, aracın ağırlık ve hacim merkezleri, yatay ve düşey eksenlere göre simetrik kabul edilmiştir. Dolayısıyla aşağıda sadece, aracın ilerleme ekseni üzerindeki ağırlık ve hacim merkezleri gösterilmiştir. Aşağıdaki tabloda verilen koordinatlar aracın burun noktası referans alınarak verilmiştir.

Çizelge 2.4 : Autosub aracının burun noktasına göre ağırlık ve hidrostatik kaldırma merkezi yerleri [13,14,47].

Ağırlık Merkezi Yeri	+3159 mm
Hacim Merkezi (Hidrostatik Kaldırma Merkezi) Yeri	+3099 mm

Bu özellikler ile beraber bu bölümde Autosub aracına ait geometrik, işlevsel ve alt sistem özellikleri verilmiştir. Autosub aracının yukarıda verilen özellikleri kullanılarak altı serbestlik dereceli hidrodinamik veri tabanı üretilecek böylelikle, aracın stabilite ve performans karakteristikleri incelenebilecektir. Ancak altı serbestlik dereceli hidrodinamik veri tabanının üretilebilmesi için öncelikle kullanılacak kinematik bağlantılar tanımlanmalı ve hidrodinamik denklem setleri türetilmelidir.

3. TEMEL HAREKET DENKLEMLERİNİN VE ELEMANLARININ TANITILMASI

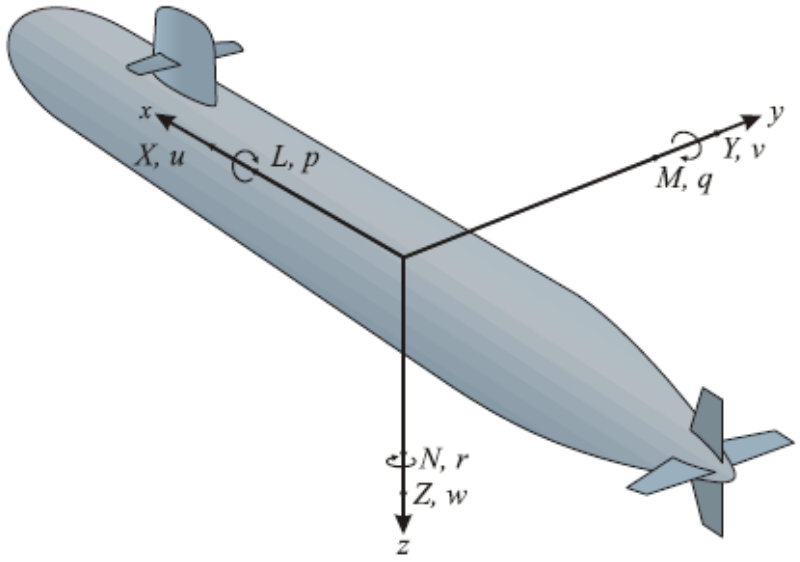
Temel hidrodinamik hareket denklemlerinin kurulması ve kullanılması için en önemli parametrelerden biri kullanılacak olan hidrodinamik eksen takımıdır. Dolayısıyla bu bölümde öncelikle bu projede kullanılacak olan hidrodinamik eksen takımı tanımlanmalıdır. Hidrodinamik eksen takımının tanıtılmasına müteakiben Autosub aracının dinamiğinin kurulmasında kullanılacak kinematik denklemler tanıtılacaktır. Aracın kinematiğini tanımlayan denklemler vasıtasıyla Autosub aracının katı cisim dinamiği üzerinde durulacaktır. Bütün bu kurulan denklem setleri dikkate alınarak Autosub aracının hidrodinamik karakteristiği belirlenirken bu projede kabul varsayımlar anlatılacaktır. Bu kapsamda aracın hareket denklemlerinin kurulması için öncelikle kullanılacak hidrodinamik eksen takımı tanıtılmalıdır.

3.1 Hidrodinamik Eksen Takımları

Seyir dinamiği denklemlerinin tanımlanması için temelde kullanılan iki çeşit hidrodinamik eksen takımı mevcuttur. Bunlardan ilki aracın kendi gövdesi referans alınarak tanımlanan eksen takımı iken diğeri ise, dünyanın merkezi referans alınarak tanımlanan eksen takımıdır. Bu iki eksen takımları ve aralarındaki eksen dönüşümleri ile ilgili bilgiler ve hesaplamalar aşağıda anlatılacaktır.

3.1.1 Gövde eksen takımı

Bu çalışmada yapılacak hesaplamaların hepsi gövde eksen takımı referans alınarak yapılacaktır. Gövde eksen takımı, kartezyen koordinat sistemine sahip bir eksen takımıdır. Kullanılacak gövde eksen takımının koordinat merkezi olarak aracın ağırlık merkezi kabul edilmiştir. Çalışmada kullanılan gövde eksen takımında X ekseni koordinat merkezinden aracın burnuna doğru, Y ekseni koordinat merkezinden aracın sağına doğru, Z Ekseni ise aracın altına doğru tanımlanmıştır. Çalışmada kullanılan hidrodinamik eksen takımı Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Hidrodinamik eksen takımı [17].

Gövde eksen takımında oluşan hidrodinamik kuvvet, moment ve hızların açıklamaları aşağıda yapılmıştır.

X: İlerleme kuvveti

Y: Sapma kuvveti

Z: Düşey öteleme kuvveti

K: Dönme momenti

M: Yunuslama momenti

N: Sapma momenti

u: İlerleme doğrusal hızı

v: Sapma doğrusal hızı

w: Düşey öteleme doğrusal hızı

p: Dönme açısal hızı

q: Yunuslama açısal hızı

r: Sapma açısal hızı

Ayrıca eğer araç gövde eksen takımında çeşitli eksenler arasında konum değiştirirse aşağıda tanımlanan terimler ortaya çıkacaktır.

α $(Hücum\ açısı)$ = Y ekseni etrafında, X ve Z eksenleri arasında konum değiştirildiğinde oluşur

β $(Sapma\ açısı)$ = Z ekseni etrafında, X ve Y eksenleri arasında konum değiştirildiğinde oluşur

ϕ $(Yuvarlanma\ açısı)$ = X ekseni etrafında, Y ve Z eksenleri arasında konum değiştirildiğinde oluşur.

Gövde eksen takımının sağladığı kolaylıklardan bir tanesi de, aracın ağırlık merkezine sabitlendiğinden ötürü, aracın atalet momentlerinin kolay hesaplanabilecek olmasıdır.

3.1.2 Dünya eksen takımı

Dünya eksek takımının koordinat merkezi dünya üzerine sabitlenmiştir ve eksen takımının Z ekseni Dünyanın merkezini gösterecek şekilde konumlandırılmıştır. X ve Y eksenleri ise ortogonaldir ve gövdenin ağırlık merkezinden geçerek, lokal eksen takımı üzerinde yatay düzlemi oluşturacak şekilde konumlandırılmışlardır.

3.2 Araç Kinematiği

Hareket eden bir aracın hareketini tanımlamak için, gövde eksen takımının dünya eksen takımına göre hareketini tanımlamak gerekmektedir. Bu hareketi tanımlamak için aracın konumunun, oryantasyonunun, hızlarının ve üzerine etkiyen kuvvet ve moment vektörlerinin bilinmesi gerekmektedir. Dolayısıyla hareket eden bir su altı aracının 6 serbestlik derecesindeki hareketi aşağıdaki vektörler vasıtasıyla tanımlanabilir.

$$\eta = [\, x\ y\ z\,]^{T} \qquad \gamma = [\, \phi\ \theta\ \psi\,]^{T}$$

$$\zeta = [\, u\ v\ w\,]^{T} \qquad \upsilon = [\, p\ q\ r\,]^{T}$$

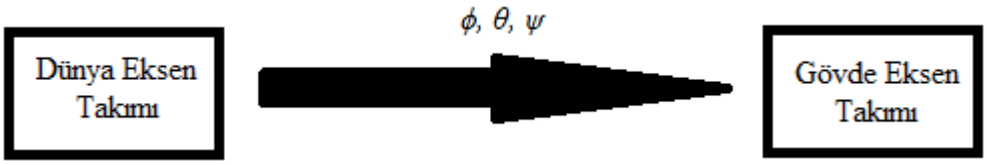
$$\tau = [\, X\ Y\ Z\,]^{T} \qquad \varsigma = [\, K\ M\ N\,]^{T}$$

Bu vektörlerden η vektörü aracın pozisyonunu, γ vektörü ise aracın oryantasyonunu dünya eksen takımına göre ifade etmektedir. ζ vektörü ise aracın sahip olduğu doğrusal hızları, υ vektörü açısal hızları, τ vektörü aracın maruz kaldığı hidrodinamik kuvvetleri, ς vektörü ise araca etkiyen hidrodinamik momentleri gövde eksen takımına göre ifade etmektedir. Dolayısıyla dünya eksen takımına göre tanımlanmış konum ve oryantasyon vektörleri ile gövde eksen takımına göre tanımlanmış hız, kuvvet ve moment vektörleri arasında bağıntı kurulabilmesi için dünya eksen takımının gövde eksen takımına dönüştürülmesi gerekmektedir [12].

3.2.1 Dünya eksen takımından gövde eksen takımına geçiş

Herhangi bir vektörün Dünya eksen takımından Gövde eksen takımına dönüştürülmesi için sırasıyla Z ekseni, Y ekseni ve X ekseni etrafında döndürülmesi gerekmektedir. Bu dönüşümler için, Dünya eksen takımı ile Gövde eksen takımı arasındaki açıkları ifade eden Euler açıları kullanılmaktadır. Euler açılarından sapma düzleminde olan ψ sembolüyle, yunuslama düzleminde olan θ sembolüyle ve dönme düzleminde olan ϕ sembolü ile gösterilir. Euler açıları, su altı aracının oryantasyonunu dünya eksen takımına göre ifade ederken çok faydalı olurlar. Dünya

eksen takımından gövde eksen takımına geçişteki dönüşüm sırası ve oryantasyonu Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2 : Dünya eksen takımından gövde eksen takımına geçişte kullanılan Euler açılarının sırası [18]

Euler açılarının alt ve üst sınırları aşağıda verilmiştir; dönüşümler aşağıda belirtilen sınırlar dâhilindeyse sağlıklı sonuçlar alınabilir.

$$0 \text{ derece} \leq \psi \leq 360 \text{ derece}$$

$$-90 \text{ derece} \leq \theta \leq 90 \text{ derece}$$

$$-180 \text{ derece} \leq \phi \leq 180 \text{ derece}$$

Dönüşüm yapılırken herhangi bir F vektörünün önce Z ekseni etrafında, ψ açısı kadar döndürüldüğü varsayılır.

Dünya eksen takımına göre F vektörü => $F_E = X_E\, i_E + Y_E j_E + Z_E\, k_E$ **(3.1)**

Öyle ise, F vektörünün ψ açısı kadar döndürülmüş hali aşağıdadır,

$$X' = X_E \cos\psi + Y_E \sin\psi \quad \textbf{(3.2)}$$

$$Y' = -X_E \sin\psi + Y_E \cos\psi \quad \textbf{(3.3)}$$

$$Z' = Z_E \quad \textbf{(3.4)}$$

ψ açısı kadar döndürülen F vektörü şimdi ise θ kadar döndürülür,

$$X'' = X' \cos\theta - Z' \sin\theta \quad \textbf{(3.5)}$$

$$Y'' = Y' \quad \textbf{(3.6)}$$

$$Z'' = X' \sin\theta + Z' \cos\theta \quad \textbf{(3.7)}$$

θ açısı kadar döndürülen F vektörü şimdi ise ϕ kadar döndürülür,

$$X_B = X''' = X'' \quad \textbf{(3.8)}$$

$$Y_B = Y''' = Y'' \cos\phi + Z'' \sin\phi \quad \textbf{(3.9)}$$

$$Z_B = Z''' = -Y'' \sin\phi + Z'' \cos\phi \quad \textbf{(3.10)}$$

Gövde eksen takımına göre *F* vektörü => $F_B = X_B\, i_B + Y_B j_B + Z_B\, k_B$ **(3.11)**

Böylelikle *F* vektörünün tüm Euler açılarında dönüşümü yapılmış ve *F* vektörü dünya eksen takımından gövde eksen takımına dönüştürülmüş olur [18].

3.3 Aracın Katı Cisim Dinamiği

Autosub insansız su altı aracı için rijid cisim kabulü yapıldığında, Newton'un ikinci kanununu temel alınarak türetilen hareket denklemleri bu araca uygulanabilir. Ancak, Newton'un ikinci kanunu sadece dünya eksen takımı referans olarak alındığında doğru bir biçimde uygulanabilir. Eğer hareket denklemleri gövde eksen takımı referans alınarak türetilirse, sistemin dünya eksen takımına göre dönüşümünün yapılması gerekmektedir [18]. Bu durumda da,

$$\alpha_{\text{Dünya}} = V_{\text{Gövde}} + \omega_{\text{Gövde}} \times V_{\text{Gövde}} \quad \textbf{(3.12)}$$

Şeklinde bir dönüşüm ile aracın hareket denklemleri gövde eksen takımına göre yazılabilir. Aşağıda bileşenlerine ayrılan doğrusal hız ve açısal hız ifadeleri, yukardaki vektörel çarpma işleminde yerine koyulursa, denklem 3.15 elde edilir.

$$V_{\text{Gövde}} = u\hat{\imath} + v\hat{\jmath} + w\hat{k} \quad \textbf{(3.13)}$$

Bu denklemde U: İlerleme hızı, V:Sapma hızı ve W:Dalma hızını ifade eder.

$$\omega_{\text{Gövde}} = p\hat{\imath} + q\hat{\jmath} + r\hat{k} \quad \textbf{(3.14)}$$

Açısal hız denkleminde ise, P:Dönme açısal hızı, Q:Yunuslama açısal hızı ve R:Sapma açısal hızını ifade eder.

$$\alpha_{\text{Dünya}} = \begin{bmatrix} \dot{u} + qw - rv \\ \dot{v} + ru - pw \\ \dot{w} + pv - qu \end{bmatrix}_{\text{Gövde}} \quad \textbf{(3.15)}$$

Newton'un 2. Kanununa göre F= m. α olduğundan ve α yerine yukarda elde edilen ivme ifadesi yazılırsa, aracın 3 eksende sahip olacağı ivme ve kuvvet denklemleri aşağıdaki gibi bulunur.

$$m(\dot{u} + qw - rv) = \sum Fx \quad \textbf{(3.16)}$$

$$m(\dot{v} + ru - pw) = \sum Fy \quad \textbf{(3.17)}$$

$$m(\dot{w} + pv - qu) = \sum Fz \quad \textbf{(3.18)}$$

Bir araca etkiyen moment değeri, o aracın açısal momentumundaki değişime eşittir. Öyle ise açısal momentum denklemi ve denklemde bulunan terimlerin açılımları aşağıdaki gibi yazılabilir,

$$H = R \times (mV) \quad \textbf{(3.19)}$$

$$R = x\hat{\imath} + y\hat{\jmath} + z\hat{k} \quad \textbf{(3.20)}$$

$$V_{dm} = \omega_{Gövde} \times R_{dm} \quad \textbf{(3.21)}$$

dm gibi sonsuz küçüklükte bir rijid cisim elemanı üzerinden işlem yapılıp daha sonra onun integrali alınarak tüme vardırılabilir,

$$V_{dm} = \begin{bmatrix} \hat{\imath} & \hat{\jmath} & \hat{k} \\ P & Q & R \\ x & y & z \end{bmatrix} \quad \textbf{(3.22)}$$

$$V_{dm} = (qz-ry)\,\hat{\imath} + (rx-pz)\hat{\jmath} + (py-qx)\hat{k} \quad \textbf{(3.23)}$$

$$\text{Lineer momentum} = dm \times V_{dm} \quad \textbf{(3.24)}$$

Açısal momentum ise,

$$dH_{dm} = R_{dm} \times (dm\, V_{dm}) \quad \textbf{(3.25)}$$

Yukardaki denklemin vektörel çarpımı yapılır ve elde edilen ifadelerin dm'ye göre integralleri alınırsa araç için geçerli aşağıdaki açısal momentum denklemleri elde edilmiş olur.

$$H_x = pI_{xx} - qI_{xy} - rI_{xz} \quad \textbf{(3.26)}$$

$$H_y = qI_{yy} - rI_{yz} - pI_{xz} \quad \textbf{(3.27)}$$

$$H_z = rI_{zz} - pI_{xz} - qI_{yz} \quad \textbf{(3.28)}$$

Yukardaki açısal momentum denklemlerinin zamana göre değişimi incelenirse, bulunacak değişim miktarı araca etkiyen moment miktarına eşit olacaktır. Değişim hesaplamaları yapıldığında karşımıza çıkacak moment ifadeleri en genel hali ile aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\dot{p}\, I_{xx} + qr(I_{zz} - I_{yy}) - (\dot{r} + pq)\, I_{xz} = \sum K \quad \textbf{(3.29)}$$

$$\dot{q}\, I_{yy} - pr(I_{zz} - I_{xx}) + (p^2 - r^2)\, I_{xz} = \sum M \quad \textbf{(3.30)}$$

$$\dot{r}\, I_{zz} + pq(I_{yy} - I_{xx}) + (qr - \dot{p})\, I_{xz} = \sum N \quad \textbf{(3.31)}$$

Autosub aracının yatay düzlem için ve düşey düzlem için simetrik olduğu düşünülürse, eylemsizlik momenti matrisindeki ifadelerden sadece köşegen elemanları, aşağıdaki gibi sıfırdan farklı olacaklardır.

$$I_o = \begin{bmatrix} Ixx & 0 & 0 \\ 0 & Iyy & 0 \\ 0 & 0 & Izz \end{bmatrix} \quad \textbf{(3.32)}$$

Autosub aracında ağırlık merkezi, Y ve Z eksenleri için tam simetri merkezinde ancak X ekseni için değildir. Bu varsayımlardan da yola çıkılarak, yukarıda türetilmiş olan toplam kuvvet ve moment denklemlerinin hareket ifadeleri 6 serbestlik derecesinde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$m[\dot{u} + qw - rv - X_G(q^2 + r^2)] = \sum Fx \rightarrow$ İlerleme Kuvveti **(3.33)**

$m[\dot{v} + ru - pw + X_G(qp + \dot{r})] = \sum Fy \rightarrow$ Sapma Kuvveti **(3.34)**

$m[\dot{w} + pv - qu + X_G(rp - \dot{q})] = \sum Fz \rightarrow$ Dalma Kuvveti **(3.35)**

$\dot{p} I_{xx} + qr(I_{zz} - I_{yy}) = \sum K \rightarrow$ Dönme Momenti **(3.36)**

$\dot{q} I_{yy} - pr(I_{zz} - I_{xx}) - m[X_G(\dot{w} - uq + vp)] = \sum M \rightarrow$ Yunuslama Momenti **(3.37)**

$\dot{r} I_{zz} + pq(I_{yy} - I_{xx}) + m[X_G(\dot{v} - wp + ur)] = \sum N \rightarrow$ Sapma Momenti **(3.38)**

Yukarıdaki denklem setinde yazılan ilk üç ifade, üç eksen doğrultusunda araca etkiyen toplam hidrodinamik kuvvetleri, son üç ifade ise üç eksen etrafında aracın maruz kaldığı toplam hidrodinamik momentleri ifade etmektedir [18].

3.4 Kabul Edilen Varsayımlar

Bu çalışmada Autosub su altı aracının bilgisayar ortamında modellemesinin yapılabilmesi için bazı varsayımların veya kabullerin yapılması gerekmektedir. Aksi halde birçok bilinmezlik olur ve o şartlarda sağlıklı modelleme alt yapıları kurulamaz. Yapılan modelleme çalışmalarında kabul edilen varsayımlar, çevresel varsayımlar ile araç ve sistem dinamiği için kabul edilen varsayımlar olacak şekilde iki alt gruba ayrılmıştır [12].

3.4.1 Çevresel varsayımlar

Çevresel şartlardaki bilinmezliklerin aracın modellenmesini olumsuz etkilememsi için aşağıdaki kabuller yapılmış ve araç o şekilde modellenmiştir.

- Autosub su altı aracının sonsuz derin bir suda ve denizin yüzeyinden olabildiğince aşağıda hareket ettiği varsayılmış böylelikle serbest yüzey etkilerinden, dalga etkilerinden, yer yüzeyi etkilerinden ve herhangi bir blokaj etkisinden aracın hareketinin etkilenmediği kabulü yapılmıştır.
- Aracın kendi hareket geçmişinden etkilenmediği yani, aracın herhangi bir manevra sırasında kendi dalgasından veya akıntısından etkilenmediği kabulü yapılmıştır.
- Aracın su altı akıntılarından etkilenmediği kabulü yapılmıştır.
- Suyun altındaki yoğunluk değişimlerinden aracın hareketinin etkilenmediği kabulü yapılmıştır.

3.4.2 Araç ve sistem dinamiği için kabul edilen varsayımlar

Modelleme yapılırken araç ile ilgili çeşitli bilinmezlikler ile karşılaşmamak için araç ve sistem dinamiği ile ilgili aşağıdaki varsayımlar kabul edilmiştir.

- Aracın rijid bir cisim olduğu kabul edilmiştir. Başka bir deyişle aracın kütlesinin ve kütle dağılımının operasyonlar ve analizler sırasında değişmediği kabulü yapılmıştır.
- Aracın kontrolünü sağlayan kontrol yüzeylerinin, yüksek sapma açılarında taşıma kaybına uğramadığı kabulü yapılmıştır.
- Kontrol yüzeyleri sapmış durumda yapılan analizlerde, kontrol yüzeyleri üzerindeki akışın gelişmiş hale vardığı ve kararsız bir durumun olmadığı kabulü yapılmıştır.
- Yapılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinde aracın farklı hızlar için sabit bir itki kuvvetine sahip olduğu ve sabit bir hızla ilerlediği kabulü yapılmıştır.
- Farklı hızlarda ve manevra koşullarında yapılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinde, araç için tanımlanan hızın zamandan bağımsız olduğu ve aracın sürekli (*steady*) koşullarda hareket ettiği kabulü yapılmıştır.
- Aracın seyir yaptığı hız kademesinde, araca emredilen hız ile seyir yaptığı hızın tamamen aynı olduğu ve arada herhangi zaman gecikmesinin olmadığı kabul edilmiştir.

4. HİDRODİNAMİK DENKLEM SETİNİN OLUŞTURULMASI VE BİLEŞENLERİNİN TANITILMASI

Autosub aracının çeşitli seyir koşullarında seyir benzetim çalışmalarının yapılabilmesi ve tasarım gereksinimlerinin kontrol edilebilmesi için, aracın farklı manevra koşullarında üzerinde oluşan hidrodinamik katsayıların belirlenmesi gerekmektedir. Hidrodinamik katsayıların belirlenebilmesi için öncelikle aracın seyir koşullarını tanımlayan hareket denklem setlerinin oluşturulması gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılacak hidrodinamik denklem setleri belirlenirken *Getrler M.* ve *Hagen G. R.* tarafından üretilen ve geliştirilen *Standart Denizaltı Hareket Denklemleri* referans alınmıştır. Dolayısıyla hidrodinamik hareket denklem setlerinin nasıl üretildiğinin ve geçirdiği gelişiminin incelenmesi amacıyla bu bölümde öncelikle *Standart Denizaltı Hareket Denklemlerinin* oluşturulması ve tarihçesi üzerinde durulmuştur [19-22].

4.1 Standart Denizaltı Hareket Denklemlerinin Oluşturulması ve Tarihçesi

Su altı araçlarının hareketlerinin modellemesi amacıyla ilk çalışmalar NSRDC (*Naval Ship Research and Development Center*) tarafından 1956 yılında yapılmıştır. Bu çalışmalara, su altı model testlerinden alınan verilerle aracın hareketinin dinamiğinin genel olarak tahmin edilmesi amacıyla başlanmıştır. *Getrler M.* ve *Hagen G.R.* tarafından yapılan bu çalışmalar geliştirilerek, pervanelerin tersine çalıştığı, kararlı seyir koşullarını ve çeşitli manevralar esnasında oluşan durumları da kapsayan bir denizaltı modelinin oluşturulması hedeflenmiştir. Bu amaçla döner kol mekanizması ve düzlemsel hareket mekanizması gibi düzenekler üzerinde gerçekleştirilen testlerde, dönüş esnasında oluşan rotasyonel etkilere sahip manevra terimleri ve akuple terimlerin denkleme dâhil edilmesi planlanmıştır [19-22].

M. Getrler ve *G. R. Hagen* tarafından "*Standart Denizaltı Hareket Denklemleri*" olarak isimlendirilen bu denklemlerde bulunan hidrodinamik kuvvet ve momentlerin üç kategoride değerlendirilebileceği belirtilmiştir. Bunlar statik, rotatif ve ivme katsayıları olarak ifade edilebilir. Statik katsayılar gövdenin akışkan içerisindeki bağıl çizgisel hızından dolayı oluşan durumu ifade ederken, rotatif katsayılar da

gövdenin akışkan içerisindeki bağıl açısal hızından dolayı oluşan kuvvet ve momentleri göstermektedir. İvme katsayıları ise hem açısal hem de çizgisel ivmelenme hareketi esnasında oluşan yüklerin hesaplanmasını sağlamaktadır. *Getrler M. ve Hagen G. R*, statik, rotatif ve ivme türevlerinin limitli sınırlar içerisinde doğrusal olduklarını ve o bölgede hareket denklemlerinin doğrusallaştırılabileceğini ifade etmektedirler [19-22].

NSRDC'de gerekli hidrodinamik katsayıların bulunması için öncelikli olarak düzlemsel hareket mekanizması (DHM) test düzeneği kullanılmıştır. DHM test düzeneği, bazı akuple terimler ve yüksek açısal hızlar esnasında oluşan doğrusal olmayan durumlar dışında kalan bütün katsayıları bulmak için kullanılmıştır. Bahsi geçen akuple hareketlerde ve doğrusal olmayan durumlarda ise daha güvenilir sonuçlar veren döner kol mekanizması testlerinden elde edilen veriler ile DHM test verileri birlikte değerlendirilmiştir.

Spesifik bir denizaltı tasarımı için çok miktarda yapılan DHM testlerinin yol gösterici olduğu, ancak tasarım kararı aşamasında döner kol mekanizması ile yapılan testlerin belirleyici olduğu belirtilmiştir.

Getrler M. ve Hagen G. R standart denizaltı denklemlerinin halihazırda bulunan birçok denizaltı tipine simülasyon amacıyla uygulanabileceği belirtilmiştir. Bu uygulamalar sırasında ikinci dereceden polinomların genellikle ters akış sürüklemesi kaynaklı terimlere uygulanabildiği sonucuna varılmıştır. Diğer taraftan, doğrusal karakteristiğe sahip olduğu bilinen ivme katsayılarına ise doğrusal eğri uydurma işlemi yapılmıştır.

Getrler M. ve *Hagen G. R.* tarafından başlatılan ve geliştirilen bu çalışmalar sayesinde standart denizaltı hareket denklemlerinin temeli oluşturulmuştur. Yapılan bu çalışmalardan 23 yıl sonra, 1979 yılında *J.Feldman* tarafından standart denizaltı hareket denklemleri revize edilmiş ve son haline ulaştırılmıştır [19-22]. Bu denklemler, bugün dahi su altı araçları için yapılan seyir benzetim çalışmalarında kullanılmaktadır ve yapılan bu tez çalışmasında da standart denizaltı hareket denklemleri kullanılacaktır. Oluşturulan denklemler denizaltı araçları için geçerli olduğundan, farklı bir su altı aracının hidrodinamik modelleme çalışmaları yapılacağı zaman bu denklemlerin, modellemesi yapılacak su altı aracının sahip olduğu dış yüzey konfigürasyonuna göre düzenlenmesi gerekmektedir.

4.2 Altı Serbestlik Dereceli Hidrodinamik Denklem Setinin Türetilmesi

Su altı dünyasında seyreden araçlar havada seyreden araçlara göre bir çok farklı dinamik ve lineer olmayan etkiye maruz kalmaktadırlar. Hava ortamında önemli olmayan ve ihmal edilebilen bazı terimler su altı ortamında oldukça önemli olmaktadır ve sistem dinamiğine etkisi ihmal edilemeyecek boyuttadır. Bu nedenle su altı sistemleri için geçerli olan denklem setleri havadaki araçlar için geçerli olan denklem setlerinden farklılar göstermektedir. Bu durum bize su altı dünyası için geçerli yeni hareket denklemlerinin türetilmesini zorunlu kılmıştır.

Hidrodinamik denklem setleri türetilirken temelde muhatap olacağımız üç adet X, Y, Z hidrodinamik kuvveti, üç adet K, M, N hidrodinamik momenti ve bu değerlerin değişimine sebep olan doğrusal, açısal ve zaman bağlı hız terimleri bulunmaktadır. Bahsedildiği gibi su altı dünyası yüksek derecede doğrusal olmayan terimler içerdiğinden, kuvvet ve moment ifadelerinin Taylor Serisi açılımları yapılacaktır.

Taylor Serisi matematikte, bir fonksiyonun, o fonksiyonun terimlerinin tek bir noktadaki türev değerlerinden hesaplanan sonsuz toplamı şeklinde yazılması şeklindeki gösterimi veya açılımıdır. Bizim durumumuza uyarlarsak, her bir kuvvet ve moment için bu fonksiyonların terimleri olan hız terimlerine göre Taylor Serisi açılımı yapılacaktır [23].

X kuvveti için Taylor Serisi açılımını yapılmadan önce kuvvet ve momentlerin boyutsuzlaştırma terimleri verilecektir. Su altı terimleri boyutsuzlaştırılırken havadaki ortamın aksine referans alan yerine araç boyunun karesi kullanılmaktadır.

- Boyutsuzlaştırılmış kuvvetler:

$$X' = \frac{X}{\frac{1}{2}\rho l^2 U^2} \qquad Y' = \frac{Y}{\frac{1}{2}\rho l^2 U^2} \qquad Z' = \frac{Z}{\frac{1}{2}\rho l^2 U^2} \qquad \textbf{(4.1)}$$

- Boyutsuzlaştırılmış momentler:

$$K' = \frac{K}{\frac{1}{2}\rho l^3 U^2} \qquad M' = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho l^3 U^2} \qquad N' = \frac{N}{\frac{1}{2}\rho l^3 U^2} \qquad \textbf{(4.2)}$$

- Boyutsuzlaştırılmış hızlar:

$$u' = \frac{u}{U} \qquad v' = \frac{v}{U} \qquad w' = \frac{w}{U} \qquad \textbf{(4.3)}$$

$$p' = \frac{pl}{U} \qquad q' = \frac{ql}{U} \qquad r' = \frac{rl}{U} \qquad \textbf{(4.4)}$$

Yukarıdaki ifadelerde l = araç boyu , U_0= serbest akım hızıdır. Ayrıca,

$$U_0 = u^2 + v^2 + w^2 \qquad 1 = u'^2 + v'^2 + w'^2 \qquad \textbf{(4.5)}$$

Araç belirli hücum ve sapma açıları ile seyir yaptığında, aracın 3 eksende oluşan doğrusal hız bileşenleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$u = U_0\, Cos\beta\, Cos\alpha \qquad \textbf{(4.6)}$$

$$v = U_0\, Sin\beta \qquad \textbf{(4.7)}$$

$$w = U_0\, Cos\beta\, Sin\alpha \qquad \textbf{(4.8)}$$

Burada α açısı, Bölüm 3.1.1'de tanımlanan eksen takımına göre +X ile +Z eksenleri arasındaki, β açısı ise aynı eksen takımında +X ile +Y eksenleri arasındaki açıdır.

X kuvveti farklı eksenlerde oluşan 3 adet doğrusal hızın ve 3 adet açısal hızın fonksiyonudur. X kuvveti aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$X = X(u, v, w, p, q, r) = \tfrac{1}{2}\rho l^2 U^2 X'(u', v', w', p', q', r') \qquad \textbf{(4.9)}$$

X kuvvetinin genel Taylor Serisi formu, bir referans nokta etrafında açılırsa,

$$X'(Re, v', w', p', q', r') = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!}\left[\left(v'\frac{\partial}{\partial\delta} + w'\frac{\partial}{\partial\epsilon} + p'\frac{\partial}{\partial\sigma} + q'\frac{\partial}{\partial\eta} + q'\frac{\partial}{\partial\gamma}\right)\right]^k X'(Re, \delta, \epsilon, \sigma, \eta, \gamma)$$

$\delta, \epsilon, \sigma, \eta, \gamma$ Terimleri sistem dinamiği açısından önemi olmayan sabit terimler olsun,

X kuvvetinin başlangıç değerinin aşağıdaki gibi tanımlanması önemlidir, çünkü X kuvvetinin ve türevlerinin başlangıç değerleri biliniyorsa, bu fonksiyonun diğer noktalardaki değerleriyle aynı değeri verecek bir kuvvet serisi şeklinde yazılabilir.

$$X'_0 = X'(Re_0, 0, 0, 0, 0, 0) \qquad Re_0 = \frac{u.l}{v}$$

$$X'_v = \left[\frac{\partial}{\partial v'} X'(Re_0, v', 0, 0, 0, 0)\right]_{v'=0}$$

$$X' = X'_0 + \left[\left(v'\frac{\partial}{\partial\delta} + w'\frac{\partial}{\partial\epsilon} + p'\frac{\partial}{\partial\sigma} + q'\frac{\partial}{\partial\eta} + q'\frac{\partial}{\partial\gamma}\right)\right] X'(Re, \delta, \epsilon, \sigma, \eta, \gamma) + \ldots\ldots$$

$$X' = X'_0 + \left[X'_v v' + X'_w w' + X'_p p' + X'_q q' + X'_r r'\right] + \ldots\ldots\ldots \qquad \textbf{(4.10)}$$

X kuvvetinin Taylor Serisi açılımı üçüncü dereceden türevleri ifadelerine kadar açılırsa, aşağıdaki denklem elde edilir.

$$X' = X'_0 + \frac{1}{2}\left[X'_{vv}v'^2 + 2X'_{vw}v'w' + 2X'_{vp}v'p' + 2X'_{vq}v'q' + 2X'_{vr}v'r' + X'_{ww}w'^2 + 2X'_{wp}w'p' + 2X'_{wq}w'q' + 2X'_{wr}w'r' + X'_{pp}p'^2 + 2X'_{pq}p'q' + 2X'_{pr}p'r' + X'_{qq}q'^2 + 2X'_{qr}q'r'\right] + \frac{1}{6}\left[X'_{vvv}v'^3 + 3X'_{vvw}v'^2w' + 3X'_{vvp}v'^2p' + 3X'_{vvq}v'^2q' + 3X'_{vvr}v'^2r' + 3X'_{vww}v'w'^2 + 6X'_{vwp}v'w'p' + 6X'_{vwr}v'w'r' + 6X'_{vwq}v'w'q' + \cdots + X'_{rrr}r'^3\right] + \ldots\ldots\ldots \quad \textbf{(4.11)}$$

Görüldüğü gibi yukarıdaki X kuvvetinin Taylor Serisini daha üst dereceler için de açabiliriz ancak, o zaman denklemler içinden çıkılmaz bir hal alacaktır. Yukarıda X kuvveti için yazılmış olan Taylor Serisi açılımı diğer kuvvetler Y, Z için ve momentler K, M, N için de benzer şekilde yazılabilir [23].

Su altı denklemleri için Taylor serilerinin 2. dereceye kadar açılımı hareketin ifade edilmesi için yeterli olmaktadır. Dolayısıyla hareket denklemlerinin 2. dereceden daha üst derecelerde yazılmasına su altı dünyası için gerek yoktur.

Yukarıda anlatılan hidrodinamik kuvvet ve momentlerin doğrusal ve açısal hızlara göre türevlerini içeren Taylor Serisi açılımları ile ilgili çalışmalar, ilk bölümde anlatıldığı gibi *Gertler M*. ve *Hagen G.R*. tarafından detaylıca yapılmıştır [20].

Yapılan çalışmalar sonucunda gelinen noktada, hidrodinamik kuvvet ve momentlerin boyutlaştırılmış haldeki açılımları aşağıda gösterildiği gibi düzenlenmiş ve bu açılımlar 6 serbestlik dereceli su altı dünyası hareket denklemleri için bir kült olmuştur [20].

<u>Eksenel Kuvvet Denklemi:</u> **(4.12)**

$$m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] =$$
$$+\frac{\rho}{2}l^4\left[X_{qq}'q^2 + X_{rr}'r^2 + X_{rp}'rp\right]$$
$$+\frac{\rho}{2}l^3\left[X_{\dot{u}}'\dot{u} + X_{vr}'vr + X_{wq}'wq\right]$$
$$+\frac{\rho}{2}l^2[X_{uu}'u^2 + X_{vv}'v^2 + X_{ww}'w^2]$$
$$+\frac{\rho}{2}l^2u^2[X_{\delta e\delta e}'\delta e^2 + X_{\delta r\delta r}'\delta r^2 + X_{\delta a\delta a}'\delta a^2]$$
$$-(W - B)\,sin\theta$$

Sapma Kuvveti Denklemi: **(4.13)**

$$m[\dot{v} - wp + ur - Y_G(r^2 + p^2) + Z_G(qr - \dot{p}) + X_G(qp + \dot{r})] =$$
$$+\frac{\rho}{2} l^4 \left[Y_{\dot{r}}'\dot{r} + Y_{\dot{p}}'\dot{p} + Y_{p|p|}'p|p| + Y_{pq}'pq + Y_{qr}'qr\right]$$
$$+\frac{\rho}{2} l^3 \left[Y_{\dot{v}}'\dot{v} + Y_{vq}'vq + Y_{wp}'wp + Y_{wr}'wr\right]$$
$$+\frac{\rho}{2} l^3 \left[Y_r'ur + Y_p'up + Y_{|r|\delta r}'u|r|\delta r + Y_{v|r|}'\frac{v}{|v|}(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}|r|\right]$$
$$+\frac{\rho}{2} l^2 \left[Y_v'uv + Y_{v|v|}'v(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}\right]$$
$$+\frac{\rho}{2} l^2 [Y_{vw}'vw + Y_{\delta r}'u^2\delta r]$$
$$+(W - B)\, cos\theta\, sin\phi$$

Düşey Öteleme Kuvveti Denklemi: **(4.14)**

$$m[\dot{w} - uq + vp - Z_G(q^2 + p^2) + X_G(rp - \dot{q}) + Y_G(rq + \dot{p})] =$$
$$+\frac{\rho}{2} l^4 \left[Z_{\dot{q}}'\dot{q} + Z_{pp}'pp^2 + Z_{rr}'rr^2 + Z_{rp}'rp\right]$$
$$+\frac{\rho}{2} l^3 \left[Z_{\dot{w}}'\dot{w} + Z_{vp}'vp + Z_{vr}'vr\right]$$
$$+\frac{\rho}{2} l^3 \left[Z_q'uq + Z_{|q|\delta e}'u|q|\delta e + Z_{w|q|}'\frac{w}{|w|}(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}|q|\right]$$
$$+\frac{\rho}{2} l^2 \left[Z_w'uw + Z_{w|w|}'w\left|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}\right|\right]$$
$$+\frac{\rho}{2} l^2 \left[Z_{|w|}'u|w| + Z_{ww}'\left|w(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}\right|\right]$$
$$+\frac{\rho}{2} l^2 [Z_{vv}'v^2 + Z_{\delta e}'u^2\delta e + Z_{\delta a}'u^2\delta a]$$
$$+(W - B)\, cos\theta\, cos\phi$$

Yuvarlanma Momenti Denklemi: **(4.15)**

$$I_x\dot{p} + (I_z - I_y)qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy}$$
$$+m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] =$$
$$+\frac{\rho}{2} l^5 \left[K_{\dot{p}}'\dot{p} + K_{\dot{r}}'\dot{r} + K_{p|p|}'p|p| + K_{pq}'pq + K_{qr}'qr\right]$$
$$+\frac{\rho}{2} l^4 \left[K_{\dot{v}}'\dot{v} + K_r'ur + K_p'up\right]$$
$$+\frac{\rho}{2} l^4 \left[K_{vq}'vq + K_{wp}'wp + K_{wr}'wr\right]$$
$$+\frac{\rho}{2} l^3 \left[K_v'uv + K_{v|v|}'v(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}\right]$$
$$+\frac{\rho}{2} l^3 [K_{vw}'vw + K_{\delta r}'u^2\delta r + K_{\delta a}'u^2\delta a]$$
$$+(y_G W - y_B B)\, cos\theta\, cos\phi - (z_G W - z_B B)\, cos\theta\, sin\phi$$

Yunuslama Momenti Denklemi: **(4.16)**

$$I_y\dot{q} + (I_x - I_z)rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (qp - \dot{r})I_{yz}$$
$$+m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] =$$
$$+\frac{\rho}{2}l^5\left[M_{\dot{q}}'\dot{q} + M_{pp}'pp^2 + M_{rr}'rr^2 + M_{rp}'rp + M_{q|q|}'q|q|\right]$$
$$+\frac{\rho}{2}l^4\left[M_{\dot{w}}'\dot{w} + M_{vp}'vp + M_{vr}'vr\right]$$
$$+\frac{\rho}{2}l^4\left[M_q'uq + M_{|q|\delta e}'u|q|\delta e + M_{w|q|}'\frac{w}{|w|}(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}|q|\right]$$
$$+\frac{\rho}{2}l^3\left[M_w'uw + M_{w|w|}'w\left|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}\right|\right]$$
$$+\frac{\rho}{2}l^3\left[M_{|w|}'u|w| + M_{ww}'\left|w(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}\right|\right]$$
$$+\frac{\rho}{2}l^3[M_{vv}'v^2 + M_{\delta e}'u^2\delta e + M_{\delta a}'u^2\delta a]$$
$$-(x_GW - x_BB)\,cos\theta\,cos\phi - (z_GW - z_BB)\,sin\theta$$

Sapma Momenti Denklemi: **(4.17)**

$$I_x\dot{r} + (I_y - I_x)pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{zx} + (rq - \dot{p})I_{zx}$$
$$+m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] =$$
$$+\frac{\rho}{2}l^5\left[N_{\dot{r}}'\dot{r} + N_{\dot{p}}'\dot{p} + N_{r|r|}'r|r| + N_{pq}'pq + N_{qr}'qr\right]$$
$$+\frac{\rho}{2}l^4\left[N_{\dot{v}}'\dot{v} + N_{vq}'vq + N_{wp}'wp + N_{wr}'wr\right]$$
$$+\frac{\rho}{2}l^4\left[N_r'ur + N_p'up + N_{|r|\delta r}'u|r|\delta r + N_{v|r|}'\left|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}\right|r\right]$$
$$+\frac{\rho}{2}l^3\left[N_v'uv + N_{v|v|}'v\left|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}\right|\right]$$
$$+\frac{\rho}{2}l^3[N_{vw}'vw + N_{\delta r}'u^2\delta r]$$
$$+(x_GW - x_BB)\,cos\theta\,sin\phi - (y_GW - y_BB)\,sin\theta$$

Görüldüğü gibi altı serbestlik dereceli su altı hareket denklemleri, bir çok alt değişkene göre ve o alt değişkenlerin kuvvetlerine veya birbirleri ile olan çarpımlarına göre türevlenebilen, oldukça kompleks ve uzun denklemlerdir. Sorunsuz bir sistem dinamiği benzetimi yapılması için denklemlerdeki tüm katsayıların hesaplanması ve bu katsayıların sisteme olan duyarlılıklarının

belirlenmesi gerekmektedir. Bu denli doğrusal olmayan ve akuple katsayıların hepsinin HAD ortamında hesaplanması oldukça zor, zaman alıcı ve güvenilirlik açısından riskli çalışmalardır. Bu tip katsayıların su altı model test düzeneklerinde hesaplanması en güvenilir yöntemlerdir. Bahsedilen sebeplerden ötürü bu projede yapılacak çalışmalarda, akuple manevra katsayıları HAD hesaplama yöntemleri ile hesaplanamamıştır. Ancak statik katsayılar, doğrusal manevra katsayıları ve ek su kütlesi katsayıları bu proje kapsamında hesaplanmış hidrodinamik katsayılardır.

Bu bölümde su altı araçlarına etkiyen hidrostatik ve hidrodinamik etkiler üzerinde durulacak, bu etkileri oluşturan parametreler ve hidrodinamik denklem setleri oluşturulacaktır. Ayrıca, alt bölümlerde bu etkiler ayrıştırılacak ve her bir etkinin oluşma nedeni ve aracın bu etkiye olan duyarlılığı anlatılacaktır.

4.3 Hidrostatik Bileşenler

Herhangi bir cisim su altına batırıldığı zaman o cismin üzerine suyun kaldırma kuvvetinden kaynaklanan bir kuvvet etkimektedir. Bu kuvvet cismi suyun yüzeyine çıkartıcı yönde etkimektedir. Bu kuvvete hidrostatik kaldırma kuvveti denilir. Hidrostatik kuvvet aracın hareketli veya durağan olmasından bağımsız bir şekilde araca etkimektedir. Hidrostatik kuvvet kaldırma kuvveti, aracın içinde bulunduğu sıvının yoğunluğuna ve aracın sıvı içerisindeki batmış hacmine bağlıdır.

$$\text{Hidrostatik Kaldırma Kuvveti } (B) = \rho.\Delta V.g \Rightarrow F_{\text{Kaldırma}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -B \end{pmatrix} \quad \textbf{(4.18)}$$

$$\text{Ağırlığı } (W) = m.g \Rightarrow F_{\text{Ağırlık}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ W \end{pmatrix} \quad \textbf{(4.19)}$$

Yukarda verilen iki kuvvet görüldüğü gibi araç üzerinde ters yönlerde etki oluşturmaktadırlar.

Aracın suyun içinde konumlanmasına göre ağırlık ve kaldırma kuvvetleri, araç üzerinde farklı yönlerde kuvvet ya da moment etkisi oluşturabilirler. Dünya eksen takımına göre farklı konumlarda konumlandırılmış araç için, araca etkiyebilecek 3 eksendeki hidrostatik kuvvet ve moment ifadeleri aşağıda verilmiştir [12].

$$X_{\text{Hidrostatik}} = -(W - B)\sin\theta \quad \textbf{(4.20)}$$

$$Y_{\text{Hidrostatik}} = (W - B)\cos\theta\sin\phi \quad \textbf{(4.21)}$$

$$Y_{Hidrostatik} = (W - B)\cos\theta\cos\phi \quad \textbf{(4.22)}$$

$$K_{Hidrostatik} = -(y_gW - y_bB)\cos\theta\cos\phi - (z_gW - z_bB)\cos\theta\sin\phi \quad \textbf{(4.23)}$$

$$M_{Hidrostatik} = -(z_gW - z_bB)\sin\theta - (x_gW - x_bB)\cos\theta\cos\phi \quad \textbf{(4.24)}$$

$$N_{Hidrostatik} = -(x_gW - x_bB)\cos\theta\sin\phi - (y_gW - y_bB)\sin\theta \quad \textbf{(4.25)}$$

Yukardaki denklemlerde görüldüğü gibi, aracın statik kaldırma kuvveti ve ağırlık merkezi, araç üzerinde 3 eksende kuvvet oluşumuna sebep olmaktadır. Ayrıca ağırlık merkezi ve kaldırma merkezinin hidrodinamik moment merkezlerine olan uzaklığına bağlı olarak, kaldırma kuvveti ve ağırlık değerleri araç üzerinde hidrodinamik moment oluşmasına neden olmaktadır. Hidrostatik momentlerden özellikle yunuslama ve dönme momentleri, aracın hareketine, performansına ve stabilitesine önemli ölçüde olumlu veya olumsuz katkıda bulunurlar.

4.4 Hidrodinamik Bileşenler

Su altı araçları, içerisinde hareket ettiği akışkan ortam sebebiyle, hava ortamında hareket eden araçlara göre farklı dinamik özelliklere sahiptirler.

Bu dinamik özeliklerden bazıları ek su kütlesi ve ataleti katsayıları ile aracın farklı eksenlerindeki hareketlerinin birbirleriyle olan akuple ilişkilerinden kaynaklanan çapraz akış etkileridir. Dolayısıyla su altı için hidrodinamik modelleme incelenirken, havadaki aerodinamikten faklı olarak bazı özel terimler dikkate alınmalıdır.

Hidrodinamik modelleme konusu incelendiğinde, hidrodinamik denklem setlerini oluşturan hidrodinamik katsayılarının temelde iki ana guruba ayrıldığı görülmektedir. Bunlar statik hidrodinamik katsayılar ve dinamik hidrodinamik katsayılardır. Dinamik hidrodinamik katsayılar da kendi içinde; lineer manevra katsayıları, lineer olmayan manevra katsayıları, akuple manevra katsayıları ve ek su & ataleti katsayıları olmak üzere 4 alt guruba ayrılırlar [20].

Yapılan tez çalışması kapsamında Autosub otonom su altı aracının statik hidrodinamik katsayıları ve dinamik hidrodinamik katsayılarının da çoğu hesaplanmıştır. Statik katsayılar, lineer manevra katsayıları ve lineer olmayan manevra katsayıları HAD hesaplama yöntemleri ile hesaplanırken, ek su ve ataleti katsayıları ise ampirik hesaplama yöntemleri ile hesaplanmıştır. Akuple Manevra katsayıları bu çalışma kapsamında hesaplanamamıştır. Çünkü akuple manevra

katsayılarının HAD hesaplama yöntemleri ile hesaplanması oldukça zor, zaman alıcı ve güvenilirlik açısından riskli olduğu için o katsayıların deneysel yöntemler ile hesaplanması tercih edilmektedir. Bu bölümde öncelikle statik hidrodinamik katsayılar incelenecektir.

4.4.1 Statik hidrodinamik katsayılar

Statik hidrodinamik katsayılar herhangi bir manevra hareketinin olmadığı ancak, belirli hücum açıları ve kontrol yüzeyi sapma açıları ile belirli doğrusal hızlarda seyir yapıyorken oluşan hidrodinamik katsayılardır. Bu katsayılar, aracın seyri sırasında oluşan 3 eksendeki kuvvetlerin ve o eksenler etrafında oluşan momentlerin doğrusal hızlara ve kontrol yüzeyi sapma açılarına göre türevlerinin boyutsuzlaştırılmasından oluşan hidrodinamik katsayılardır.

Yapılan kabul görmüş çalışmalarda görülmüştür ki, hidrodinamik katsayılar boyutuzlaştırılırken havadan farklı olarak yüzey alanı yerine aracın boyunun karesi kullanılmaktadır. Dolayısıyla statik hidrodinamik katsayıları boyutsuzlaştırmak için ihtiyacımız olan parametreler suyun yoğunluğu, aracın seyir hızı, aracın boyu ve araç hücum açısı ile seyir yapıyorsa, aracın saptığı yöndeki eksende oluşan hız bileşenidir [20].

Örneğin, X Ekseni boyunca oluşan herhangi bir hidrodinamik kuvvet katsayısını aşağıdaki gibi lineerleştirebilir ve daha sonrada boyutsuzlaştırabiliriz.

$$X_{uu} = \frac{\partial^2 X}{\partial u \partial u} \quad \rightarrow \quad \mathrm{X}=X_{uu}u^2 \quad \rightarrow \quad \mathrm{X} = \left(X_{uu}{}' \frac{1}{2}\rho l^2\right) u^2 \quad \rightarrow \quad X_{uu}{}' = \frac{X}{\left(\frac{1}{2}\rho u^2 l^2\right)} \qquad \textbf{(4.26)}$$

Aracın hücum açılı ve elevator sapmalı bir seyir yaptığı durumda oluşan yunuslama momenti katsayısının boyutsuzlaştırılmasını da gösterelim. Araç hücum açısı ile seyir yaptığında, aracın üzerinde "*u*" ve "*w*" doğrusal hızları oluşacaktır.

$$u = U_0 \cos\alpha \qquad \textbf{(4.27)}$$

$$w = U_0 \sin\alpha \qquad \textbf{(4.28)}$$

Dolayısıyla hücum açılı bir hareket sırasında aşağıdaki gibi bir katsayı oluşurken,

$$M_w = \frac{\partial M}{\partial w} \quad \rightarrow \mathrm{M} = M_w w \quad \rightarrow \quad \mathrm{M}= \left(M_w{}' w \frac{1}{2}\rho l^3\right) u \quad \rightarrow \quad M_w{}' = \frac{M}{\left(\frac{1}{2}\rho u w l^3\right)} \qquad \textbf{(4.29)}$$

Kontrol yüzeyi sapma açısının var olduğu bir durumda ise aşağıdaki gibi bir katsayı oluşacaktır.

$$M = \left(M_{\delta e}{}'\delta e \frac{1}{2}\rho l^3\right)u^2 \quad \rightarrow \quad M_{\delta e}{}' = \frac{M}{\left(\frac{1}{2}\rho u^2 l^3 \delta e\right)} \qquad \textbf{(4.30)}$$

Yukarda hücum açısının ve elevator sapmasının var olduğu bir durum için, yunuslama momentinin dalma doğrusal hızına ve elevator sapmasına göre türevlerinin boyutsuzlaştırılmış halleri görülmektedir. Bu çalışma yunuslama düzlemindeki bir hareket için yapılmış olsa da, sapma ve dönme düzlemlerinde de benzer şekilde yapılabilir. Tüm hidrodinamik kuvvet ve momentlerin farklı parametrelere göre türevlerinin, boyutsuzlaştırılmış halleri Bölüm 4.2'de türetilen hidrodinamik denklem setlerindeki bir hidrodinamik katsayıya denk gelmektedir.

4.4.2 Dinamik hidrodinamik katsayılar

Dinamik hidrodinamik katsayılar, su altı aracı manevralı veya ivmelenmeli bir hareket yaptığında ortaya çıkan katsayılardır. Dinamik hidrodinamik katsayıları temelde 4 alt guruba ayırabiliriz [20,22]. Bunlar; lineer manevra katsayıları, lineer olmayan manevra katsayıları, akuple manevra katsayıları ile ek su kütlesi ve ataleti katsayılarıdır. Görüldüğü gibi bir su altı aracının manevralı bir hareketi sırasında birçok katsayı oluşabilmektedir.

Hidrodinamik hareket denklemlerinin aracın seyrine göre doğru bir biçimde tanımlanması ve denklemlerin içeriğindeki dinamik hidrodinamik katsayıların aracın hareketinden doğru bir biçimde ayrıklaştırılması, hidrodinamik modellemenin doğru yapılabilmesi adına oldukça önemlidir.

4.4.2.1 Lineer manevra katsayıları

Lineer manevra katsayıları, aracın altı serbestlik derecesindeki manevralı hareketlerinde oluşan kuvvet ve momentlerin, aynı manevra hareketinde oluşan doğrusal ve açısal hızlara göre türevlerinden oluşmaktadır [20,22].

Lineer manevra katsayılarının boyutsuzlaştırılmasını görmek için bir su altı aracının q açısal hızı ile yunuslama hareketi yaptığını varsayalım. Bu sırada aracın üzerinde oluşacak kuvvet ve momentlerden en belirginleri yunuslama momenti ve dalma kuvvetidir. Bu manevra esnasında oluşan manevra katsayılarını aşağıdaki gibi türetebiliriz.

$$M = \left(M_q{}'q \frac{1}{2}\rho l^4\right)u \quad \rightarrow \quad M_q{}' = \frac{M}{\left(\frac{1}{2}\rho q u l^4\right)} \qquad \textbf{(4.31)}$$

$$\text{N}= \left(N_q{}'q\frac{1}{2}\rho l^3\right)u \quad \rightarrow \qquad N_q{}' = \frac{N}{\left(\frac{1}{2}\rho q u l^3\right)} \tag{4.32}$$

Su altı araçlarının farklı manevraları sırasında yukarıdaki gibi birçok katsayı oluşmaktadır. Yukardaki tipte oluşan lineer manevra katsayıları haricinde, kontrol yüzeyi sapma hareketinin de içinde olduğu manevra katsayıları da vardır. Bu katsayılar hesaplanırken, kuvvet ya da moment değerinin hız ile kontrol yüzeyi sapma açısının çarpımına göre türevi alınır ve boyutsuzlaştırılır.

$$\text{M}= \left(M_{q.\delta e}{}'q.\delta e.\frac{1}{2}\rho l^4\right)u \quad \rightarrow \qquad M_{q.\delta e}{}' = \frac{M}{\left(\frac{1}{2}\rho.q.\delta e.u.l^4\right)} \tag{4.33}$$

Görüldüğü gibi, herhangi bir manevra hareketi sırasında oluşan kuvvet ve momentlerin, o manevra hareketi süresince değişen tüm kinematik parametrelere göre türevlerinin dikkate alınması ve hidrodinamik hareket denklemlerine eklenmesi gerekmektedir. Bu bölümde birinci dereceden manevra türevlerin olduğu ve farklı düzlemlerdeki manevraların birbirlerini etkilemediği katsayılar üzerinde durulmuştur.

4.4.2.2 Lineer olmayan manevra katsayıları

Lineer olmayan manevra katsayıları, lineer manevra katsayılarının 2. dereceden türevlerinden oluşmaktadır [20]. Ancak, su altında hareket eden araçların dinamiğine bakıldığı zaman tüm lineer manevra katsayılarının 2. dereceden türevleri için duyarlı değildirler. Su altında hareket eden araçların sistem dinamiği incelendiğinde, 2. dereceden daha üst mertebelerde değişen hidrodinamik katsayıların, sisteme olan duyarlılığının az olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sebeple yapılan çalışmada lineer olmayan manevra katsayılar 2. dereceden türev mertebelerine kadar incelenecektir. Manevra esnasında oluşan kuvvet ve momentlerin, çoğunlukla aracın manevrasını yaptığı düzlemin içinde kalan doğrusal ve açısal hızlara göre 2.dereceden türevleri mevcuttur. Ancak, farklı tipteki manevralarda kendi düzlemi içinde olmayan hızlara göre de 2. dereceden türevlenen katsayılar mevcuttur.

$$\text{M}= \left(M_{qq}{}'qq\frac{1}{2}\rho l^5\right) \quad \rightarrow \qquad M_{qq}{}' = \frac{M}{\left(\frac{1}{2}\rho.q.q.l^5\right)} \tag{4.34}$$

$$\text{M}= \left(M_{rr}{}'rr\frac{1}{2}\rho l^5\right) \quad \rightarrow \qquad M_{rr}{}' = \frac{M}{\left(\frac{1}{2}\rho.r.r.l^5\right)} \tag{4.35}$$

$$\text{M}= \left(M_{pp}'pp\frac{1}{2}\rho l^5\right) \quad \rightarrow \quad M_{pp}' = \frac{M}{\left(\frac{1}{2}\rho.p.p.l^5\right)} \tag{4.36}$$

$$\text{M}= \left(M_{ww}'ww\frac{1}{2}\rho l^4\right) \quad \rightarrow \quad M_{ww}' = \frac{M}{\left(\frac{1}{2}\rho.w.w.l^4\right)} \tag{4.37}$$

Yukarda yunuslama momentinin oluştuğunda oluşabilen lineer olmayan manevra katsayılarından örnekler verilmiştir. Ancak, ileriki bölümlerde tüm hidrodinamik denklem setleri yazıldığında, orada diğer lineer olmayan manevra katsayılarına da yer verilecektir.

4.4.2.3 Akuple manevra katsayıları

Su altı seyir dinamiği, akış yapısı ve ortam özellikleri sebebi ile fazlasıyla doğrusal olmayan ve akuple terimleri barındırmaktadır. Bir su altı aracı farklı manevra koşullarında seyir yaptığında sisteme birçok akuple etki etkiyebilmektedir [20].

Akuple manevra katsayıları, iki doğrusal hızın, iki açısal hızın veya bir doğrusal ve bir açısal hızın sisteme beraber etkidiğinde oluşan hidrodinamik manevra katsayılarıdır. Örneğin araç hücum açılı bir dalma hareketi yaptığından, aracın üzerinde hem hücum açısından kaynaklı dalma hızı (w), hem de yunuslama açısal hızına (q) sahip olacağından, yunuslama momentine M_{wq} gibi bir katsayı eklenecektir. Bu terim doğrusal ve açısal hızların araca beraber etkidiğinde oluşan bir manevra katsayısıdır.

Akuple terimlerin özellikle oluşabileceği manevra hareketleri aracın yuvarlanma ile beraber yunuslama veya sapma hareketi yaptığı durumlardır. Su altı araçları genelde dönme için yuvarlanma hareketine maruz kalırlar (dönmek için yuvarlanma hareketi). Bu tip durumlarda da, yuvarlanma açısal hızı (p) ile sapma (r) veya yunuslama (q) açısal hızı sisteme beraber etkirler. Örneğin M_{rp} böyle bir katsayıdır. Araç tek bir düzlem üzerinde hareket ederken, farklı bir düzlemdeki hareket bu düzlemdeki hareketi etkileyebilir. Mesela araç yunuslama hareketi yaparken, sapma açısal hızının etkisine maruz kalıyorsa bu durumda N_{qr} ve K_{qr} gibi katsayılar oluşacaktır [20,22].

$$M = \left(M_{wq}{}' wq \frac{1}{2}\rho l^4\right) \quad \rightarrow \quad M_{wq}{}' = \frac{M}{\left(\frac{1}{2}\rho.q.q.l^4\right)} \tag{4.38}$$

$$M = \left(M_{rp}{}' rp \frac{1}{2}\rho l^5\right) \quad \rightarrow \quad M_{rp}{}' = \frac{M}{\left(\frac{1}{2}\rho.r.p.l^5\right)} \tag{4.39}$$

$$N = \left(N_{qr}{}' qr \frac{1}{2}\rho l^5\right) \quad \rightarrow \quad N_{qr}{}' = \frac{M}{\left(\frac{1}{2}\rho.q.r.l^5\right)} \tag{4.40}$$

Görüldüğü gibi su altı seyir dinamiğinde birçok hareket tümleşik olarak oluşmaktadır. Bu durum su altı ortamlarının simülasyon ortamında hidrodinamik modelleme yapılmasının zorluğunu gösterirken, su altı test ortamlarına olan ihtiyacı da bir kez daha gündeme getirmektedir. Çünkü bu akuple terimler düzlemsel hareket mekanizması, konikleme hareket mekanizması gibi test imkânları ile güvenilir bir biçimde hesaplanabilmektedir. Ancak bu hareketlerin HAD ortamında modellenmesi oldukça zor, zaman gerektiren ve güvenilirliği yeterli olmayan işlerdir. Dolayısıyla bir su altı aracı tasarlanırken tasarımın sadece simülasyon ortamında yapılması ve doğrulanması, yukarıda bahsedilen dinamik ve doğrusal olmayan koşullardan ötürü risklidir.

4.4.2.4 Ek su kütlesi ve ataleti katsayıları

Ek-su kütlesi bir sualtı aracının ivmeli hareketi sırasında, suyun sahip olduğu viskoz özellikler sebebi ile aracın kendisiyle birlikte hareket ettirdiği sıvının sisteme getirdiği ek kütle ve atalet olarak tanımlanabilir. Ek-su kütlesi kavramı genellikle sualtı aracının ve etrafındaki sınırlı bir hacimdeki suyun bütünleşerek daha büyük kütleli yeni bir sistem oluşturması şeklinde düşünülebilir. Gerçekte ise sualtında harmonik hareket yapmaya zorlanan bir cisim, etrafındaki sıvının tamamının farklı genliklerde salınımına neden olmaktadır. Araçtan uzaklaştıkça salınımın genliği de küçülmekte dolayısıyla etkisi ihmal edilebilir hale gelmektedir. Dolayısıyla ek-su kütlesi; ivmeli bir hareket yapan cismin üzerinde, basınç etkisiyle ortaya çıkan ve cismin ivmesiyle orantılı olarak değişen kuvvetler ve momentler olarak anlaşılmalıdır. Burada ek-su kütlesinin cismin hızıyla değil ivmesiyle orantılı olduğuna dikkat edilmelidir. Dolayısıyla ek su kütlesi etkileri cismin sahip olduğu seyir koşullarından bağımsız sadece cismin ivmeli hareket yapması ile ilgilidir.

Hareket halindeki bir cismin, içerisinde bulunduğu durağan haldeki akışkanın da hareket etmesine neden olacaktır. Akışkan ise cismin hareketine izin verecek şekilde

yer değiştirecek ve daha sonra ilerleyen cismin ardında bıraktığı boş hacmi dolduracaktır. Bu sayede akışkan kinetik enerji kazanacaktır. Bu durum cismin hareket ettiği akışkan ortamın yüksek viskoz özelliklere sahip olmasından ötürü gelmektedir [24].

Yeterince derinde seyreden sualtı araçları için ek-su kütlesi katsayılarının sabit olduğu ve yüzey dalgalarından etkilenmediği varsayılmaktadır. Ek-su kütlesi matrisi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir [24].

$$M_A = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & X_{\dot{v}} & X_{\dot{w}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{u}} & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{w}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & Z_{\dot{v}} & Z_{\dot{w}} & Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\dot{u}} & K_{\dot{v}} & K_{\dot{w}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & M_{\dot{v}} & M_{\dot{w}} & M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{v}} & N_{\dot{w}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad \textbf{(4.41)}$$

Pek çok deniz aracı için yukarıdaki matrisin diagonel elemanları çoğunlukla pozitiftir. Bir su altı aracı içinse ek su matrisi daima pozitif olacaktır ($M_A > 0$). Ayrıca çoğu uygulamalarda ek su matrisinin diagonel olmayan terimleri, diagonel terimlere göre çok küçük ve ihmal edilebilir seviyelerdedir. Eğer bir su altı aracı yatay ve düşey eksenlerde simetrik ise ek su matrisinin diagonel elemanları dışındaki terimlerin etkisi ihmal edilebilir. Dolayısıyla M_A matrisi aşağıdaki gibi sadeleştirilebilir [24].

$$M_A = -diag\left[X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Z_{\dot{w}}, K_{\dot{p}}, M_{\dot{q}}, N_{\dot{r}}\right] \quad \textbf{(4.42)}$$

Ek su kütlesi ve ataleti katsayıları incelendiği zaman, sistem üzerinde etkisi olan katsayılar, ek su matrisinin diagonel olan terimleridir. Bu katsayıların hesaplanması ve sistem dinamiği ve seyir benzetimi hesaplamalarına dâhil edilmesi gerekmektedir. Bu projede ek su katsayıları ampirik formüller aracılığı ile hesaplanmıştır. Hesaplama tekniği ile ilgili detaylı bilgi ilerleyen bölümlerde verilecektir.

Bu bölümde Autosub aracının herhangi bir seyir koşulunda hareket ederken tabii olacağı hidrodinamik hareket denklemleri türetilmiştir. Hareket denklemlerini meydana getiren hidrodinamik terimler alt bölümlere ayrılmış ve ayrı başlıklar halinde incelenmiştir. İncelenenden hidrodinamik terimlerin hesaplanması, aracın performans ve tasarım gereksinimlerinin karşılanabilmesi açısından oldukça

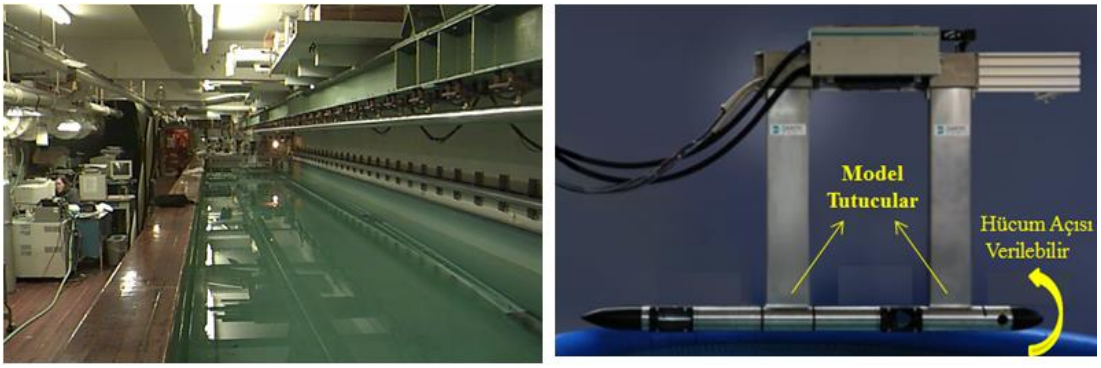
önemlidir. Bu hidrodinamik katsayıları hesaplamak için daha önce bahsedildiği gibi hesaplamaları ve ampirik yöntemler olsa da en güvenilir yöntem katsayıların, su altı model test düzenekleri kullanılarak hesaplanmasıdır. Bu kapsamda bir sonraki bölümde su altı model test düzenekleri tanıtılacak ve hangi hidrodinamik katsayıların hangi test düzeneği ile hesaplanabildiği üzerinde durulacaktır.

5. SU ALTI MODEL TEST DÜZENEKLERİ

Bir su altı aracının simülasyon ve seyir benzetim modelleri kurulurken, bu modele girdi olarak sağlanan en önemli veriler o aracın farklı seyir koşulları için oluşturulmuş hidrodinamik veri tabanlarıdır. Su altı araçlarının hidrodinamik veri tabanlarını oluşturmak için hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri, ampirik yöntemler ve deneysel yöntemler gibi alternatif yollara başvurulabilmektedir. Bu yöntemler arasında geçmişten günümüze en güvenilir olanı şüphesiz deneysel yöntemlerdir. Ancak deneysel yöntemler oldukça maliyetli olmaları ve bu konuda yetişkin personel gerektirmeleri gibi sebeplerle ne yazık ki her zaman tercih edilememektedir. Deneysel yöntemlere alternatif olarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemleri ve ampirik yöntemler geliştirilmiştir. Yapılan bu tez çalışmasında deneysel veriler ile doğrulanmış HAD yöntemleri ve ampirik yöntemler kullanılacaktır. HAD hesaplama modelleri kurulurken, çeşitli deney ortamlarına benzer ortamlar simülasyon ortamında kurulmakta ve istenilen hidrodinamik katsayılar HAD yöntemleri ile hesaplanmaktadır. Dolayısıyla, HAD modelleri kurulurken referans alınan deney düzeneklerinin tanıtılması ve su altı model testleri ile hangi hidrodinamik katsayıların hesaplanabildiğinin incelenmesi amacıyla aşağıda su altı model test düzenekleri hakkında bilgiler verilmiştir.

5.1 Doğrusal Çekme Tankı Test Düzeneği

Doğrusal çekme tankı testleri statik hidrodinamik katsayıların bulunması amacıyla kullanılan su altı model test düzenekleridir. Bu test düzeneklerinde araç ölçekli veya ölçeksiz bir biçimde test düzeneklerinin kollarına bağlanır ve model sabitlenir. Model test düzeneğine sabitlenirken modele istenilen sapma, yuvarlanma veya hücum açıları verilebilir. Model ayrıca kontrol yüzeyleri saptırılmış halde de tutuculara sabitlenebilir ve o konfigürasyon için statik hidrodinamik katsayılar hesaplanabilir [48].



Şekil 5.1 : Doğrusal çekme tankı test düzeneği [48,49].

Bu test düzeneklerinde açısal ya da zamana bağlı hız tanımlanması olanağı yoktur. O yüzden model sabit, doğrusal bir hızla çekme tankının içinde çekilir ve modelin üzerinde oluşan hidrodinamik kuvvet ve momentler farklı eksenlerde ölçülebilir. Deney sonucunda ölçülen sonuçların içinde model tutacakların da katkısı olacağından, modeli sabitleyen kollar çekme tankında yalnız başlarına çekilirler ve model tutacakların tekil oluşturdukları kuvvetler ölçülür. Okunan bu değerler, toplam model direncinden çıkartılır ve ham modelin hidrodinamik deneysel verilerine ulaşılmış olur. Deneyden elde edilen kuvvet ve moment değerleri istenilen değerle ile boyutsuzlaştırılarak statik hidrodinamik katsayılar elde edilir. Doğrusal çekme tankı testlerinden hesaplanabilen hidrodinamik katsayılar ve X, Y, Z yönlerindeki doğrusal hız bileşenleri aşağıda verilmiştir [25].

$$u = U_0 \, Cos\beta \, Cos\alpha \qquad \textbf{(5.1)}$$

$$v = U_0 \, Sin\beta \qquad \textbf{(5.2)}$$

$$w = U_0 \, Cos\beta \, Sin\alpha \qquad \textbf{(5.3)}$$

Çizelge 5.1 : Doğrusal çekme tankı test düzeneği ile hesaplanabilen katsayılar [25].

Uygulanan Test Konfigürasyonu	Hesaplanabilen Katsayılar
Sapma Açılı (β) Çekme Testi	X_{vv}, $Y_{v\|v\|}$, Z_{vv}, M_{vv}, $N_{v\|v\|}$, $K_{v\|v\|}$, Y_v, K_v, N_v
Hücum Açılı (α) Çekme Testi	X_{ww}, Z_w, $Z_{\|w\|}$, Z_{ww}, $Z_{w\|w\|}$, $M_{\|w\|}$, M_w, M_{ww}, $M_{w\|w\|}$

Görüldüğü gibi doğrusal çekme tankı testlerinde aracın hücum açılı ve kontrol yüzeyi sapma açılı seyir koşullarında oluşan kuvvet ve moment değerleri ile araca etkiyen sürükleme kuvveti değerleri ölçülebilir. Bu kuvvet değerleri ile aracın statik hidrodinamik veri tabanı oluşturulmuş olur ve araca uygun pervane tasarımı yapmak için aracın itki profili çıkartılabilir.

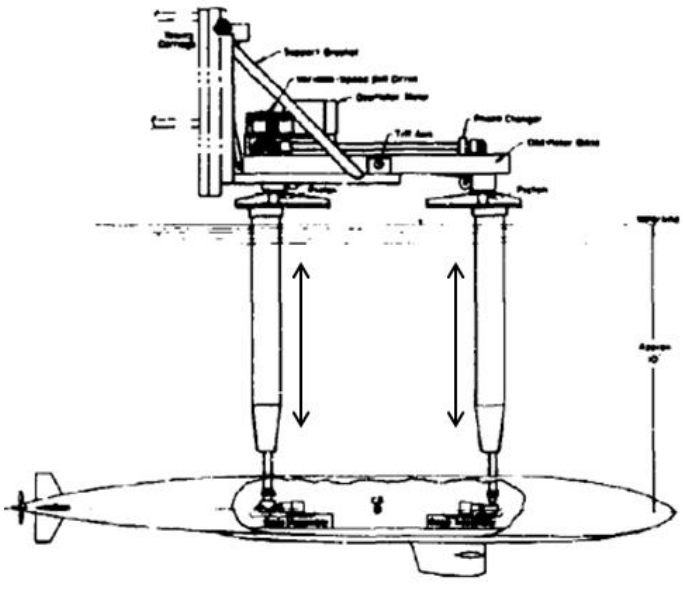
5.2 Düzlemsel Hareket Mekanizması (*Planar Motion Mechanism*)

Düzlemsel hareket mekanizması (DHM) kullanılarak su altı araçlarının statik ve dinamik hidrodinamik katsayıları hesaplanabilmektedir. Dinamik hidrodinamik katsayılardan açısal hızla, doğrusal hızla ve kontrol yüzeyi sapma açısı ile değişebilen lineer manevra katsayıları, akuple manevra katsayıları ve ek su katsayıları düzlemsel hareket mekanizması sayesinde hesaplanabilmektedir [21]. Bu test düzeneği aracın modele yatay veya dikey bağlanmasına göre yatay veya dikey düzlemsel hareket mekanizması olarak çalışabilmektedir. Düzlemsel hareket test düzeneğinde model, birbirinden bağımsız veya bağımlı hareket edebilen iki adet model tutucuya bağlı iken, aynı anda X ekseni yönünde doğrusal öteleme hareketi yapabilmektedir [21]. Düzlemsel hareket test mekanizmasında kullanılan hareket denklemleri aşağıda verilmiştir. Testler sırasında frekans (ω), hücum açısı (α) ve sapma açısı (β) değiştirilerek farklı manevralar modellenebilmektedir.

$$y = y_0 \sin(\omega t) \qquad \psi = \psi_0 sin(\omega t) \qquad \textbf{(5.4)}$$

$$v = \dot{y} = \omega y_0 \cos(\omega t) \qquad r = \dot{\psi} = \omega \psi_0 \, cos(\omega t) \qquad \textbf{(5.5)}$$

$$\dot{v} = \ddot{y} = -\omega^2 y_0 \sin(\omega t) \qquad \dot{r} = \ddot{\psi} = -\omega^2 y_0 \sin(\omega t) \qquad \textbf{(5.6)}$$



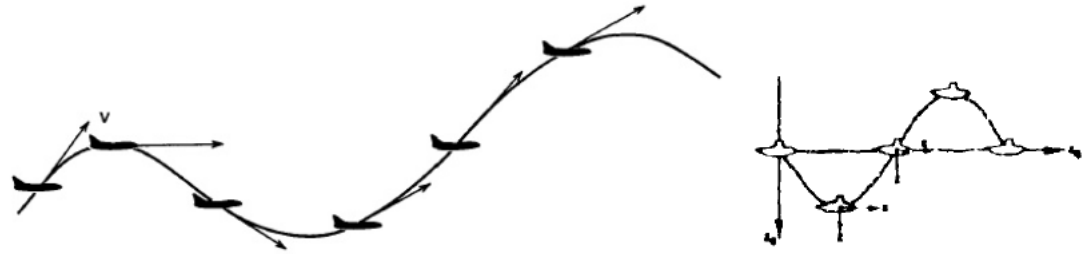
Şekil 5.2 : Düzlemsel hareket mekanizması test düzeneği [21].

Modeli taşıyan bu iki tutucu birbirinden bağımsız çalıştırıldığında araca sinüzoidal bir hareket yaptırarak aracın sıfır hücum açısında yunuslama veya sapma hareketleri yapmasını sağlarlar.



Şekil 5.3 : Sıfır hücum açısında saf yunuslama hareketi [21,26]

Bu hareket modelin lineer manevra katsayılarının ($M_q{}'$, $N_r{}'$ vs.) veya model bir yuvarlanma açısı bağlandığında akuple manevra katsayılarının ($M_{qr}{}'$ gibi) hesaplanmasını sağlamaktadır. Ayrıca test düzeneğinin sahip olduğu düşey model tutucular birbirleriyle bağımlı çalıştırıldığında ise araca açısal hızsız yalnızca düşey veya yanal öteleme hareketleri yaptırılabilmektedir. Bu hareket sayesinde ise aracın ivmeye bağlı hidrodinamik katsayıları olan ek su katsayıları hesaplanabilmektedir.



Şekil 5.4 : Sıfır yunuslama açısal hızında düşey öteleme hareketi [21,26]

DHM ölçekli veya ölçeksiz modeller için kullanılabilmektedir. Modeller belirli hücum açıları veya kontrol yüzeyi sapma açıları ile model tutuculara bağlandıklarında farklı frekans değerleri test sistemine beslenerek, HAD yöntemleri ile hesaplanması oldukça zor olan akuple manevra katsayıları ve ek su katsayıları deneysel olarak hesaplanabilmektedir. Çizelge 5.2'de DHM test düzeneği kullanılarak hesaplanabilen hidrodinamik katsayılar gösterilmiştir.

Çizelge 5.2 : Düzlemsel hareket mekanizması kullanılarak hesaplanabilen katsayılar [25].

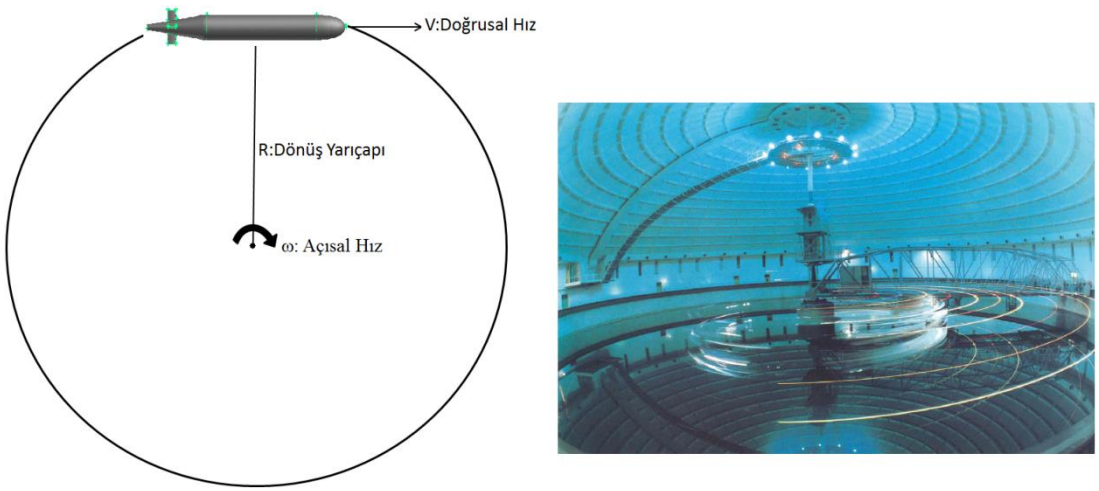
Uygulanan Test Konfigürasyonu	Hesaplanabilen Katsayılar
Sadece Yatay Öteleme	$Y_{\dot{v}}$, $K_{\dot{v}}$, $N_{\dot{v}}$
Sadece Düşey Öteleme	$Z_{\dot{w}}$, $M_{\dot{w}}$
Sadece Sapma	X_{rr}, Z_{rr}, M_{rr}, $N_{r\|r\|}$, Y_r, K_r, N_r, $Y_{\dot{r}}$, $K_{\dot{r}}$, $N_{\dot{r}}$
Sadece Yunuslama	X_{qq}, $M_{q\|q\|}$, $Z_{\dot{q}}$, $M_{\dot{q}}$, Z_q, M_q
Sapma ve Yatay Öteleme Beraber	X_{vr}, Y_{vr}, M_{vr}, $Y_{v\|r\|}$, $N_{v\|r\|}$
Yunuslama ve Düşey Öteleme Beraber	X_{wq} , $Y_{w\|q\|}$, $M_{w\|q\|}$
Yunuslama ve Sapma Beraber	Y_{qr}, K_{qr}, N_{qr}

5.3 Döner Kol Mekanizması Test Düzeneği (*Rotating Arm Mechanism*)

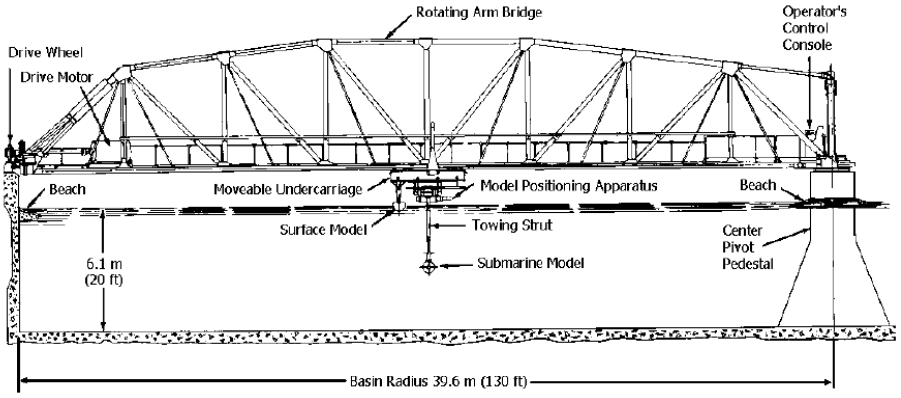
Döner kol test mekanizmalarında testi yapılacak model, büyük bir çemberin merkezinden çember yayına doğru yerleştirilmiş bir kol aracılığı ile tutturularak çember etrafında rotasyonel hareket yaptırılır. Model bağlı olduğu kol üzerinde çember merkezine doğru hareket ettirilebilmektedir [27].

Bu sayede aracın dönüş yarıçapı (R) değiştirilerek açısal hız (ω) ve doğrusal hız (V) değerleri istenilen değere ayarlanabilir.

$$\omega = V.R \qquad \textbf{(5.7)}$$



Şekil 5.5 : Döner kol mekanizması test düzeneği şematik resmi ve görseli [27].



Şekil 5.6 : Döner kol test mekanizmasındaki döner kol [27].

Ayrıca döner kol testlerinde, pervanenin seyir koşullarına uygun olarak döner vaziyette bulunmasının hesaplanan katsayılar üzerinde önemli bir etkisinin olabileceği değerlendirilmektedir. Pervanenin kuyruk çevresinde yaratacağı vakum etkisinin kontrol yüzeyleri üzerindeki akışı hızlandıracağı ve aracın kontrol etkinliğini etkileyebileceği değerlendirilmektedir. Bu sebeplerden ötürü döner kol mekanizması testlerinde su altı araçları, pervane dâhil edilmiş konfigürasyonları ile test edilmektedir [27].

Döner kol mekanizması özellikle akuple ve doğrusal olmayan dinamik hidrodinamik kuvvet ve moment katsayılarının hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bu test tekniği ile hesaplanabilen katsayılar Çizelge 5.3'de verilmiştir.

Çizelge 5.3 : Döner kol test mekanizması ile hesaplanabilen katsayılar [25].

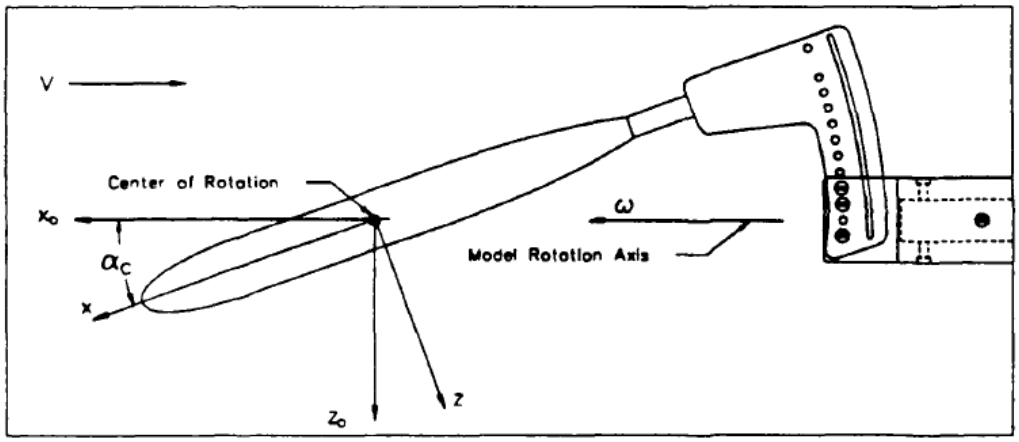
Uygulanan Test Konfigürasyonu	Hesaplanabilen Katsayılar
Yunuslama Düzleminde Dönme	$Z_w, M_w, Z_q, M_q, M_{wq}, Z_{wq}$
Sapma Düzlemde Dönme	$Y_v, N_v, Y_r, N_r, N_{vr}, Y_{vr}$

Döner kol mekanizması testlerinde hücum açısı, dönme yarıçapı, kontrol yüzeyi sapma açısı ve modelin pervanesinin dönüş hız değiştirilerek farklı koşullarda hidrodinamik kuvvetler hesaplanmakta ve regresyon yöntemleriyle bu ölçümlere uygun olarak hidrodinamik katsayılar belirlenmektedir.

5.4 Konileme Hareket Mekanizması (*Coning Motion Mechanism*)

Konik hareket mekanizması testleri yuvarlanma hareketine bağlı katsayıların elde edilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Su altı araçları yuvarlanma eksenindeki atalet momentinin düşük olması nedeniyle yuvarlanma hareketine büyük duyarlılık

gösterirler. Bu test mekanizması ile yalnızca yuvarlanma hareketinin sisteme etkidiği katsayılar hesaplanabildiği gibi, yuvarlanma hareketi ile başka bir hareketin (yunuslama, sapma gibi..) akuple olduğu durumlarda oluşan hidrodinamik katsayılar da hesaplanabilir [23]. Konileme hareket mekanizmasında model belirli bir koniklik açısı ve yuvarlanma açısı ile sabitlenerek test düzeneğine arkadan bağlanır. Model, bağlı olduğu eksen etrafında rotasyonel bir hareket yaparken aynı zamanda +X yönünde ilerleme hareketi yapmaktadır.



Şekil 5.7 : Konileme hareket mekanizması test düzeneği [23]

Bu test düzeneği sayesinde yuvarlanma hareketine bağlı akuple katsayılar ve yalnızca yuvarlanma açısal hızına bağlı lineer manevra katsayıları hesaplanabilmektedir. Konikleme hareket mekanizması ile ileri derecede akuple manevra katsayıları hesaplanabildiğinden, yüksek manevra kabiliyetine sahip araçlar tasarlanabilmesi için bu test düzeneğine ihtiyaç vardır. Konik hareket mekanizmasında modelin sahip olacağı doğrusal ve açısal hızlar aşağıdaki denklemler aracılığı ile hesaplanabilir [23].

$$u = U_o \cos\alpha_c \qquad p = \omega \cos\alpha_c \tag{5.8}$$

$$v = U_o \sin\alpha_c \sin\emptyset \qquad q = \omega \sin\alpha_c \sin\emptyset \tag{5.9}$$

$$w = U_o \sin\alpha_c \cos\emptyset \qquad r = \omega \sin\alpha_c \cos\emptyset \tag{5.10}$$

Burada U_o doğrusal çekme hızını, ω modelin bağlı olduğu döner platformun motorunun dönüş hızını, α_c koniklik açısını ve $\emptyset$ yuvarlanma açısını ifade etmektedir. Altı serbestlik dereceli tüm hız bileşenleri α_c , $\emptyset, \omega$ parametreleri değiştirilerek yukardaki formüller aracılığı ileelde edilmektedir. Konik hareket

mekanizması testi soncunda elde edilen kuvvet ve moment değerleri, sistem tanılama yöntemleriyle ayrıştırılarak ihtiyaç duyulan hidrodinamik katsayı elde edilebilir. Konik hareke testleriyle elde edilebilen katsayılar aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 5.4 : Konileme hareket mekanizması ile hesaplanabilen hidrodinamik katsayılar [23,25]

Uygulanan Test Konfigürasyonu	**Hesaplanabilen Katsayılar**
Düşey ve Yatay Öteleme Beraber	Y_{vw}, K_{vw}, N_{vw},
Yalnızca Yuvarlanma	Y_p, $Y_{p\|p\|}$, Z_{pp}, K_p, $K_{p\|p\|}$, $M_{p\|p\|}$, N_p
Yuvarlanma ile Beraber Tüm Hareketler	X_{rp}, Y_{wp}, Z_{rp}, K_{wp}, M_{rp}, N_{wp}, Y_{pq}, Z_{vp}, K_{pq}, M_{vp}, N_{pq}

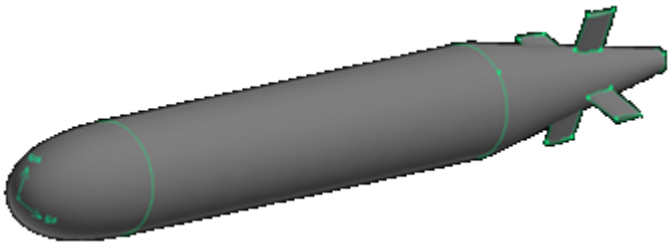
Görüldüğü gibi su altı model test düzenekleri kullanılarak statik ve dinamik tüm hidrodinamik katsayılar hesaplanabilmektedir. İyi manevra kabiliyetine ve yüksek performans değerlerine sahip tasarımlar gerçekleştirebilmek ve bu tasarımları ürüne dönüştürebilmek için su altı test düzenekleri kesinlikle sistem hidrodinamik tasarım aşamalarında kullanılmalıdır. Çünkü yalnızca HAD yöntemleri ile veya ampirik yöntemler kullanılarak hidrodinamik tasarımların yapılması ve iyileştirilmesi oldukça risklidir. Bahsedilen bu hesaplama modelleri kendi içlerinde belirli hatalar barındırmaktadırlar, buna ilaveten su altı dinamiği çok fazla doğrusal olmayan ve akuple terim içermektedir. HAD ve ampirik hesaplama yöntemleri yüksek nonlineerliğin ve akuple terimlerin çokça olduğu ortamlarda yetersiz kalmaktadırlar. Böyle bir durumda da tüm hidrodinamik tasarım, analiz ve modellemenin simülasyon ortamında yapılması ciddi riskleri de beraberinde getirecektir.

6. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ HESAPLAMA YÖNTEMLERİ

Bu çalışmada Autosub otonom su altı aracının hidrodinamik veri tabanı oluşturma çalışmaları çoğunlukla hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) hesaplama yöntemleri kullanılarak yapılmıştır. Hesaplamalar HAD hesaplama metodolojisine uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Öncelikle Autosub aracının geometrisi içeren katı model dosyası oluşturulmuştur. Oluşturulan katı modelin yüzey çözüm ağının, sınır tabakalarının ve akış hacminin oluşturulmasına müteakiben Navier Stokes denklemlerini çözen ticari HAD analiz programları kullanılarak aracın HAD hesaplama modeli kurulmuş ve çok sayıda analiz yapılarak hidrodinamik veri tabanı oluşturulmuştur.

6.1 Katı Model Dosyasının Oluşturulması

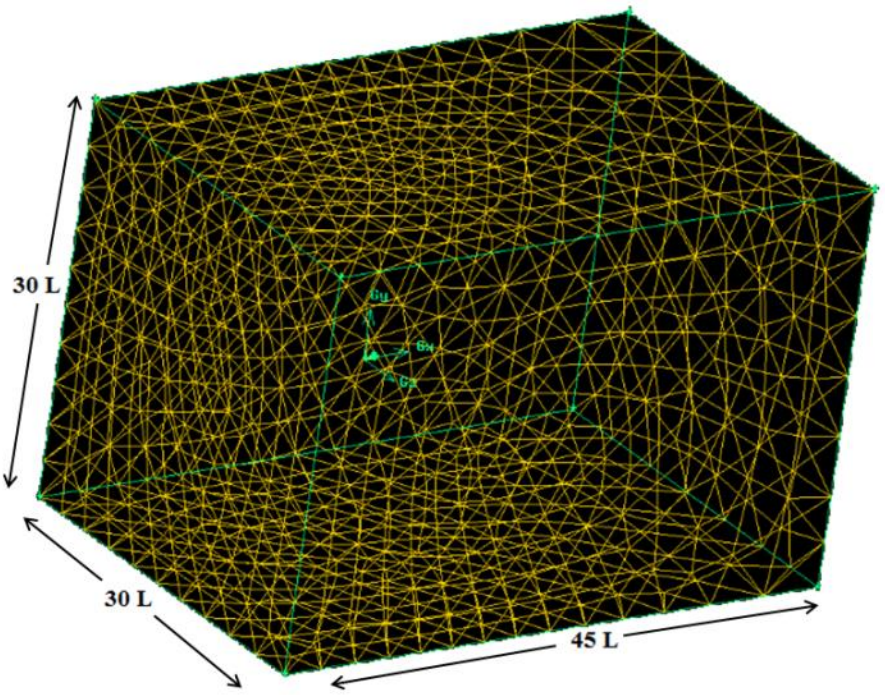
Autosub otonom su altı aracının katı model dosyası, "*DASSAULTS SYSTEMES*" firması tarafından geliştirilmiş CATIA V5 programı kullanılarak üretilmiştir. Autosub su altı aracı elipsoidal burun yapısına, büyük çapta bir gövdeye ve 4 adet NACA 0015 hidrofiline yapısında, simetrik kontrol yüzeyine sahiptir. Aracın teknik çizim bilgilerine Southampton Üniversitesi tarafından yayınlanan dokümanlar aracılığı ile ulaşılmıştır. Farklı kontrol yüzeyi sapma verisi içeren her analiz koşulu için, istenen kontrol yüzeyi sapma açısında yeni katı model dosyası üretilmiştir. Aracın kontrol yüzeylerine, gövdesine ve burun bölümüne ait geometrik bilgiler CATIA V5 programına beslenerek aracın 3 boyutlu geometrisi elde edilmiştir. Autosub su altı aracının katı model resmi Şekil 6.1'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1 : Autosub su altı aracının katı model görüntüsü

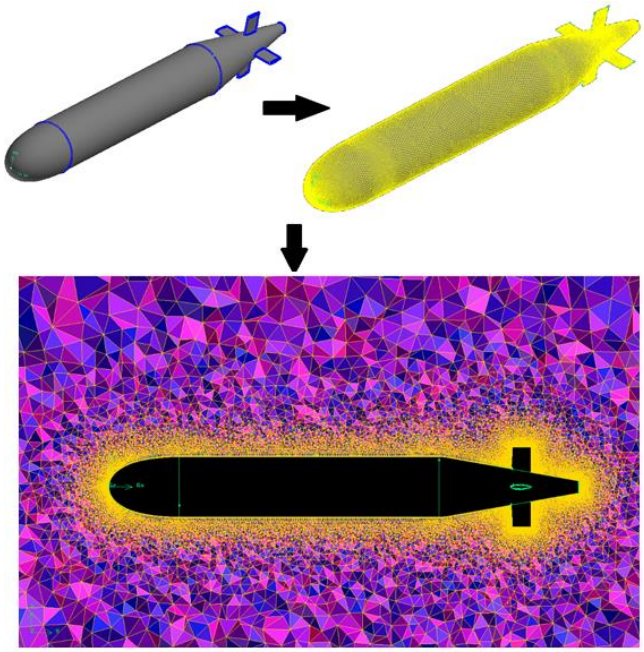
6.2 Çözüm Ağının Oluşturulması

Aracın çözüm ağı üretimi için GAMBIT 2.4.6 versiyonlu sayısal çözüm ağı üretme programı kullanılmıştır. Çözüm ağı üretimi için öncelikle aracın içinde blokaj etkisine maruz kalmadan hareket edebileceği büyüklükte bir akış hacmi seçilmiş ve araç o akış hacminin içine uygun mesafeler korunarak yerleştirilmiştir. Aracın boyunun "L" olduğunu varsayarsak araç akış hacmi içerisine, önünden 15L, arkasından 30L, üstünden, altından, sağ ve solundan 15'er L kadar mesafe kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Aracın akış hacmi çerisindeki konumu Şekil 6.2'de görülmektedir.



Şekil 6.2 : Autosub'ın statik hidrodinamik analizleri için oluşturulan akış hacmi

Akış hacmi oluşturulan modelin çözüm ağı oluşturulurken çözüm ağı üretme hiyerarşisine bağlı kalınmıştır. Bu kapsamda öncelikle aracın kenarları sonrasında yüzeyleri ve en sonunda ise aracın içinde hareket edeceği akış hacminin çözüm ağı oluşturulmuştur. Aracın yüzeyine yakın bölgelerinde akış karakteristiğini ve ani akış değişimlerini iyi modelleyebilmek amacıyla modelin etrafına yoğun bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Ancak ağ yapısı, modelden uzaklaştıkça seyrekleştirilerek toplam çözüm ağı eleman sayısı optimum seviyede tutulmuştur. Aracın kenar, yüzey ve hacim çözüm ağlarına ait görseller aşağıda gösterilmiştir.

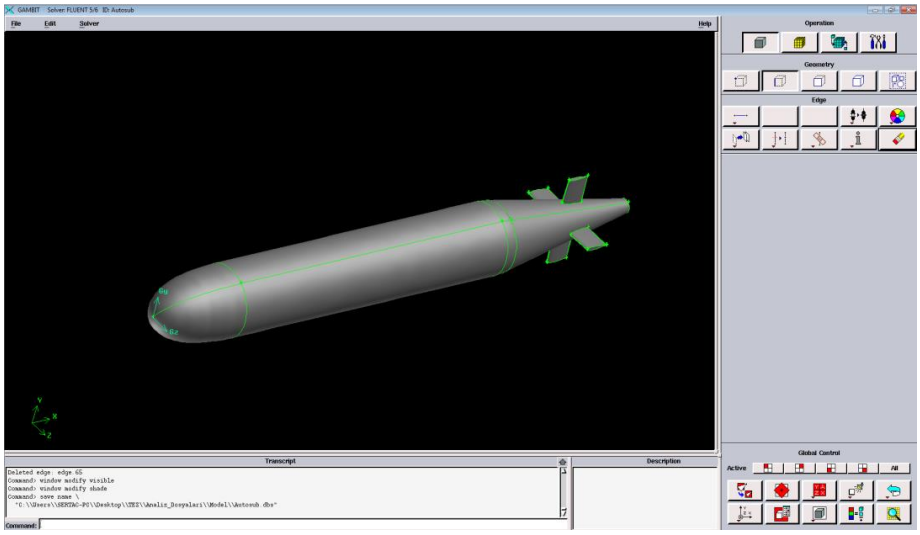


Şekil 6.3 : Autosub'ın kenar, yüzey ve hacim çözüm ağı oluşturma süreci

6.2.1 GAMBIT çözüm ağı oluşturma programı

Gambit, HAD ve Sonlu Elemanlar (SE) analizlerinde kullanılabilen genel amaçlı bir çözüm ağı oluşturma programıdır. Program, Ansys Inc. Firması tarafından geliştirilmiştir.

HAD ve SE analizlerinin üzerinde en fazla vakit harcanan kısmı olan model hazırlama ve sayısal ağ oluşturma işlemlerini Gambit, bünyesinde barındırdığı araçların da yardımıyla, kolaylaştırmayı ve hızlandırmayı amaçlayan bir yazılımdır. Gambit, sunduğu araçlarla, kullanıcısına kaliteli bir çözüm için gerekli ilk şart olan kaliteli çözüm ağına sahip olma imkânı tanır [28].



Şekil 6.4 : Gambit çözüm ağı oluşturma programı kullanıcı ara yüzü

Gambit diğer çözüm ağı oluşturma programlarının aksine, sahip olduğu katı modelleme araçları sayesinde hem karmaşık geometrilerin oluşturulmasına hem de gelişmiş geometri alım kapasitesi sayesinde *UNIGRAPHICS, I-DEAS, Pro/ENGINEER, CATIA, SOLIDWORKS* gibi profesyonel katı modelleme programlarından model alımına olanak sağlar. Ayrıca kendisine ait sanal geometri kavramıyla dışarıdan alınmış modellerdeki en büyük sorun olan geometri temizleme işlemini kolaylaştırarak sayısal ağ oluşumuna uygun modellerin elde edilmesine kolaylaştırır [28].

Gambit, iki boyutta dörtgen ve üçgen elemanların, üç boyutta ise altı yüzlü, dört yüzlü ve geçiş elemanları olarak kama tipi ve piramit tipi elemanların kullanımına izin vererek istenilen tipteki sayısal ağın basit ve hızlı bir şekilde oluşturulmasına imkan verir. Bununla beraber, boyut fonksiyonu ve sınır tabaka aracı gibi araçları yardımıyla model içinde ve kritik noktalarda eleman yoğunluğunun ve kalitesinin kontrol altında tutulmasına olanak sağlar [28].

Bu projede farklı geometriler için yapılan tüm HAD çalışmalarında çözüm ağlarının oluşturulması için Gambit sürüm 2.4.6 sayısal ağ oluşturma programı kullanılmıştır.

6.3 Sınır Tabakaların Oluşturulması

Bu proje çalışmasında tüm modellerin sınır tabakaları TGRID 5.0.6 otomatik çözüm ağı oluşturma programı kullanılarak oluşturulmuştur. Gambit programında yüzey çözüm ağı oluşturulan modeller TGrid programına aktarılmış ve TGrid programında sınır tabakaları tanımlanmıştır. Bir su altı aracının içinde bulunduğu ortam ve seyir koşullarına göre sınır tabakaları oluşturulurken, aracın sahip olduğu Reynolds sayısı değeri ve o araç için tanımlanacak Y+ değeri çok önemlidir. Sahip olunan Reynolds sayısı değeri ve tanımlanan Y+ değerine göre aracın sahip olacağı sınır tabakanın ilk kalınlığı hesaplanır [29,50,51].

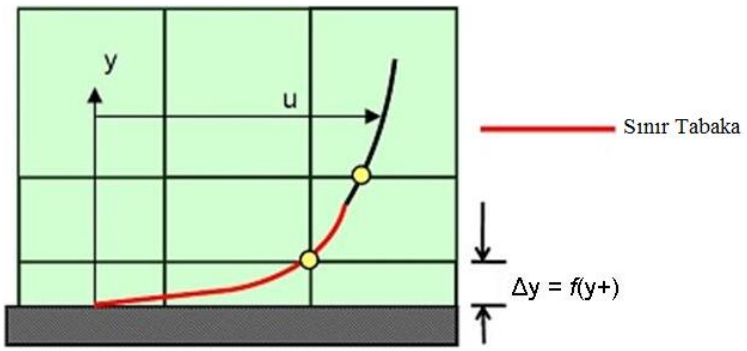
$$Reynolds\ Sayısı\ (Re_L) = \frac{V.L}{\nu} \qquad \textbf{(6.1)}$$

$$\Delta y = L.Y^{+}.\sqrt{74}.Re_L^{-13/14}.1000 \qquad \textbf{(6.2)}$$

ν: Kinematik viskozite V: Aracın seyir hızı

Δy: Sınır tabaka ilk kalınlığı (mm) L: Aracın boyu

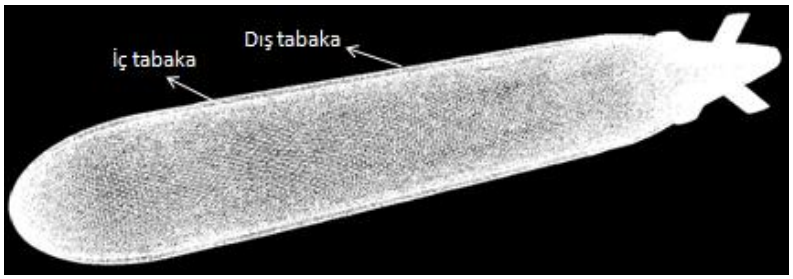
Y+ değeri, aracın yüzeyi ile sınır tabaka ağının ilk elemanı arasındaki boyutsuz uzaklıktır. Y+ değerinin fiziksel olarak ifadesi Şekil 6.5'de gösterilmiştir.



Şekil 6.5 : Sınır tabakanın fiziksel gösterimi [50].

Yukarıdaki şekilden de görülebileceği gibi, doğru sınır tabakanın tanımlanması için Y+ aralığının doğru seçilmiş olması oldukça önemlidir. Y+ değeri modelin Reynolds sayısı hesaplanarak, aracın sahip olduğu akış rejimine göre seçilir. Bu değer gerekenden daha büyük seçildiğinde içinde bulunulan akışın türbülans koşulları yanlış tanımlanabilir ve aracın üzerinde oluşacak hız ve basınç dağılımı doğru sonuçlanmayabilir.

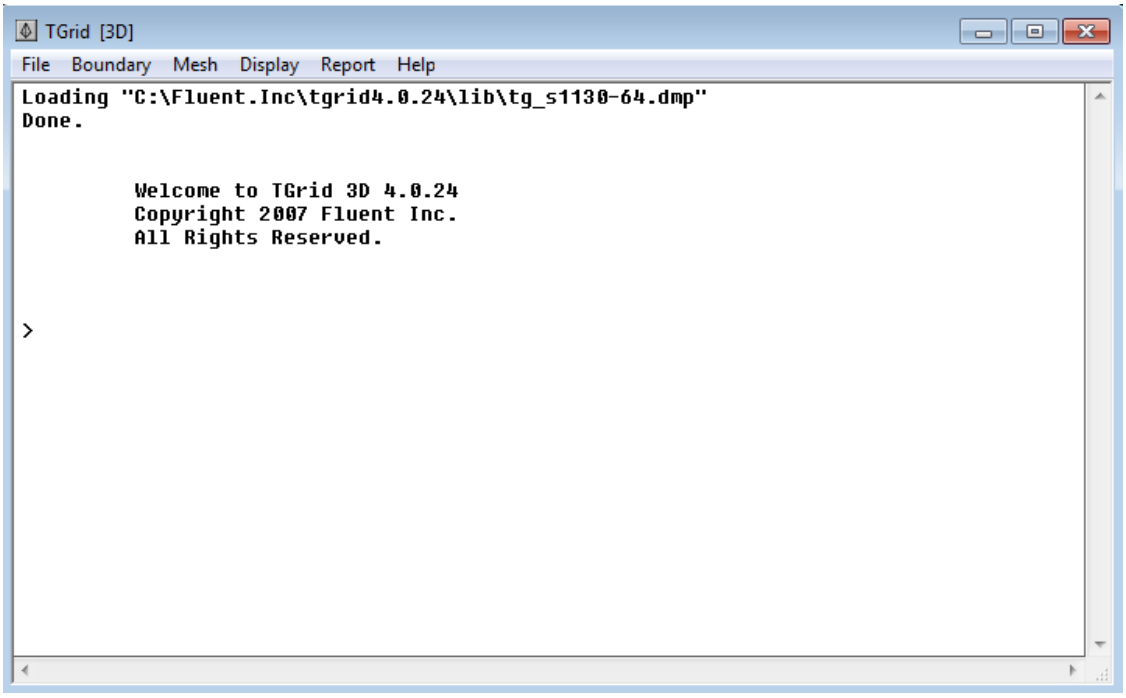
Yapılan modellemelerde sınır tabaka ağları, içinde bulunan akışın rejimi dikkate alınarak iki ana katman halinde oluşturulmuştur. Bu durum, modelin üzerinde tanımlanan sınır tabaka ağı ile akış hacmi arasındaki uyumu iyileştirmek amacıyla yapılmıştır ve sonuç olarak Navier-Stokes (Sürtünmeli akış) çözümü için seçilen türbülans modeline uygun Y+ değerini sağlayan sınır tabaka ağları oluşturulmuştur.



Şekil 6.6 : Autosub aracı için tanımlanan sınır tabaka ağ yapısı

6.3.1 TGrid Otomatik çözüm ağı oluşturma programı

Tgrid 5.0.6 programı da Gambit 2.4.6 programı gibi, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ve Sonlu Eleman (SE) analizleri için kullanılabilecek bir çözüm ağı oluşturma programıdır. Bu program da Ansys Inc. Firması tarafından geliştirilmiştir.



Şekil 6.7 : TGrid 5.0.6 çözüm ağı oluşturma programı kullanıcı ara yüzü

Tamamen otomatik sayısal ağ üretme kabiliyetine sahip TGrid programı kullanıcısına en az çabayı sarf ettirerek kaliteli dört yüzlü veya karışık tipteki (altı yüzlü, kama tipi, piramit tipi) elemanlardan oluşan sayısal ağlar oluşturma imkânını verir.

TGrid programı yapısı gereği yüzeysel sayısal ağlardan hacimsel sayısal ağlara geçiş yapabilen bir program olduğundan, geometri transferi sırasında oluşan uyuşmazlıkları ve geometri temizleme gereksinimini tamamen ortadan kaldırır. Bunun yanında kullanıcıya, basit bir kaç işlem yaparak bütün bir hacimsel sayısal ağı sahip oluşturma imkânı sağlar [28,51].

TGrid programı ile sınır tabakaları tanımlanmış modeller, istenilen yoğunlukta bir hacim çözüm ağı yapısı oluşturmak için tekrardan Gambit programına aktarılır. Bu son proseste aracın hacim çözüm ağı optimum elman sayısı korunacak şekilde oluşturulur. Böylelikle sınır tabakaları oluşmuş modellerin etrafında ideal akış hacimleri oluşturulur ve modellerin sayısal ağ oluşturma işlemleri tamamlanır.

6.4 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Hesaplama Modelinin Kurulması

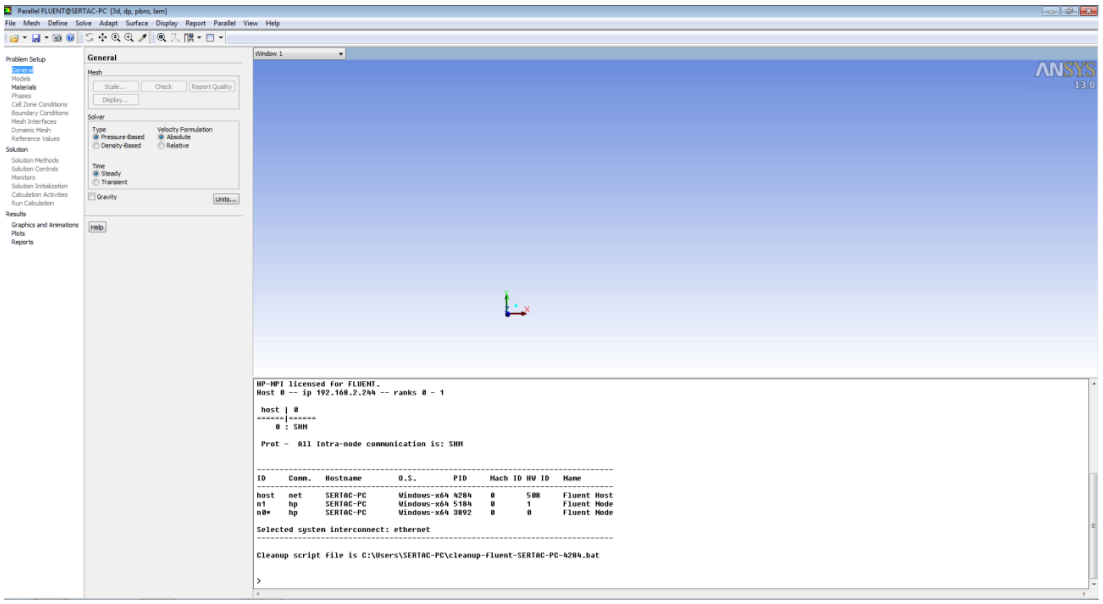
Yapılan HAD modelleme çalışmalarında çözüm ağı oluşturma işlemi tamamlanmış modeller Fluent 13.0 HAD hesaplama programına aktarılır. Bu tez çalışmasında tüm HAD analizleri Fluent programı 12.0 ve 13.0 versiyonları kullanılarak yapılmıştır.

HAD hesaplama modelinin kurulması için öncelikle Fluent'e aktarılan modelin çözüm ağ yapısı kontrol edilir. Bu aşamada herhangi bir hataya rastlanmadığı takdirde çözüm modeli oluşturulmaya başlanır, aksi halde çözüm ağ yapısındaki hatanın önceki aşamalara geri dönülerek giderilmesi gerekmektedir.

Çözüm modelinde kullanılacak ölçü birimleri ile çözüm ağı oluşturulurken kullanılan birimlerin aynı olması gerekmektedir. Bu temel kontroller yapıldıktan sonra hesaplama modeli oluşturulmaya başlanır. Bu kapsamda kullanılacak çözücü modeli, türbülans modeli, aracın içinde hareket edeceği ortamın özellikleri, hesaplamanın yapılacağı sınır koşulları ve çözücü metodu belirlenir. Yapılacak hesaplamanın iyi bir şekilde yakınsaması ve hatasız bir çözümün elde edilmesi için ayrıklaştırma faktörleri ve çözülecek Navier Stokes denklemlerinin içindeki basınç, yoğunluk, momentum ve türbülans katsayıları için hesaplamaya özgü en uygun değerler tanımlanır. Sonuç olarak, hesaplamanın yapılacağı optimum iterasyon sayısı seçilir ve analiz işlemi başlatılır. Analizler tamamlandıktan sonra elde edilen sonuçların yakınsayıp yakınsamadığını ve tanımlanan sınır tabaka kriterleri çerçevesinde istenilen türbülans rejiminin sağlanıp sağlanamadığı kontrol edilir. Bu kriterler tatminkâr seviyelerde ise analiz sonlandırılır ve hidrodinamik veri tabanındaki bir seyir koşulu için 3 eksendeki hidrodinamik kuvvet ve moment verisi oluşturulmuş olur.

6.4.1 ANSYS Fluent hesaplamalı akışkanlar dinamiği analiz programı

Fluent 13.0 programı sonlu hacimler yöntemini kullanan genel amaçlı bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımıdır. Fluent, genel amaçlı bir HAD yazılımı olarak, otomotiv endüstrisi, havacılık endüstrisi, denizcilik endüstrisi, beyaz eşya endüstrisi, turbomdakine (fanlar, kompresörler, pompalar, türbinler vb.) endüstrisi, kimya endüstrisi, yiyecek endüstrisi gibi birbirinden farklı birçok endüstriye ait akışkanlar dinamiği ve ısı transferi problemlerinin çözümünde kullanılabilir [28,51]. Fluent Programı Ansys Inc. Şirketi tarafından geliştirilmiştir. Yapılan proje çalışmasında bu yazılım, direnç ve itme analizlerinin yapılmasında, aracın hidrodinamik formunun, takıntılarının analizinde ve akışkan içerisindeki altı serbestlik dereceli hareketlerinin incelenmesi için kullanılmıştır.



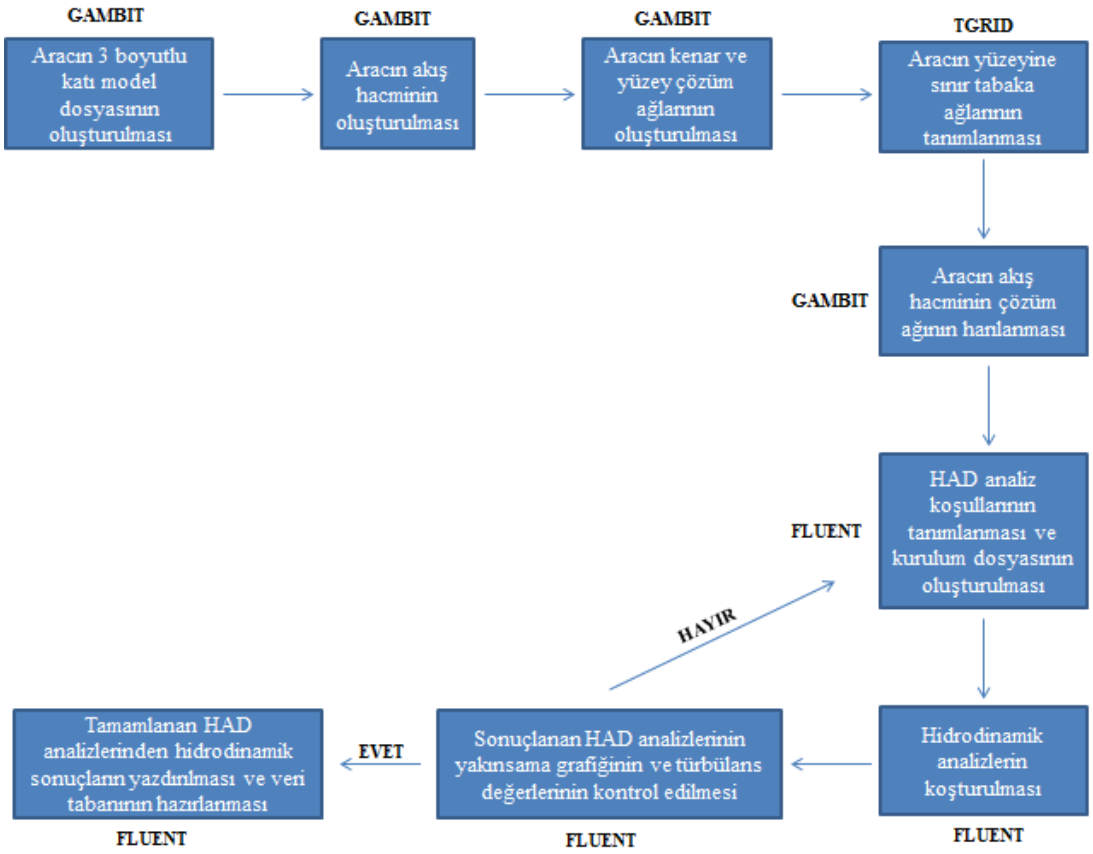
Şekil 6.8 : ANSYS Fluent 13.0 HAD analiz programı kullanıcı ara yüzü

Fluent, sahip olduğu ileri çözücü teknolojisi ve bünyesinde barındırdığı değişik fiziksel modeller sayesinde doğrusal, geçiş bölgesindeki ve türbülanslı akışlara, iletim, tasınım ve radyasyon ile ısı geçişini içeren problemlere, kimyasal tepkimeleri içeren problemlere, yakıt pilleri, akustik, akış kaynaklı gurultu, çok fazlı akışları içeren problemlere hızlı ve güvenilir çözümler üretebilmektedir.

Günümüzde test olanaklarının yüksek maliyetli, donanımlı eleman ve gereksinimleri sebebiyle, bir çok tasarımın performansı simülasyon ortamlarında incelenebilmektedir. Dolayısıyla bu programlar, bir ürünün performansının henüz tasarım aşamasındayken incelenmesini ve gerekli iyileştirmelerin/optimizasyonların simülasyon ortamında zamanında yapılmasını sağlayarak, detay tasarıma girdi oluşturacak sonuçlar üretirler ve kullanıcıya aracın gerçek dünyadaki davranışı hakkında bilgi verirler [51].

6.5 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analiz Sürecinin Akış Diyagramı

Bu tez çalışmasında uygulanan HAD analiz sürecindeki her bir süreç ile ilgili ve bu süreçte kullanılan programlar ile ilgili detaylı bilgiler önceki bölümlerde verilmiştir. Ancak, bu analiz sürecinin daha net anlaşılması amacıyla HAD analiz yönteminin metodolojisini gösteren bir akış diyagramı Şekil 6.9'da verilmiştir.



Şekil 6.9 : HAD analiz sürecinin akış diyagramı

Önümüzdeki bölümlerde Şekil 6.9'da gösterilen HAD analiz süreci kullanılarak su altı araçları için hidrodinamik modelleme yöntemleri geliştirilecek ve geliştirilen hesaplama modeli kullanılarak Autosub su altı aracının altı serbestlik dereceli hidrodinamik veri tabanı oluşturulacaktır.

7. SU ALTI ARAÇLARI İÇİN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ HESAPLAMA YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Bu çalışmada, denizaltı ve OSA gibi su altı araçlarının üzerinde oluşan hidrodinamik kuvvet ve momentleri hesaplanması için geliştirilen HAD analiz yöntemlerinin doğrulanması amaçlanmıştır. Temelde bu hidrodinamik etkilerin hesaplanması için 3 yol vardır bunlar su altı model testleri, sayısal yöntemler ve gerçek atışlı testlerdir. Bu yöntemler arasında en güvenilir sonuçlar gerçek atışlı testlerde elde edilmektedir. Çünkü bu atışlı testlerde araçlar gerçek ortam şartları ile karşılaşmaktadırlar. Su altı model testleri ile ilgili detaylı bilgi Bölüm.5'te detaylıca anlatılmıştır. Bu yöntemler haricinde kullanılan sayısal yöntemler ise HAD ve ampirik hesaplamalar tabanlıdır. Ampirik ve yarı ampirik yöntemler genellikle ön tasarım aşamalarında konsept oluşturmak amacı ile kullanılmaktadır. Ancak tasarım ilerledikçe, detay tasarım aşamalarında çoğunlukla HAD ve model test yöntemleri kullanılmaktadır. HAD uygulamalarının havacılık ve denizcilik uygulamalarında aktif bir şekilde kullanılabilmesi için yüksek hesaplama kabiliyetli bilgisayar altyapılarının bulunması çok önemlidir. Bu süreçlerde paralel hesaplama kabiliyetine sahip yüksek işlemcili bilgisayarlar analiz ve tasarım sürecini kısaltmakta, daha kompleks geometrilerin çözülmesine ve akış karakteristiklerinin modellenmesine imkan tanımaktadırlar. Bu kapsamda kullanılan HAD modelleme yöntemlerinin doğruluk seviyesi oldukça önemlidir. HAD yöntemlerinin doğruluk seviyelerinin bilinebilmesi için farklı denek taşları kullanılarak doğrulama çalışmaları yapılmaktadır. Denek taşı dokümanları, bir araca ait doğrulanabilecek hidrodinamik verileri, geometri bilgilerini ve seyir koşullarını barındırdığından, denek taşı dokümanları genellikle yeni HAD hesaplama yöntemlerinin geliştirilmesinde kullanılmaktadır. Denek taşları sayesinde gerçek su altı ortamında hareket eden ölçekli veya ölçeksiz bir su altı aracının hidrodinamik performansı ile simülasyon ortamında hareket eden bir aracın performansı karşılaştırılabilmektedir. Bu sayede kurulan simülasyon modelleri, gerçek veriler ile karşılaştırılarak iyileştirilmekte ve en gerçekçi simülasyon modeli kurulmaktadır. Bu çalışmada kutlanılan HAD hesaplama modelinin kabiliyetlerini ve gerçekliliğini öğrenebilmek amacıyla Darpa denizaltı modeline ve Autosub OSA modeline ait

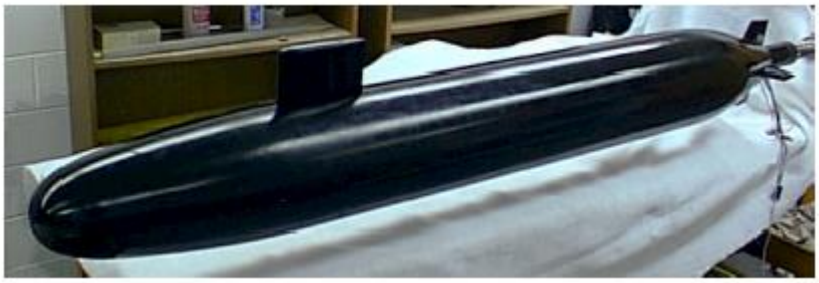
denek taşı çalışmaları kullanılmıştır. Bu sayede, "*Reynolds Averaged Navier Stokes*" denklemleri kullanılarak geliştirilmiş HAD hesaplama yöntemlerinden elde edilmiş sonuçlar, denek taşı dokümanlarında bulunan deneysel veriler ile karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır. Bu çalışma kapsamında statik hidrodinamik modelleme yöntemlerinin doğrulanması ve dinamik hidrodinamik modelleme yöntemlerinin doğrulanması amacıyla iki farklı kategoride doğrulama çalışmaları yapılmıştır.

7.1 Statik HAD Analiz Modeli Doğrulama Çalışması

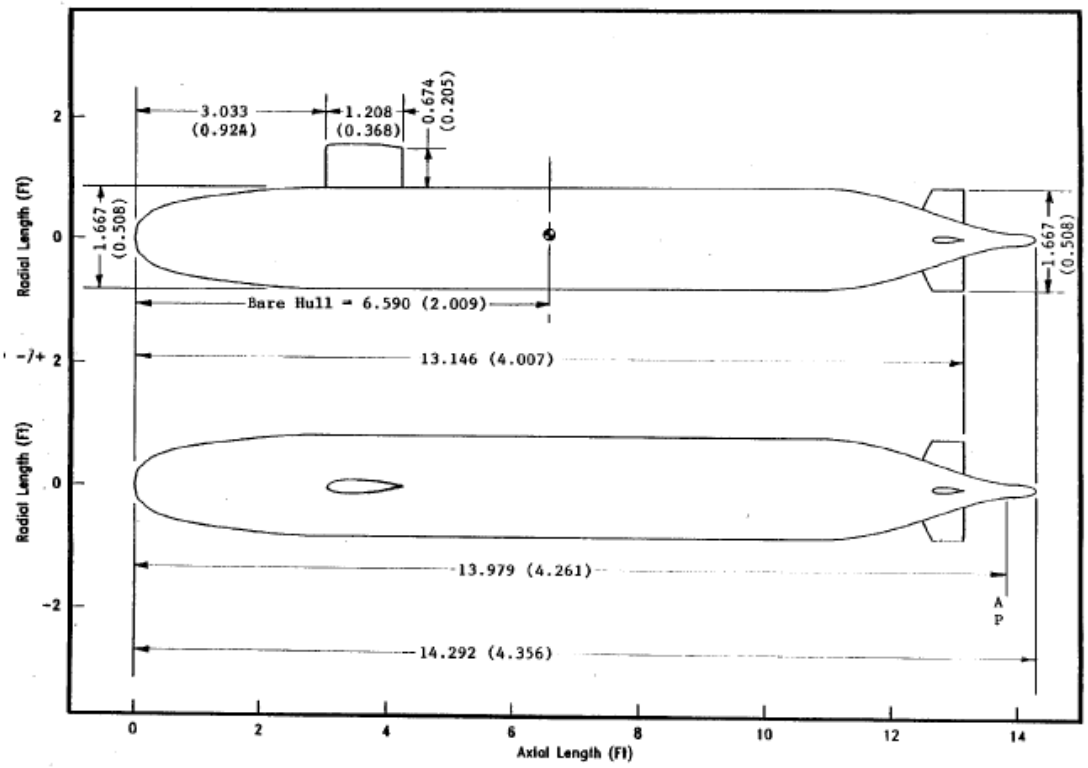
Statik hidrodinamik katsayıların hesaplanmasında kullanılacak HAD hesaplama yöntemlerinin doğrulanması için Darpa deniz altı modeli ve Autosub OSA modeline ait denek taşları kullanılmıştır. Yapılacak bu doğrulama çalışmaları ile üç eksende oluşan statik hidrodinamik kuvvetlerin ve bu kuvvetlerin neden olduğu hidrodinamik momentlerin HAD yöntemleri ile güvenilir bir şekilde hesaplanması amaçlanmaktadır.

7.1.1 DARPA denizaltı modeli statik denek taşı çalışması

Su altı araçlarının tasarım aşamalarında hidrodinamik formlarının üzerinde oluşan akış bilgileri, tasarım girdisi olarak oldukça önem taşımaktadır. Bu kompleks akış karakteristiklerinin deneysel olarak belirlenmesi ve yapılacak akademik çalışmalara yardımcı olunması amacıyla Darpa denizaltı modeli, Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan David Taylor Araştırma Merkezi tarafından geliştirilmiştir. Geliştirilen bu model özellikle HAD hesaplama yöntemlerinin doğrulanmasında ve geliştirilmesine kullanılmaktadır. Darpa modeli eksenel simetrik bir gövde, bir yelken ile dört adet simetrik kanat ve kontrol yüzeyinden oluşmaktadır. Darpa modelinin toplam boyu 4.356 m, maksimum çapı ise 0.508 m'dir [30,34]. Darpa modelinin geometrisi ile ilgili detaylar Şekil 7.1 ve 7.2'de gösterilmiştir.



Şekil 7.1 : DARPA denizaltı modeli [30].



Şekil 7.2 : DARPA denizaltı modeli teknik resmi [32].

7.1.1.1 DARPA Modelinin denek yaşı konfigürasyonlarının geliştirilmesi

David Taylor Araştırma Merkezi tarafından Darpa denizaltı modelinin üç farklı konfigürasyonu için su altı model testleri gerçekleştirildiğinden, bu projede Darpa denizaltı modeline ait üç farklı konfigürasyon üzerinde çalışılmıştır. Bunlar eksenel simetrik gövdenin yalnız başına bulunduğu yalın gövde konfigürasyonu, gövdenin yelken ile beraber bulunduğu gövde artı yelken konfigürasyonu ve gövdenin yelken artı kanatçıklar ile beraber bulunduğu ful konfigürasyondur.

7.1.1.1.1 Yalın gövde konfigürasyonu

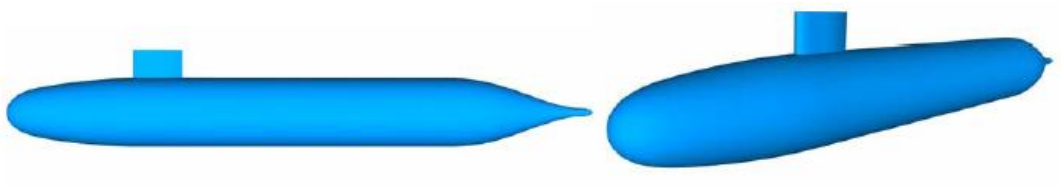
Yalın gövde konfigürasyonu, Darpa modelinin takıntılarının çıkarıldığı zaman karşılaştığımız eksenel simetrik bir gövdeden oluşmaktadır. Bu gövde, elipsoidal yapıda bir burun geometrisinden, silindirik yapıda bir orta gövdeden ve konik yapıda bir arka gövdeden oluşmaktadır. Yalın gövde konfigürasyonunun katı model resmi Şekil 7.3'te gösterilmiştir.



Şekil 7.3 : DARPA modelinin yalın gövde konfigürasyonu

7.1.1.1.2 Gövde artı yelken konfigürasyonu

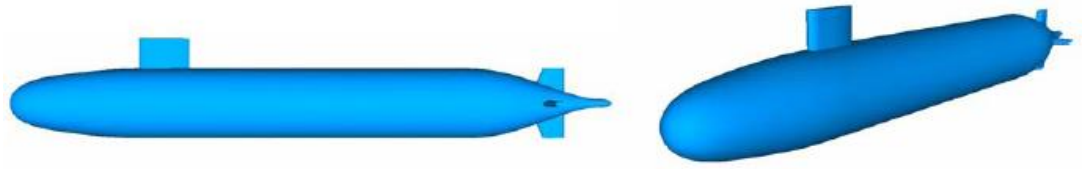
Bu konfigürasyonda bir önceki bölümde anlatılan yalın gövde konfigürasyonuna ilaveten, Darpa denizaltı modelinin yelken geometrisi eklenmiştir. Gövde artı yelken konfigürasyonuna ait katı model resmi aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 7.4 : DARPA modelinin gövde artı yelken konfigürasyonu

7.1.1.1.3 Gövde artı yelken artı kanatçık konfigürasyonu

Gövde artı yelken artı kanatçık konfigürasyonu Darpa denizaltı modelinin sahip olduğu ful konfigürasyondur. Bu konfigürasyonda bir önceki bölümde anlatılan konfigürasyona ek olarak dört adet kanatçık ve kontrol yüzeyi eklenmiştir. Gövde artı yelken artı kanatçık konfigürasyonuna ait katı model resmi Şekil 7.4'te gösterilmiştir.



Şekil 7.5 : DARPA modelinin gövde artı yelken artı kanatçık konfigürasyonu

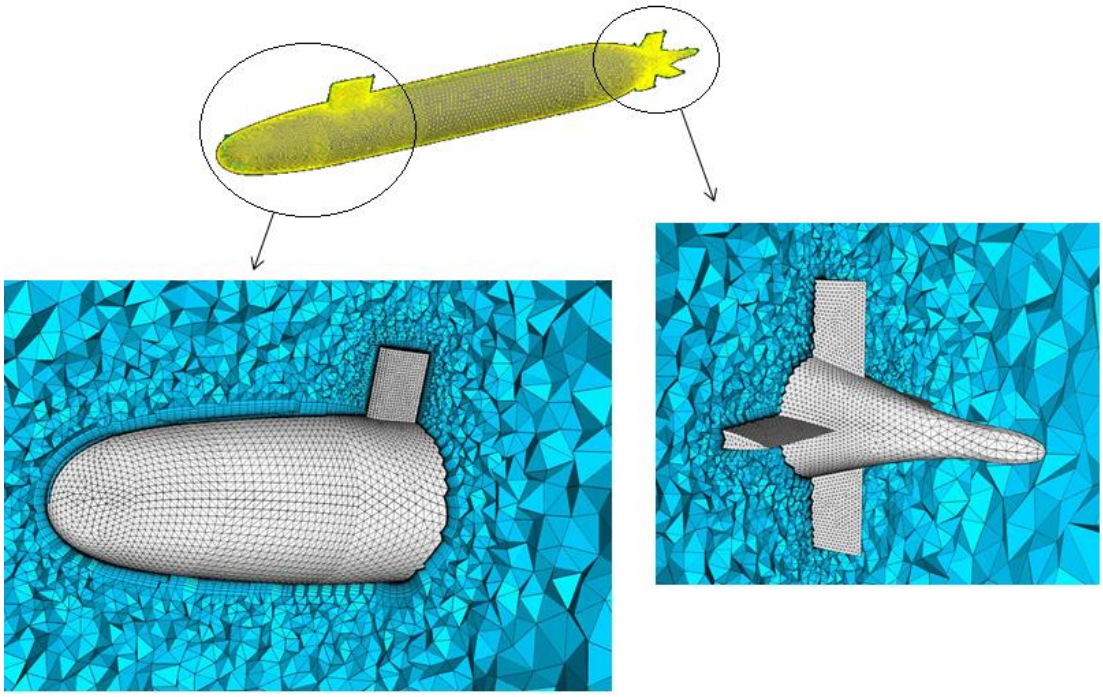
7.1.1.2 Test ve analiz koşulları

Bu çalışmada kullanılan Darpa denizaltı modeline ait deneysel veriler, David Taylor Araştırma Merkezi tarafından David Taylor Model Havuzlarında elde edilmiştir [34]. David Taylor Araştırma Merkezi tarafından Darpa modelinin yalın gövde, gövde artı yelken, gövde artı yelken artı kanatçık ve ful konfigürasyonun halka kanatçık ile oluşturulduğu konfigürasyonların testleri yapılmıştır. Darpa modelinin testleri sıfır hücum ve kontrol yüzeyi sapma açılarında ve 9 m/s doğrusal hızda gerçekleştirilmiştir [34]. Bu seyir koşullarında aracın Reynolds sayısı yaklaşık 29 milyon civarındadır. Testler tatlı su ortamında gerçekleştirilmiş ve testlerde kullanılan suyun kinematik viskozitesi 1,307e-06 olarak alınmıştır [34]. Testler esnasında modelin sonsuz derinlikte hareket ettiği dolayısıyla herhangi bir serbest yüzey etkisine ve blokaj etkisine maruz kalmadığı kabul edilmiştir.

Gerçekleştirilen su altı testlerinde Darpa modelinin farklı konfigürasyonları üzerinde oluşan basınç ve sürtünme kuvveti katsayıları incelenmiştir [34].

7.1.1.3 Çözüm ağının oluşturulması

Bu projede yapılan HAD analiz yöntemleri doğrulama çalışmalarında Darpa modelinin tüm konfigürasyonları için çözüm ağı oluşturulmuş ve HAD analizi yapılmıştır. Darpa modelinin çözüm ağı oluşturma çalışmaları üç boyutlu modeller üzerinden yapılmıştır. Çözüm ağı oluşturma işlemi için GAMBIT 2.4 yazılımı kullanılmıştır. Çözüm ağı oluşturma işlemi, çözüm ağı oluşturma hiyerarşisine bağlı kalınarak sırasıyla kenar, yüzey ve hacim çözüm ağları şeklinde oluşturulmuştur. Çözüm ağları Navier Stokes denklemlerinde kullanılabilecek şekilde yüksek kalitede oluşturulmuştur. Çözüm ağının oluşturulması işlemi ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 6.2'de verilmiştir. Aşağıda yüzey çözüm ağı oluşturulmuş Darpa modelinin ful konfigürasyonu görülmektedir.

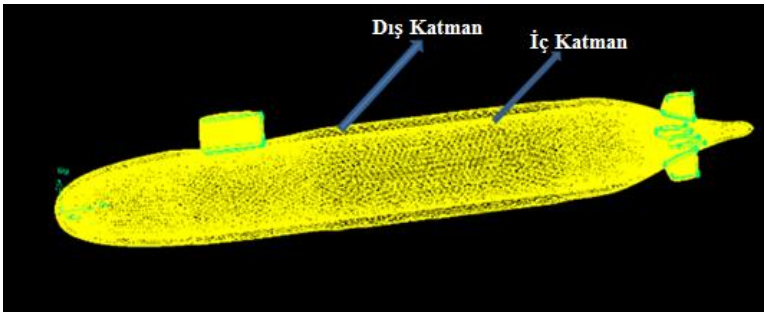


Şekil 7.6 : Yüzey çözüm ağı oluşturulmuş DARPA modeli ful konfigürasyonu.

Yüzey çözüm ağı oluşturulmuş modeller için, aracın içinde bulunduğu akış şartları dikkate alınarak, oluşması tahmin edilen sınır tabakaları tanımlanır.

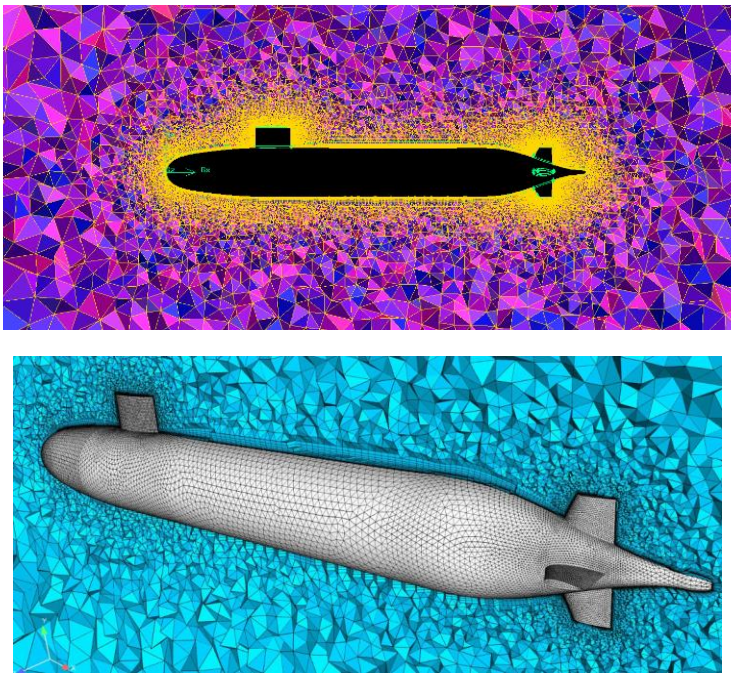
Sınır tabakaların tanımlanması ve oluşturulması için TGRID 5.0 yazılımı kullanılmıştır. Darpa modelinin sınır tabakaları tanımlanırken Y+ değeri 1 olarak seçilmiş ve aracın Re sayısı 28.6 milyon olarak hesaplanmıştır. Bu değerler kullanılarak tanımlanacak sınır tabakanın ilk kalınlığının 0,00446 mm olduğu

belirlenmiştir. Sınır tabakaların gövde yüzeylerinde hassas tanımlanması ve tanımlanan sınır tabakalardan akış hacimlerine geçişlerin yüksek kalitede olması için sınır tabakalar onar tabakalık iki ana katman halinde oluşturulmuştur. Sınır tabakaların oluşturulması ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 6.3'te verilmiştir. Sınır tabakaları oluşturulmuş Darpa modelinin ful konfigürasyonu Şekil 7.7'de gösterilmiştir.



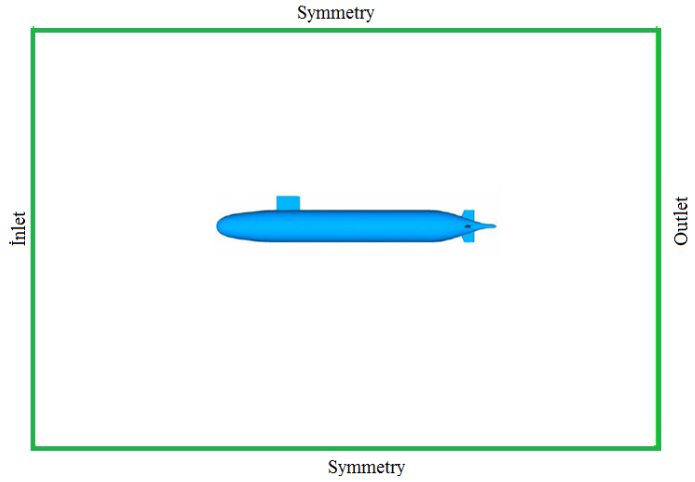
Şekil 7.7 : DARPA modeli ful konfigürasyonu için oluşturulmuş sınır tabaka ağları

Sınır tabakaları oluşturulan modelin GAMBIT programında akış hacimleri oluşturulur. Akış hacmi için oluşturulan çözüm ağı, aracın yüzeyinden yoğun bir şekilde başlayıp giderek büyüyen bir yapıya sahiptir. Bu sayede akış hacmi için oluşturulacak çözüm ağı sayısı optimum seviyede tutulur. Darpa modeline ait akış hacmi çözüm ağı yapıları Şekil 7.8'de gösterilmiştir.



Şekil 7.8 : DARPA modeline ait akış hacmi için oluşturulan çözüm ağı yapısı

Akış hacmi oluşturulan Darpa modellerinin çözüm ağı oluşturma işlemi tamamlanmıştır. Çözüm ağları oluşturulan modeller, HAD analizlerinde gerekli koşulların tanımlanması için hazır hale gelmiş olurlar. Bu denek taşı çalışmasında hücum açısız ve manevrasız bir seyir koşulu benzetimi yapıldığından, akış hacmi için tanımlanan sınır koşulları aşağıda verilmiştir.



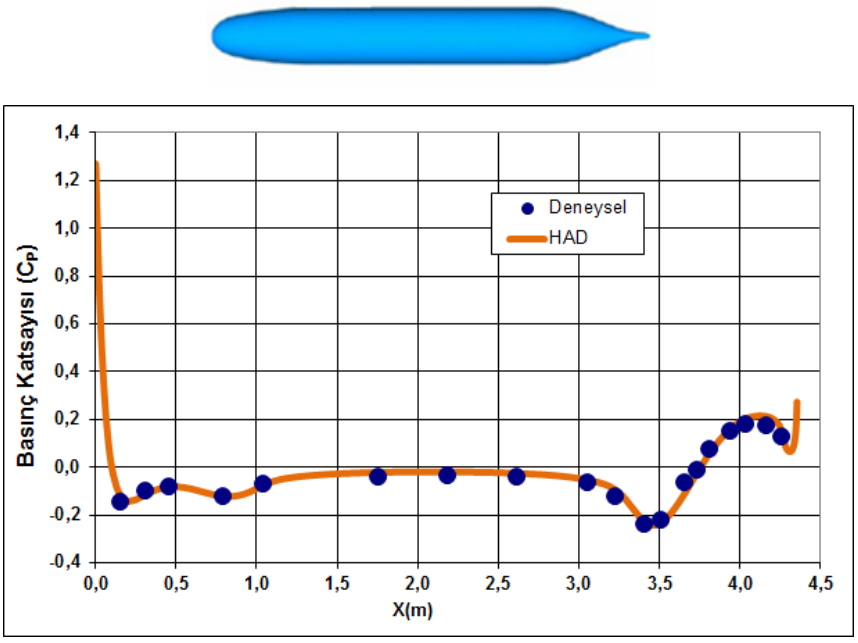
Şekil 7.9 : Hücum açısının ve manevra hareketinin olmadığı bir seyir koşulu için tanımlana sınır koşulları.

Bu seyir benzetimi için tanımlanan yukarıdaki seyir koşulları, aracın sahip olduğu ortam ve seyir koşullarına göre HAD analiz programında özelleştirilecektir.

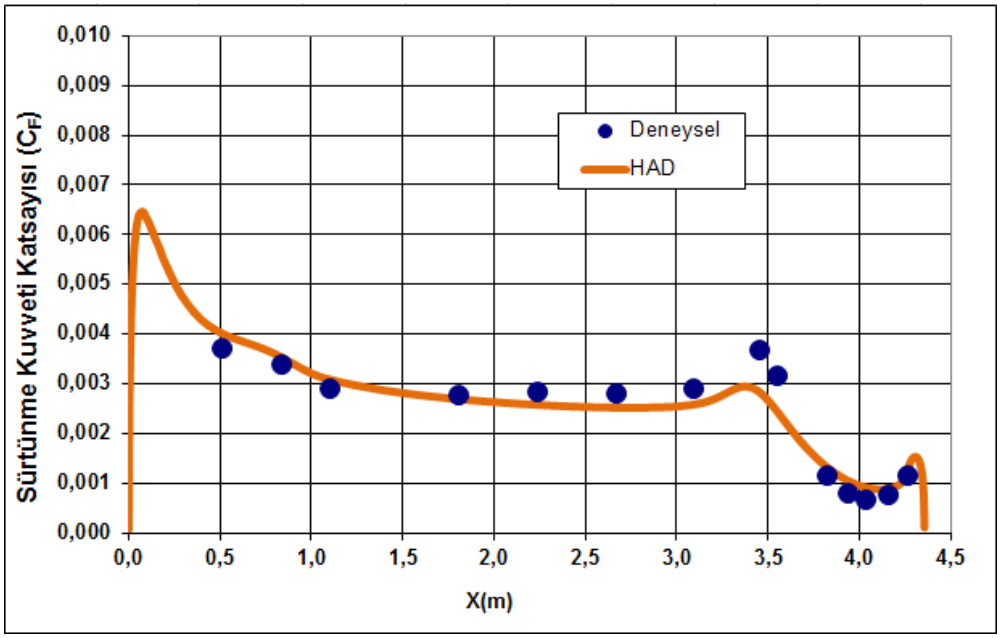
7.1.1.4 Statik hidrodinamik verilerin doğrulanması

Bu aşamada, çözüm ağı oluşturulan modeller HAD analiz programlarına aktarılarak, yapılacak HAD analizleri için gerekli koşullar oluşturulur. Bu projede yapılan HAD çalışmalarında Ansys Fluent13.0 yazılımı kullanılmıştır. Darpa modelinin HAD analizleri 9 m/s seyir hızında gerçekleştirilmiştir. İçinde hareket edilen akışkanın özellikleri, akış koşullarında oluşan türbülans rejimine göre türbülans modelleri ve hareketi tanımlayan sınır koşulları Fluent programında tanımlanır. Bu sınır koşullarında Navier Stokes denklemlerini çözebilecek uygun çözüm modelleri seçilir ve HAD analiz modeli kurulmuş olur. Kurulan HAD analiz modeli ile Darpa deniz altı modelinin HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen HAD sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırılarak en doğru sonucu verecek HAD analiz modeli oluşturulmaya çalışılır. Bu süreçte yapılan analiz çalışmalarında doğru çözümün en kısa sürede elde edilmesi amacıyla optimum iterasyon sayısı belirlenir. Belirlenen iterasyon sayısında tanımlanan analizler koştuktan sonra elde edilen sonuçların

yakınsayıp yakınsamadığı ve analiz öncesinde tanımlanan türbülans koşullarının istenilen akış rejimini sağlayıp sağlamadığı kontrol edilir. Yapılan bu kontroller sonucunda elde edilen değerler tatminkâr seviyelerde ise bir seyir koşulu için analizin tamamlandığı ve elde edilen sonuçların deney sonuçları ile karşılaştırılabilecek seviyede olduğu kabul edilir. Deney sonuçları ile yapılan karşılaştırmalar sonucunda istenilen doğruluk seviyesi yakalandığı durumda analiz tamamlanır, yakalanmadığı durumda ise HAD analiz modelinde tanımlanan, çözüm modeli, sınır koşulları, türbülans modeli vb. gibi değerler üzerinde optimizasyon çalışması yapılarak analiz tekrarlanır. HAD analiz sürecinin akış şeması ve daha detaylı anlatımı Bölüm 6.4'te verilmiştir. Darpa denizaltı modeli için yapılan HAD analiz modeli doğrulama çalışmasında *Segregated* çözüm modeli kullanılarak *Navier Stokes* denklemleri *Implicit* ve zamandan bağımsız koşullarda çözülmüştür. Akış rejiminin doğru bir biçimde tanımlanması için *K-ε* türbülans modeli, *Realizable* ve *Enhanced Wall Treatment* koşullarında kullanılmıştır. Tanımlanan bu koşullar kullanılarak istenilen doğruluk seviyelerinde analiz sonuçları elde edilmiştir. Darpa modelinin farklı konfigürasyonlar için yapılan HAD analizlerinin deneysel veriler ile karşılaştırmalı grafikleri aşağıda verilmiştir. Analizler sonucunda farklı konfigürasyonlar üzerindeki basınç ve sürtünme kuvveti katsayıları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. İlk olarak Darpa modelinin yalın gövde konfigürasyonu için karşılaştırmalı sonuçlar verilmiştir.

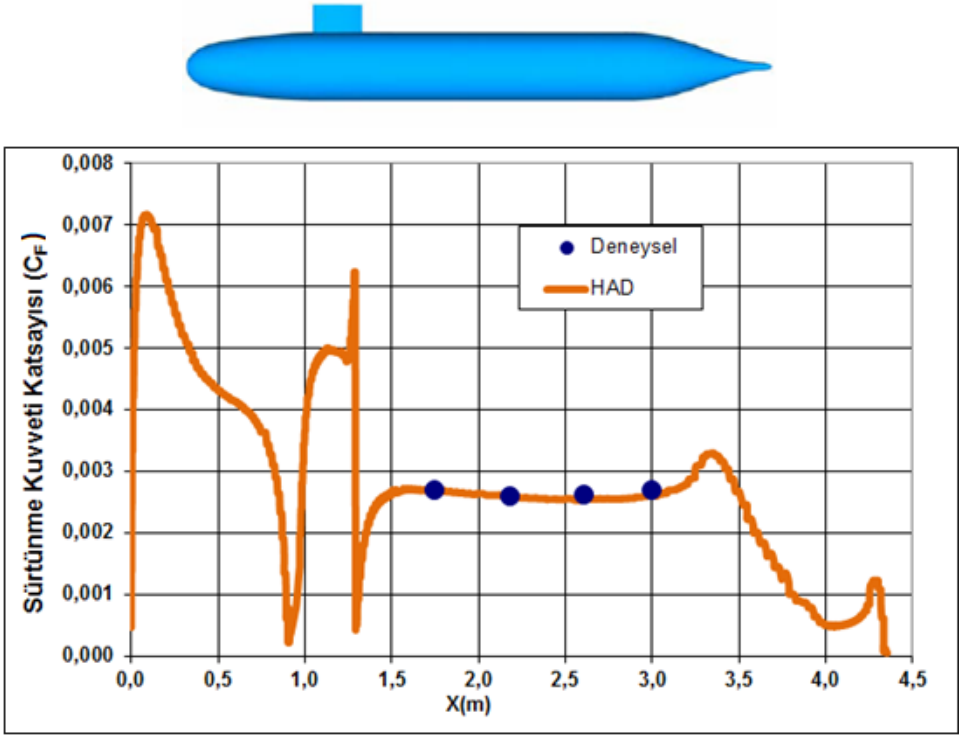


Şekil 7.10 : DAPRA yalın gövde konfigürasyonunun basınç katsayısı karşılaştırmalı grafikleri [34].

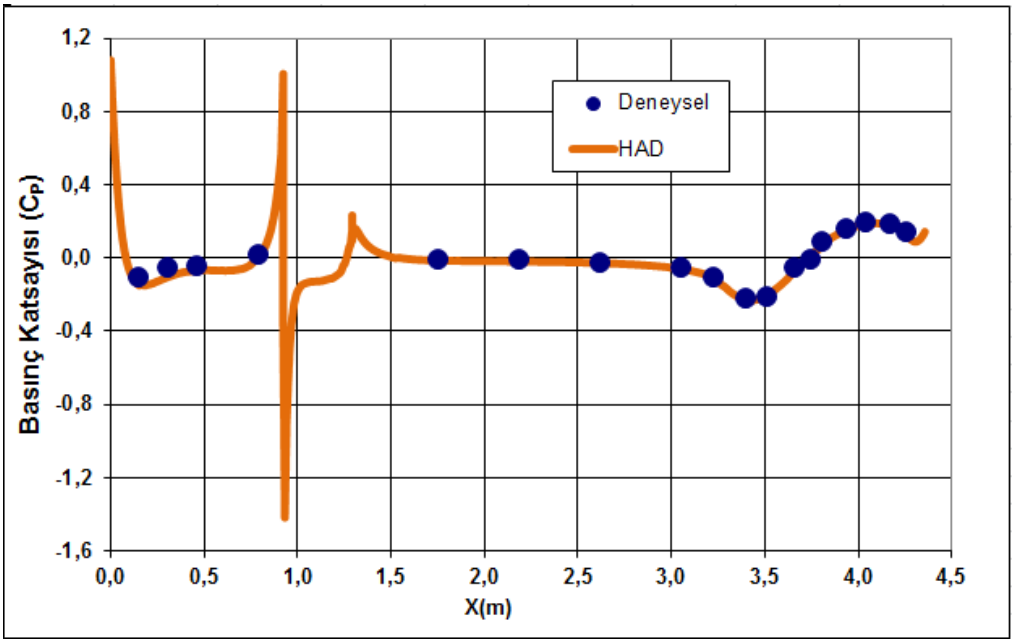


Şekil 7.11 : DAPRA yalın gövde konfigürasyonunun sürtünme kuvveti katsayısı karşılaştırmalı grafikleri [34].

İkinci olarak gövde artı yelken konfigürasyonunun üzerinde oluşan basınç ve sürtünme kuvveti katsayılarının dağılımı verilmiştir.

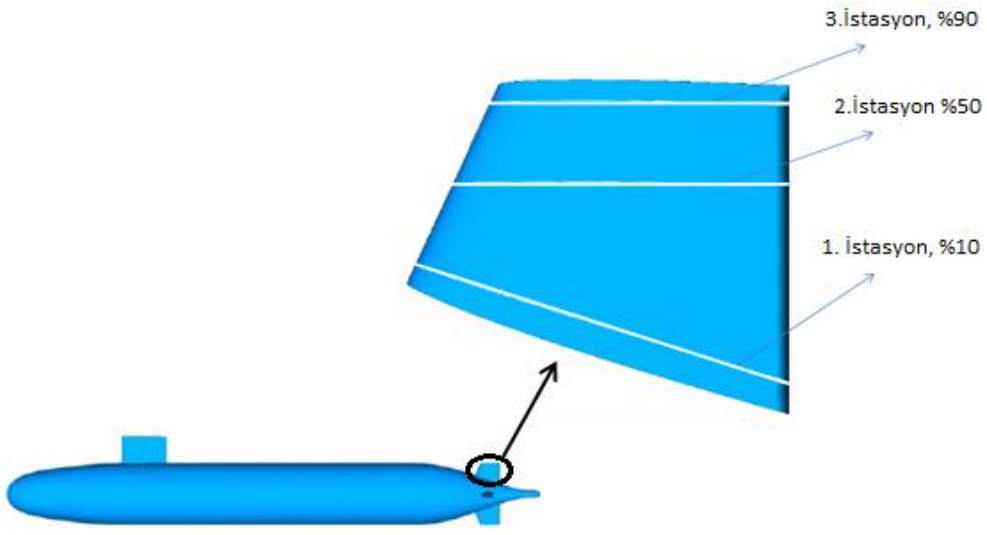


Şekil 7.12 : DAPRA gövde artı yelken konfigürasyonunun sürtünme kuvveti katsayısı karşılaştırmalı grafikleri [34].



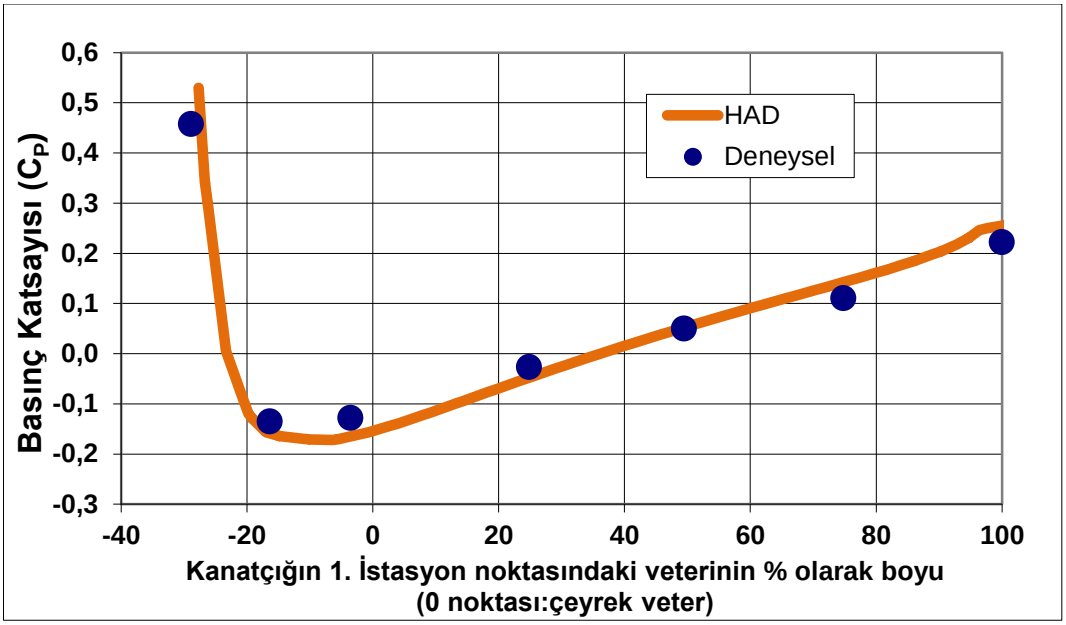
Şekil 7.13 : DAPRA gövde artı yelken konfigürasyonunun basınç katsayısı karşılaştırmalı grafikleri [34].

Son olarak ise gövde artı yelken artı kanatçıklardan oluşan konfigürasyonun üzerinde oluşan basınç ve sürtünme kuvveti katsayılarının dağılımı verilmiştir. Ancak bu konfigürasyon için sadece kanatçıklar üzerinde üç farklı istasyondan elde edilmiş basınç dağılımı için deneysel veri mevcuttur. Bu sebeple yapılan HAD analizi sonucunda elde edilen sonuçlar kanatçıklar üzerinden alınmış üç farklı istasyonda incelenmiştir. Kanatçıkların gövde ile temas ettiği noktadan itibaren, kanatçığın %10, %50 ve %90 uzunluğundaki uzaklıklarda üç farklı istasyon oluşturulmuş ve HAD analiz verisi bu istasyonlarda incelenerek deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

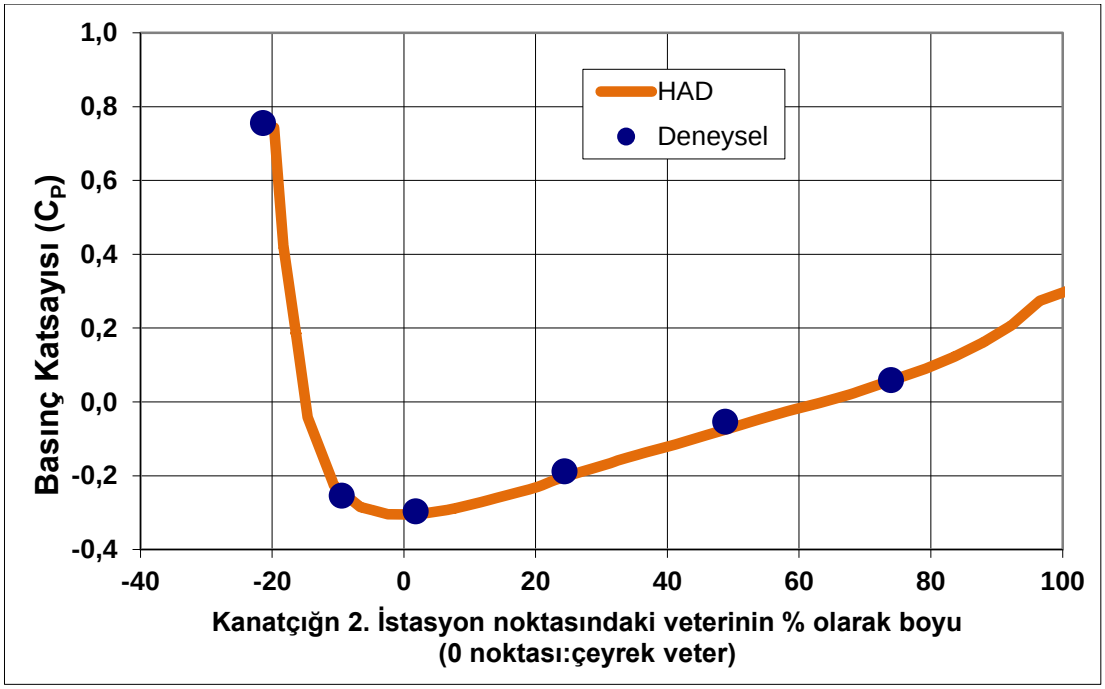


Şekil 7.14 : DARPA modelinin kanatçıklarında belirlenmiş istasyon yerleri.

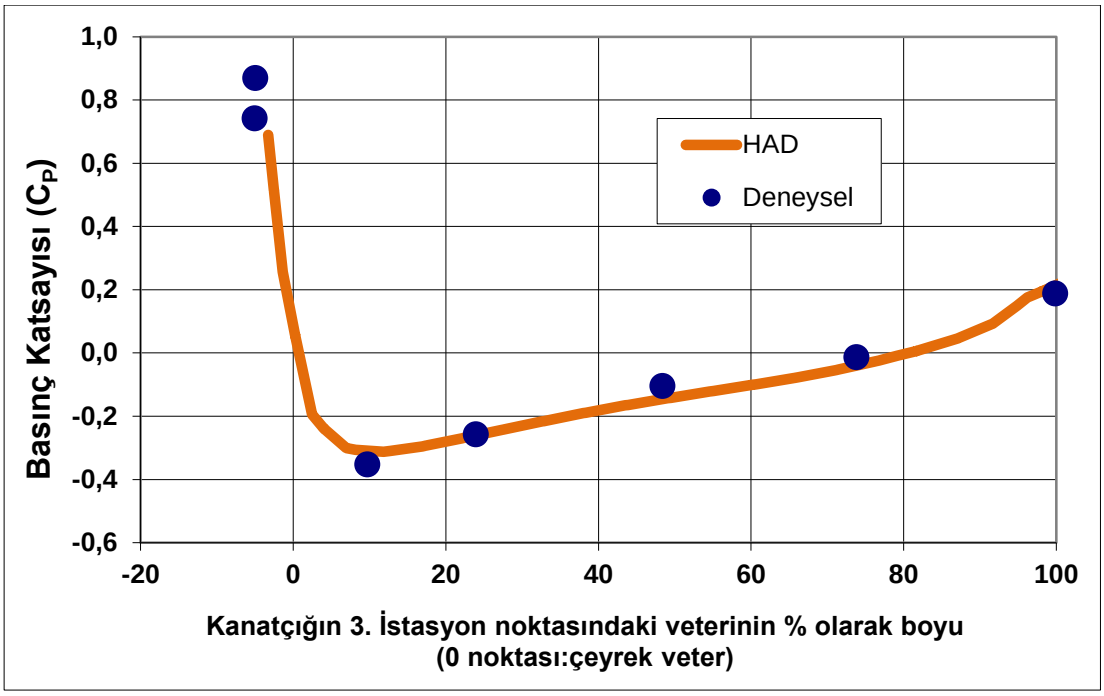
Aşağıdaki grafiklerde Darpa denizaltısının kanatçığının farklı noktalarında oluşturulmuş istasyonlar üzerinde hesaplanmış karşılaştırmalı basınç katsayısı grafikleri gösterilmiştir. İncelemelerde kanatçığın veterinin %25'indeki mesafe veterin sıfır noktası olarak kabul edilmiş ve grafikler bu kabul ile çizilmiştir



Şekil 7.15 : Kanatçığın 1. istasyon noktasında basınç katsayısı dağılımı [34].

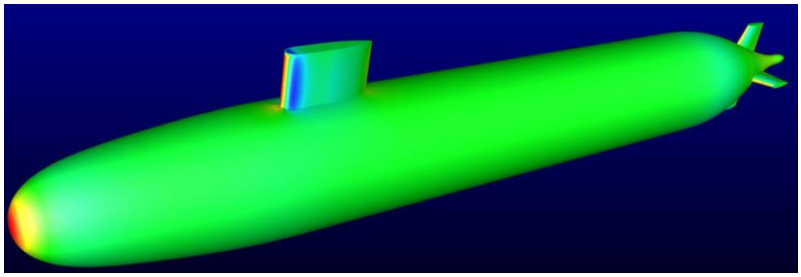


Şekil 7.16: Kanatçığın 2. istasyon noktasında basınç katsayısı dağılımı [34].



Şekil 7.17 : Kanatçığın 3. istasyon noktasında basınç katsayısı dağılımı [34]

Karşılaştırmalı basınç katsayısı ve sürtünme kuvveti katsayısı grafiklerinden görüldüğü üzere, oluşturulan HAD analiz modeli kullanılarak hesaplanan değerler ile, su altı model testi ortamlarında çekme testlerinde elde edilen değerler birbirleriyle büyük benzerlik göstermektedir. Su altı araçlarının üzerinde hesaplanan hidrodinamik kuvvetlerin, araçların gövdeleri üzerinde oluşan basınç dağılımlarının integrasyonu sonucunda hesaplandığı düşünülürse, bu denek taşı çalışması ileriki bölümlerde sıfır hücum açısında hesaplanacak hidrodinamik kuvvet ve moment değerleri için güvenilir bir HAD hesaplama modelinin oluşturulduğunu göstermektedir. Bu durum bize, sıfır hücum açısında oluşan hidrodinamik kuvvetlerin hesaplanması için oluşturulan HAD analiz yönteminin doğrulandığını göstermektedir. Şekil 7.16'da doğrulanan HAD analiz yöntemi kullanılarak Darpa modeli üzerinde oluşan hidrodinamik basınç kuvvetinin dağılımı verilmiştir.

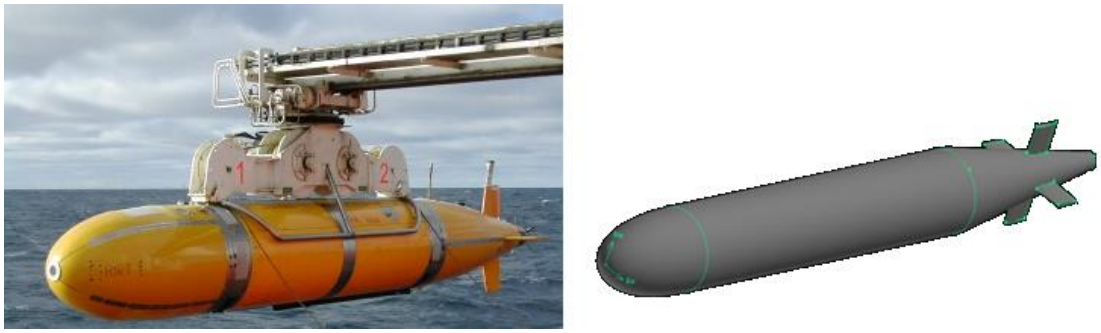


Şekil 7.18 : DARPA modeli üzerinde oluşan hidrodinamik basınç dağılımı görseli

7.1.2 Autosub Otonom su altı aracı statik denek taşı çalışması

Autosub, İngiltere Southampton'da bulunan Ulusal Oşinografi Merkezinde çalışan mühendisler ve oşinograflar tarafından geliştirilmiş büyük bir otonom su altı aracıdır. İlk olarak 1988 yılında projelendirilen Autosub'ın genel görevi görüntüleme yapmak, veri toplamak ve bunu merkez üssü ile paylaşmaktır. Autosub aracın otonom kontrollü bir araç olduğundan merkez üssü ile kablosuz bağlantı kurabilmekte ve kendi otonom kontrolünü sağlayabilmektedir. Autosub aracı özellikle Kuzey Kutbu ve Antarktika bölgelerinde buzulların içinde araştırma yapmak amacıyla kullanılmaktadır.

Uzunluğu 7 m ve maksimum çapı 0,9 m olarak tasarlanan Autosub, gövdenin arkasında bulunan "+" konfigürasyondaki 4 adet hareketli kontrol yüzeyi tarafından kontrol edilmektedir. Bunlardan yatay olanlar koordineli çalışarak yunuslama düzlemindeki hareketleri, dikey olanlar ise yine koordineli çalışarak sapma düzlemindeki hareketleri kontrol ederler. Autosub aracı ile ilgili detaylı bilgi Bölüm.2'de verildiğinden bu bölümde daha fazla bilgi verilmeyecektir.



Şekil 7.19 : Autosub otonom su altı aracı katı modeli [47].

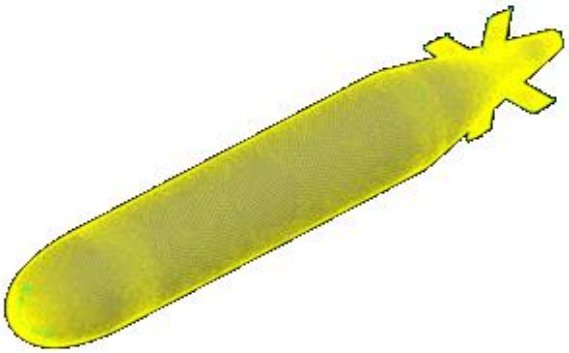
7.1.2.1 Test ve Analiz Koşulları

Autosub otonom su altı aracının statik çekme testleri, İngiltere Southampton'da bulunan Ulusal Oşinografi Merkezi ve Southampton Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Fakültesi tarafından İngiltere Hampshire'da bulunan QinetiQ firmasına ait deney havuzunda gerçekleştirilmiştir [15,16]. Deneylerde Autosub aracının ¾ ölçekli modeli kullanılmıştır. Deneyler 2.69 m/s doğrusal hızda, -10 dereceden + 10 dereceye kadar 2 derece aralıklar ile farklı hücum açıları verilerek gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda modele ait, sürükleme kuvveti, Z yönündeki düşey öteleme kuvveti ve yunuslama momenti verileri elde edilmiştir. Deneylerde çalışılan Reynolds sayısı aralığı yaklaşık 14 milyon civarındadır [15,16].

Yapılan Deneylerde suyun dinamik viskozitesi 0,001003 kg/m.s ve yoğunluğu 998 kg/m^3 olarak kabul edildiğinden yapılacak HAD analizlerinde de viskozite ve yoğunluk değerleri olarak aynı değerler kullanılacaktır [15,16].

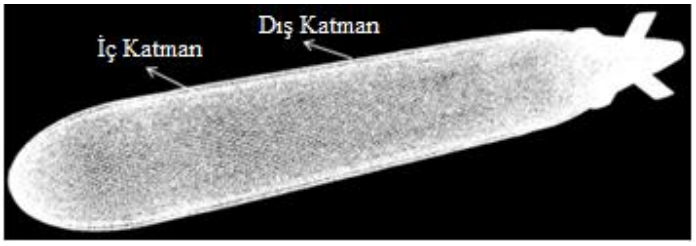
7.1.2.2 Çözüm ağının oluşturulması

Modelin HAD analizlerinin yapılabilmesi için öncelikle modelin içinde hareket edeceği akış hacminin oluşturulması ve akış hacmi ile beraber aracın çözüm ağlarının tanımlanması ve oluşturulması gerekmektedir. Çözüm ağı oluşturma işlemi için ANSYS GAMBIT ticari yazılımı kullanılmıştır. Kullanılacak modelin çözüm ağı oluşturulurken, çözüm ağı oluşturma hiyerarşisine bağlı kalınarak kenar, yüzey ve hacim çözüm ağları, Navier-Stokes denklemlerinde kullanılabilecek kalitede üretilmiştir. Yüzey çözüm ağı yapısı Şekil 7.18'de gösterilmiştir.



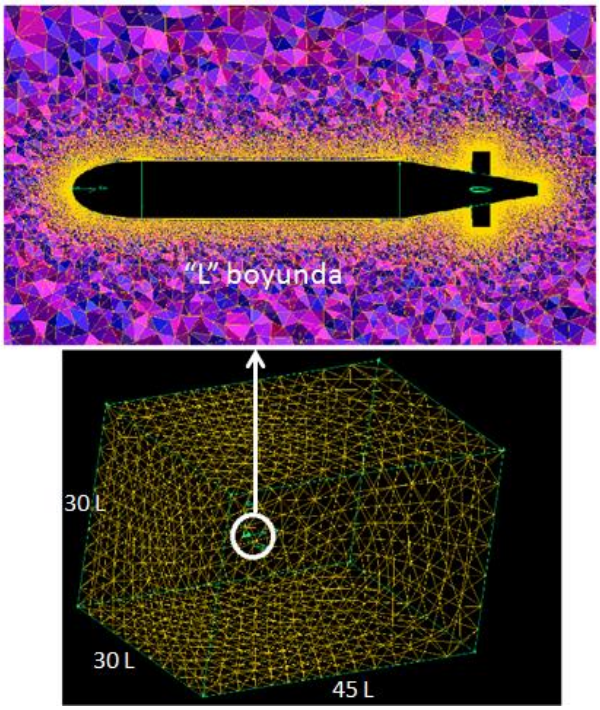
Şekil 7.20 : Autosub aracı yüzey çözüm ağı yapısı

Navier-Stokes (Sürtünmeli akış) çözümü için seçilen türbülans modeline uygun Y+ değerini sağlayan sınır tabaka ağı oluşturulmuştur. Sınır tabaka ağı, içinde bulunan akışın rejimi dikkate alınarak ve 2 katman halinde oluşturulmuştur. Bu durum, modelin üzerinde tanımlanan sınır tabaka ağı ile akış hacmi arasındaki uyumu iyileştirmek amacıyla yapılmıştır. Şekil 7.19'da model çevresinde oluşturulan sınır tabaka ağ yapısı gösterilmiştir.



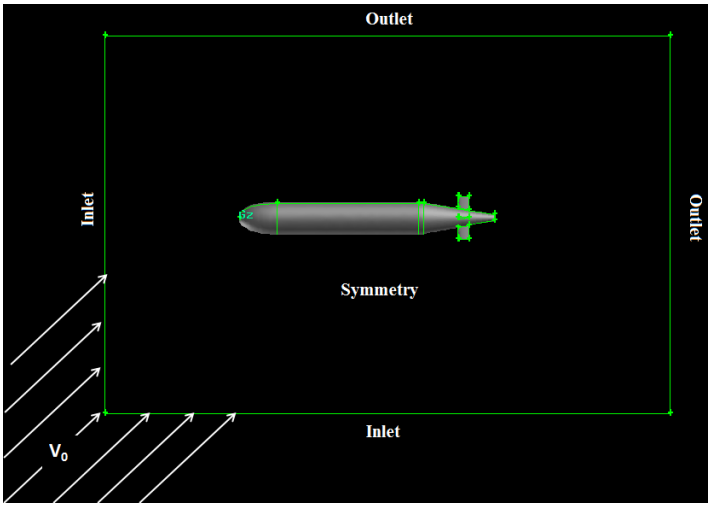
Şekil 7.21 : Autosub aracı için tanımlanan sınır tabaka ağ yapısı

Çözüm ağı oluşturma işlemi modelin etrafında akış hacminin oluşturulması ile tamamlanır ve HAD analizlerinin yapılması için hazır duruma getirilmiş olur. Akış hacmi hazırlanırken akış hacminin boyutları, blokaj etkisine maruz kalınmaması için modelin yanlarından, üstünden, altından ve önünden modelin 15 katı büyüklüğünde, modelin arkasından ise 30 kat büyüklüğünde boşluk kalacak şekilde ayarlanmıştır. Bu şekilde oluşturulan hacim ağ yapıları ve sınırları Şekil 7.20'de gösterilmiştir.



Şekil 7.22 : Autosub aracı için tanımlanan hacim ağ yapısı

Bu denek taşı çalışmasında hücum açılı bir seyir koşulu benzetimi yapıldığından, akış hacminin sınır koşulları aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.



Şekil 7.23 : Hücum açılı bir HAD analiz koşulu İçin tanımlanan sınır koşulları

Şekil 7.21'deki gibi tanımlanan sınır koşulları HAD analiz programında analiz modeli kurulurken, seyir koşulları ve içinde bulunulan akış koşulları için özelleştirilecektir.

7.1.2.3 Statik hidrodinamik verilerin doğrulanması

Autosub otonom su altı aracı için yapılan statik hidrodinamik katsayıların bulunmasına yönelik hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinde ANSYS FLUENT 13.0 ticari yazılımı kullanılmıştır. Hidrodinamik analizler için çözüm modeli, türbülans modeli, ortam koşulları ve sınır koşulları gibi karakteristik özellikler HAD analiz programına tanımlanmış ve istenilen koşullar için modelin hidrodinamik analizleri yapılmıştır. Hidrodinamik analiz modelinin kurulması ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 6.4'te verilmiştir. Bu çalışmada, Navier-Stokes denklemlerinin çözümü içim uygun Segregated çözüm modeli zamandan bağımsız, *Implicit* bir şekilde çözülmüştür ayrıca araç üzerinde oluşan türbülansın modellenmesi için *K-ε Realizable* türbülans modeli kullanılmıştır.

Autosub su altı aracına ait denek taşı çalışması için; 2/3 ölçekli model için 2.69 m/s doğrusal hızda ve -10 dereceden +10 dereceye kadar 2 derece aralıklar ile farklı hücum açılarında sürükleme kuvveti, Z yönündeki düşey öteleme kuvveti ve yunuslama momenti verileri mevcuttur. Bu kapsamda ilgili kuvvet ve moment değerlerini hesaplamak için gerekli modellemeler yapılmış ve bulunan sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar boyutsuz terimler üzerinden yapılmıştır. Kuvvet ve momentler boyutsuzlaştırılırken model boyu (L), aracın hızı (V) ve akışkanın yoğunluğu (ρ) kullanılmıştır. Hızın boyutsuzlaştırılması için ise, düşey öteleme hızının (w), aracın seyir hızına (U) oranı alınmıştır.

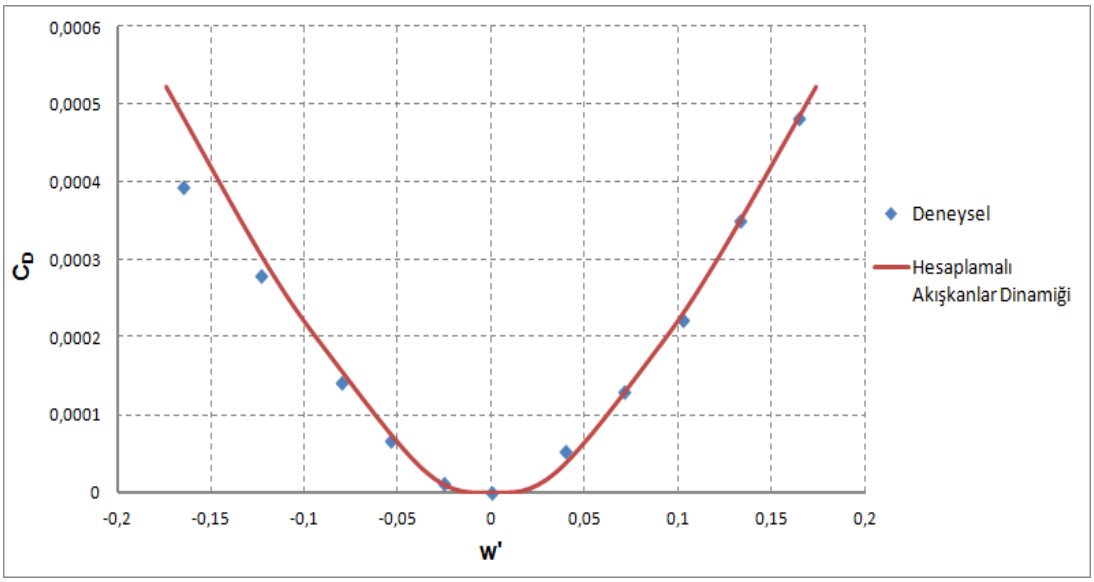
$$w' = \frac{w}{U} \tag{7.1}$$

$$C_D = \frac{Sürükleme\ Kuvveti}{{}^{1}/_{2}\rho V^2 L^2} \tag{7.2}$$

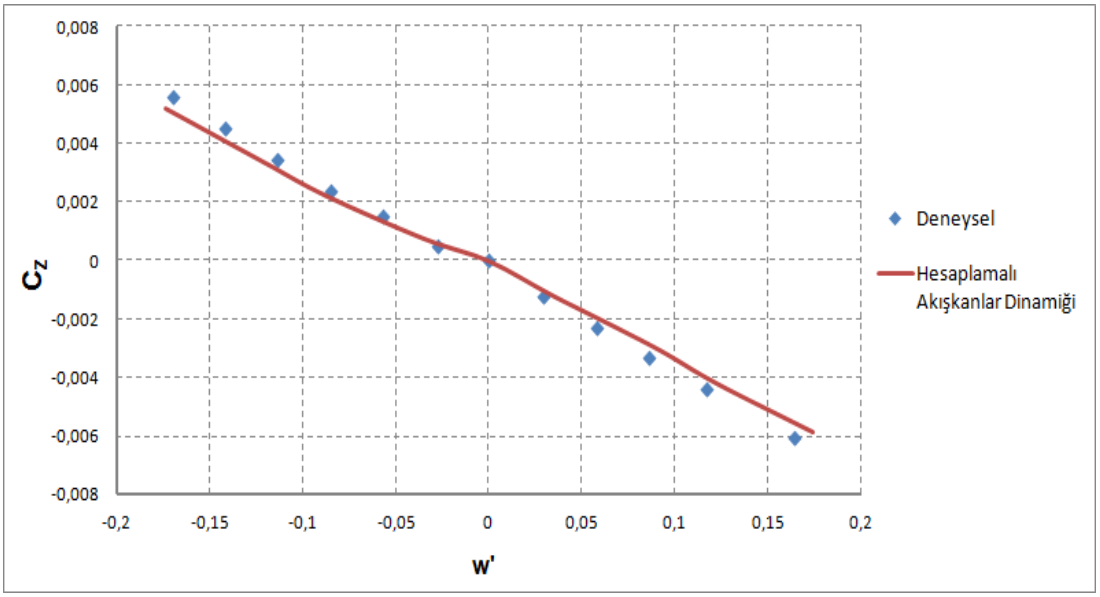
$$C_Z = \frac{Norma\ Kuvvet}{{}^{1}/_{2}\rho V^2 L^2} \tag{7.3}$$

$$C_M = \frac{Yunuslama\ Momenti}{{}^{1}/_{2}\rho V^2 L^3} \tag{7.4}$$

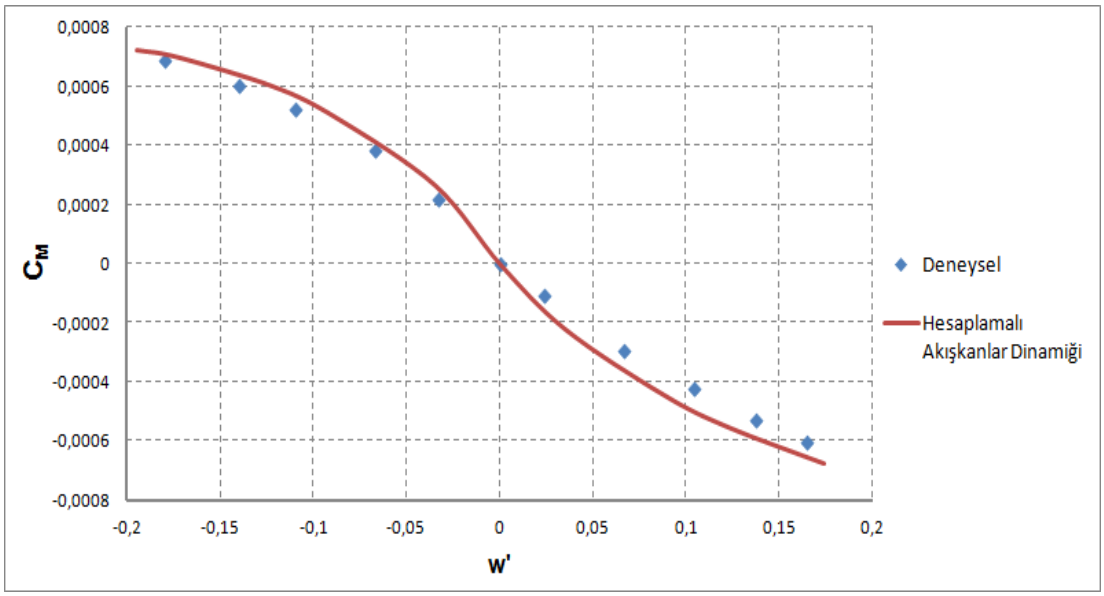
X, Z kuvvetleri ile M yunuslama momentinin w' hız oranına göre değişimlerini, deneysel veriler ile karşılaştırmalı olarak veren grafikleri aşağıda gösterilmiştir. Şekil 7.22'de gösterilen sürükleme katsayısının hücum açısına göre değişimi grafiğinde, hücum açısının sıfır olduğu durumda aracın sahip olduğu sürükleme kuvveti sıfır olarak kabul edilmiştir. Bu sayede sıfır hücum açısı referans değer olarak alınarak, sürükleme kuvveti katsayısının hücum açısı ile artışı incelenmiştir.



Şekil 7.24 : Sürükleme kuvveti katsayısının, w' hız oranına göre değişim grafiği [15].

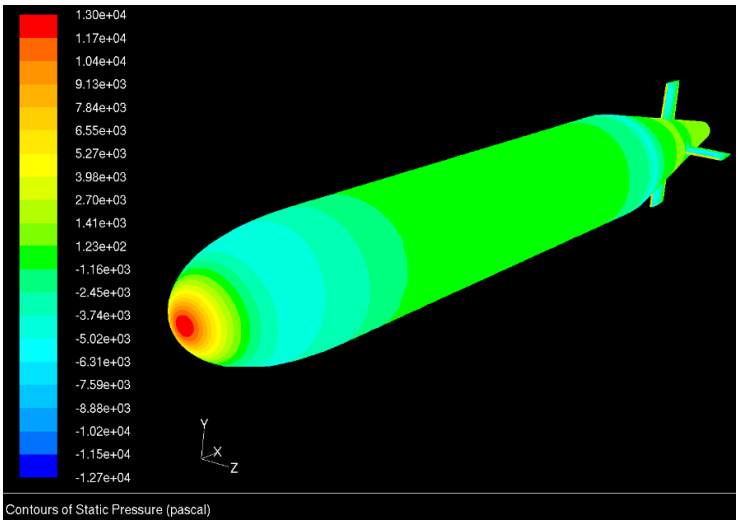


Şekil 7.25 : Z Yönündeki kuvvet katsayısının, w' hız oranına göre değişim grafiği [15].



Şekil 7.26 : Yunuslama momenti katsayısının, w' hız oranına göre değişim grafiği [15].

Karşılaştırmalı grafiklerde, HAD verileri ile ve deneysel verilerin oldukça uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, farklı hücum açılarında seyir yapan su altı araçlarının hidrodinamik kuvvet ve moment değerlerinin kurulan hidrodinamik modelleme altyapısı kullanılarak yüksek doğrulukla hesaplanabildiğini göstermektedir. Dolayısıyla Autosub aracına denek taşı çalışmasının başarı ile yapıldığı ve hücum açısı içeren analizler koşulları için de hidrodinamik analiz modelinin doğrulandığını söylenebilir. Doğrulanmış olan HAD analiz modeli kullanılarak hesaplanan Autosub aracının üzerindeki basınç dağılımı aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 7.27 : Autosub aracının üzerinde oluşan basınç dağılımı

Bu bölümde yapılan çalışmalarda Darpa denizaltı modeline ve Autosub OSA'sına ait denek taşı çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu sayede hücum açılı ve hücum açısız bir seyir koşulunda hareket eden bir su altı aracı üzerine etkiyen üç eksendeki hidrodinamik kuvvet ve momentler yüksek güvenilirlik seviyesinde hesaplanabilecektir. Dolayısıyla şöyle söylenebilir ki, statik hidrodinamik katsayıların hesaplanmasına ait hidrodinamik hesaplama modelleri doğrulanmıştır. Ancak yapılan bu denek taşı çalışmaları, farklı manevra koşullarında hareket eden su altı araçlarının dinamik hidrodinamik katsayılarının yüksek güvenilirlikte hesaplanması için yeterli değildir. Bu yetinin kazanılabilmesi için, çeşitli manevra koşullarında dinamik hidrodinamik katsayıların hesaplanmasını inceleyen denek taşı çalışmaları yapılmalıdır.

7.2 Dinamik HAD Analiz Modeli Doğrulama Çalışması

Dinamik hidrodinamik katsayıların hesaplanmasında kullanılacak HAD hesaplama yöntemlerinin doğrulanmasında Autosub OSA modeline ait denek taşları kullanılmıştır.

Yapılacak bu doğrulama çalışmaları sonucunda, rotatif hareketler yapan su altı araçlarının üzerinde oluşan doğrusal ve doğrusal olmayan manevra katsayılarının güvenilir bir şekilde hesaplanması amaçlanmaktadır.

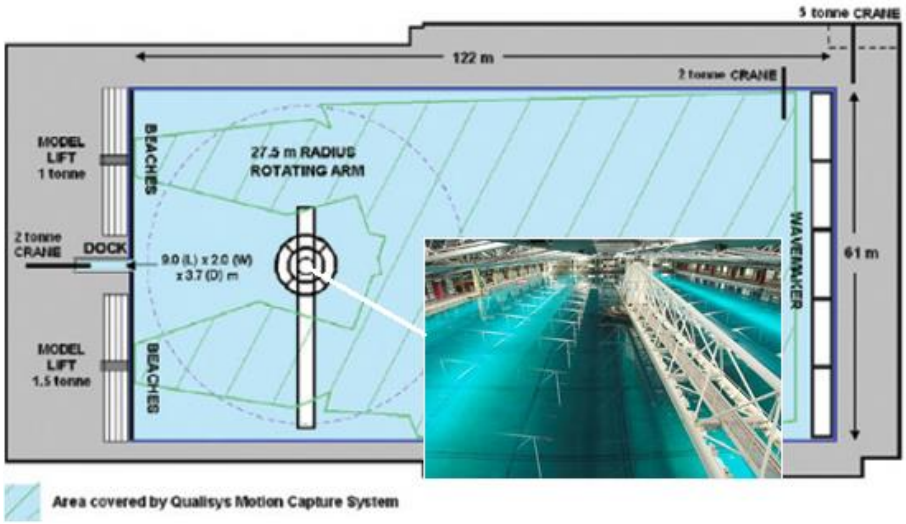
7.2.1 Autosub Otonom su altı aracın dinamik denek taşı çalışması

Su altında hareket eden araçlar, su ortamının özelliklerinden ötürü hareketleri sırasında birçok doğrusal olmayan ve akuple etkiye maruz kalırlar. Bu etkilerin bilinmesi ve kontrol edilebilmesi aracın sistem dinamiği tasarımı açısından çok önemlidir. Çünkü su altı araçları zorlayıcı manevra koşulları ile hareket ederken veya su altında herhangi bir çevresel bozuntuya maruz kaldıklarında, bu dinamik hidrodinamik koşulların üstesinden gelebilmeleri için doğrusal olmayan ve akuple katsayılarının hesaplanmış olması ve otopilot algoritmasının o katsayılar dikkate alınarak tasarlanmış olması gerekmektedir. Bu gibi sebeplerden ötürü dinamik hidrodinamik katsayıların yüksek güvenilirlik seviyesinde hesaplanması sistem hidrodinamik ve kontrolcü tasarımı açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada dinamik hidrodinamik katsayıların yüksek güvenilirlik seviyesinde hesaplanabilmesi için dinamik denek taşı çalışmaları yapılmıştır. Dinamik denek taşı

çalışması için Autosub OSA'sına ait bir çalışma kullanılmıştır [15,16]. Autosub aracı ile ilgili detaylı bilgi Bölüm.2'de ve Bölüm 7.1.2'de verilmiştir.

7.2.1.1 Test ve analiz koşulları

Bu çalışmada kullanılan Autosub OSA'sına ait deneysel veriler, İngiltere Southampton'da bulunan Ulusal Oşinografi Merkezi ve Southampton Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Fakültesi tarafından gerçekleştirilen testler sonucunda elde edilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler, ¾ ölçekli Autosub aracının modeli kullanılarak Döner Kol Mekanizması Test Düzeneğinde yapılmıştır. Bu test düzeneğinde gerçekleştirilen testler ¾ oranındaki ölçekli model için 2.69 m/s doğrusal hızda ve 13m, 17.36m, 26m gibi üç farklı dönme yarıçapında gerçekleştirilmiştir [15,16]. Normalde 7 m boya sahip olan ve daha yüksek hızlarda hareket edebilen Autosub su altı aracı için, deney düzeneğinin imkânları çerçevesinde ölçeklendirilerek 5.25 m boya ve 0.67m çapa sahip bir model oluşturulmuştur. Deneyler Haslar Teknolojileri Parkında, Hampshire, İngiltere'de bulunan QinetiQ firmasına ait deney havuzunda gerçekleştirilmiştir. Deney havuzu 122 m uzunluğunda, 61 m genişliğinde ve 5,5 m derinliğindedir. Deney havuzunun döner kol mekanizması 0,01 rad/s ile 0,6 rad/s açısal hızlarında dönebilmektedir. Ayrıca düzeneğe ait döner kol mekanizması 7,5 m ile 27,5 m dönme yarıçaplarına ayarlanabilmektedir [35]. Denek taşı dokümanındaki testlerin gerçekleştirildiği test düzeneği Şekil 7.26'da gösterilmiştir. Bu deney düzeneği döner kol testleri haricinde doğrusal çekme testleri için de kullanılabilmektedir [35]. Bölüm 7.1.2.1'de Autosub aracı için anlatılan statik denek taşı çalışmasındaki testler de bu test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir.

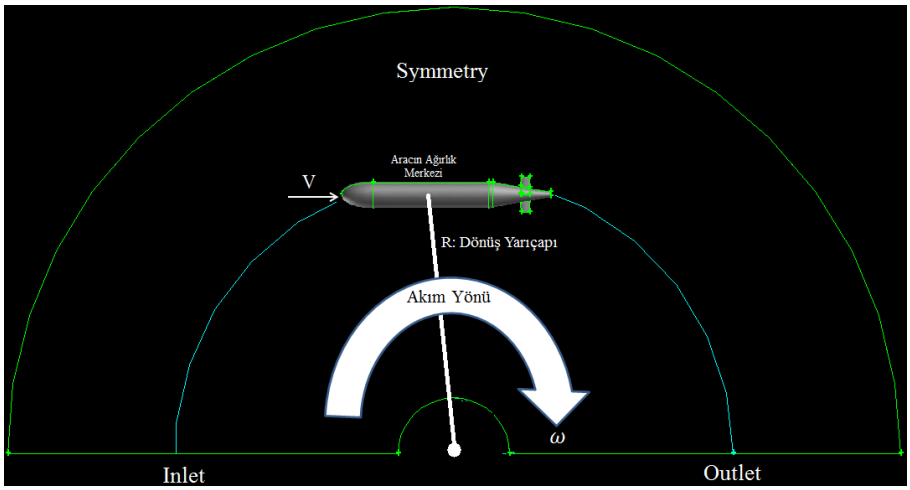


Şekil 7.28 : Autosub otonom su altı aracının döner kol testlerinin yapıldığı deney havuzu [35].

Deneylerde çalışılan Reynolds sayısı aralığı yaklaşık 14 milyon civarındadır. Yapılan deneylerde suyun dinamik viskozitesi 0,001003 kg/m.s ve yoğunluğu 998 kg/m^3 olarak kabul edildiğinden yapılacak HAD analizlerinde de viskozite ve yoğunluk değerleri olarak aynı değerler kullanılacaktır [15,16].

7.2.1.2 Çözüm ağının oluşturulması

Modelin HAD analizlerinin yapılabilmesi için öncelikle modelin içinde hareket edeceği akış hacminin oluşturulması gereklidir. Daha sonra akış hacmi oluşturulan modelin çözüm ağı oluşturma işlemi başlanır. Dinamik Had analizleri yapılırken oluşturulan çözüm ağları statik HAD analizlerinde oluşturulanlara göre farklılık göstermektedir. Daha önce yapılan statik denek taşı çalışmalarında, blokaj etkisi oluşmaması için sınırları modelin etrafından yeterli uzaklıklarda bulunan dikdörtgenler prizması şeklinde bir akış hacmi üzerinde çalışılmıştı. Ancak dinamik hidrodinamik analizlerde manevra koşulları için benzetimler yapılacağından, akış hacminin, aracın rotatif hareket yapmasına imkân verir özellikte olması gerekmektedir. Bu sebeple döner kol mekanizması benzetiminin yapılacağı bu denek taşı çalışmasında derinliği olan yarı daire biçiminde bir akış hacmi oluşturulmuştur.



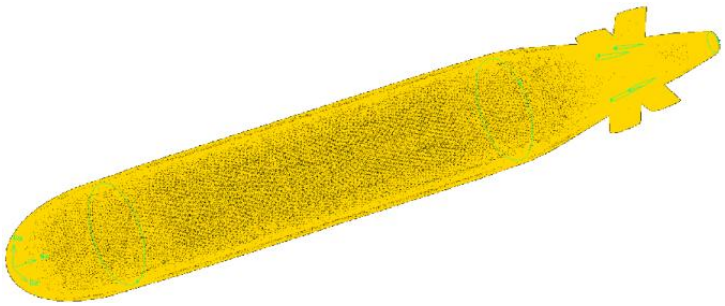
Şekil 7.29 : Autosub aracının bir dönüş yarıçapı ile dönme hareketinin benzetimi.

Bu akış hacminde R dönüş yarıçapını, ω aracın sahip olacağı açısal hızı ve V aracın sahip olduğu doğrusal hızı göstermektedir. Bu üç değişken birbirleriyle aşağıdaki gibi bağımlı olduklarından, herhangi biri sabit tutularak diğer iki terim üzerinde değişiklik yapılabilir.

$$V = \omega \times R \qquad \textbf{(7.5)}$$

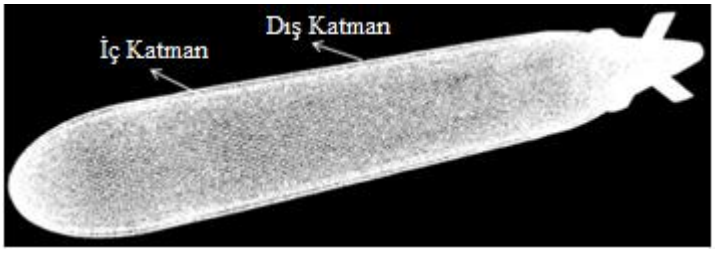
Bu sayede sabit bir doğrusal hızda hareket eden bir su altı aracının farklı dönüş yarıçaplarında dönüş manevrası yaparken dönüş hızının nasıl değiştiği gözlemlenebilir. Oluşturulan bu seyir benzetim modeli sayesinde aracın yunuslama (q) veya sapma (r) açısal hızları ile manevra yaptığı durum modellenmiştir. Ancak bu analiz modelinde aracın dönüş yarıçapı, çözüm ağının oluşturulması aşamasında belirlendiğinden, her bir dönüş yarıçapı için yeni bir çözüm ağı oluşturulur ve o çözüm ağı için HAD analizi yapılır.

Bu çalışmada da çözüm ağı oluşturma işlemi için ANSYS GAMBIT ticari yazılımı kullanılmıştır. Çözüm ağı oluşturulurken, çözüm ağı oluşturma hiyerarşisine bağlı kalınarak, kenar, yüzey ve hacim çözüm ağları, Navier-Stokes denklemlerinde kullanılabilecek kalitede üretilmiştir.



Şekil 7.30 : Autosub otonom su altı aracının dinamik HAD analizleri için oluşturulan yüzey çözüm ağı

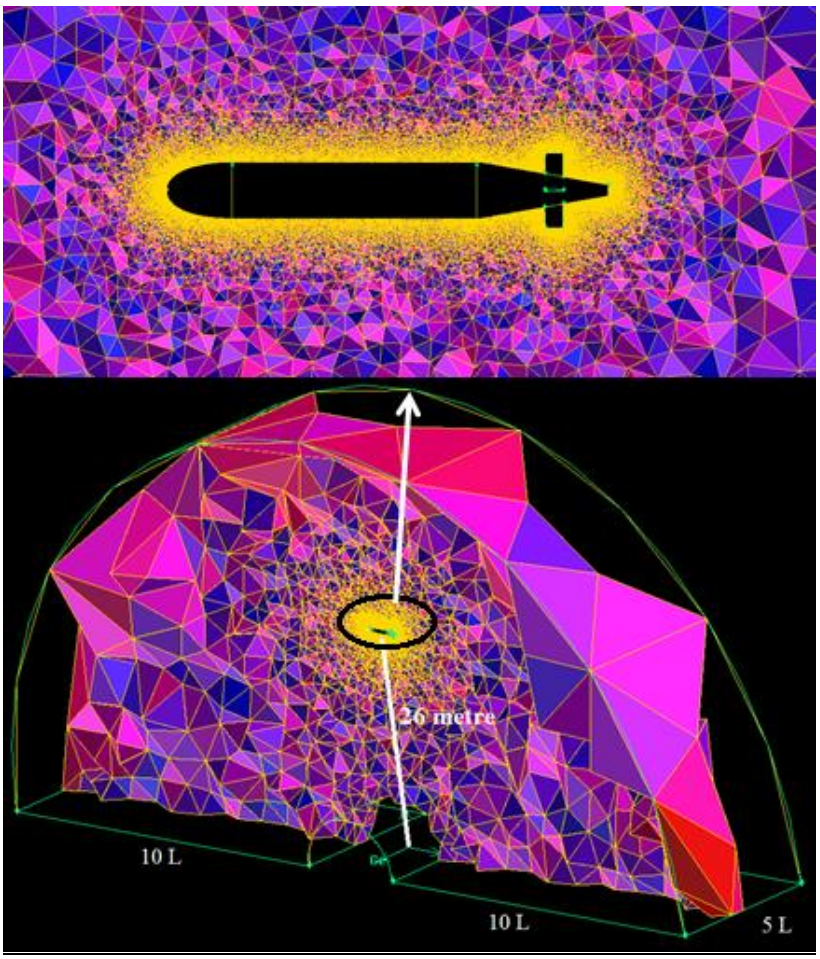
Navier-Stokes (Sürtünmeli akış) çözümü için seçilen türbülans modeline uygun Y+ değerini sağlayan sınır tabaka ağı oluşturulmuştur. Sınır tabaka belirlenirken aracın manevra koşulunda sahip olduğu doğrusal hız değeri dikkate alınır. Sınır tabaka ağı bu çalışmada da, içinde bulunan akışın rejimi dikkate alınarak ve 2 katman halinde oluşturulmuştur. Bu durum, modelin üzerinde tanımlanan sınır tabaka ağı ile akış hacmi arasındaki uyumu iyileştirmek amacıyla yapılmıştır. Şekil 7.29'da model çevresinde oluşturulan sınır tabaka ağ yapısı gösterilmiştir.



Şekil 7.31 : Autosub aracının sınır tabaka ağ yapısı

Çözüm ağı oluşturma işlemi modelin etrafında akış hacminin oluşturulması ile tamamlanır ve HAD analizlerinin yapılması için hazır duruma getirilmiş olur.

Akış hacmi hazırlanırken akış hacminin boyutları, blokaj etkisine maruz kalınmaması için modelin yanlarından modelin boyunun 5 katı, akış hacmi dairesel olduğu için önünden, arkasından, altından ve üstünden ise en az, benzetimi yapılacak dönüş yarıçapı kadar boşluk kalacak şekilde ayarlanmıştır. Oluşturulan hacim çözüm ağı yapısı Şekil 7.30'da gösterilmiştir.



Şekil 7.32 : Autosub aracının bir dönüş yarıçapı ile dönme hareketinin benzetiminin yapıldığı çözüm ağı yapısı.

Hacim çözüm ağı oluşturulan Autosub su altı aracına, denektaşı dokümanındaki seyir, sınır ve ortam koşulları tanımlanarak HAD analiz modeli kurulur.

7.2.1.3 Dinamik hidrodinamik verilerin doğrulanması

Autosub su altı aracı için yapılan dinamik hidrodinamik katsayıların bulunmasına yönelik hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinde ANSYS FLUENT 13.0 ticari yazılımı kullanılmıştır. Hacim ağı oluşturulmuş modelin ölçeklendirilmesi ve çözüm

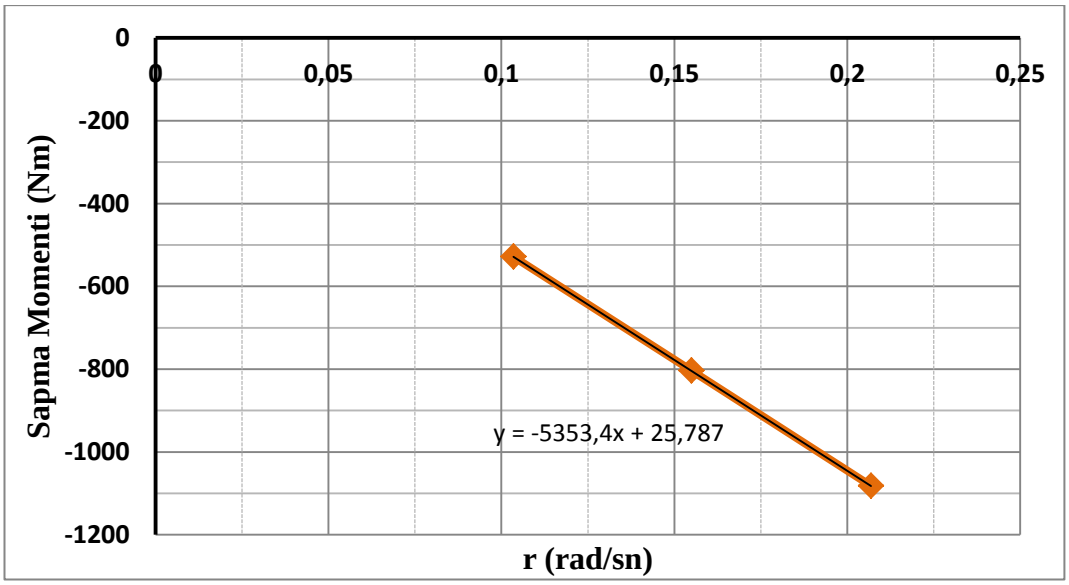
ağ yapısı kontrolü yapıldıktan sonra HAD analiz modelinin kurulum işlemi başlanır. Öncelikle analiz modelinin çözüleceği çözüm modeli belirlenir. Bu analizde *Pressure-Based* çözüm modeli *Steady* koşullarda çözülecektir. Ardından kullanılacak türbülans modeli belirlenir, bu çalışmada *K-ε Realizable* türbülans modeli, *Enhanced Wall Treatments* koşullarında uygulanacaktır. Daha sonra modelin içinde hareket edeceği akışkanın özellikleri belirlenir. Özellikleri belirlenen akışkana modelin etrafında rotasyonel hareket tanımlanacağından, rotasyonel hareket *Moving Reference Frame* modülü ile akışkana tanımlanmıştır. Bu modülde akışkanın modelin etrafında hangi yönde döneceği, dönüş merkezinin neresi olacağı ve hangi açısal hızda döneceği tanımlanmıştır. Bu işlemin ardından, akış hacmi için daha önceden, çözüm ağı oluşturulurken tanımlanan sınır koşulları bu bölümde özelleştirilir. Son olarak, kurulan HAD analiz modelinin çözüm metodu ayarlanır ve yaklaşık 1500 iterasyonluk analiz başlatılır. İterasyonlar tamamlandığında istenilen yakınsama derecesine ulaşıldıysa analizin tamamlandığı kabul edilir.

Yapılan bu denek taşı çalışmasında ¾ ölçekli Autosub aracının 13, 17.36 ve 26 m dönüş yarıçaplarında, 2.69 m/s doğrusal hızda manevra analizleri yapılır. Karşılaştırılan denek taşı dokümanında, farklı sapma açısal hızlarında (r) modelin üzerinde oluşan sapma momentleri (N) için deneysel veriler mevcut olduğundan, yapılan HAD analizlerinde aracın sapma açısal hızlarına göre sapma momentlerinin değişim grafikler incelenir.

Çizelge 7.1 : Sapma manevrası analizlerinden elde edilen hidrodinamik değerler.

Doğrusal Hız (m/s)	Dönme Yarıçapı (m)	Açısal Hız (rad/s)	Sapma Momenti (Nm)
2,69	13	0,2069	-1082
2,69	17,36	0,155	-803,65
2,69	26	0,1035	-528,46

Çeşitli sapma açısal hızlarındaki değişimlere göre, Autosub aracının üzerinde oluşan sapma momenti değerlerinin grafiği Şekil 7.31'de verilmiştir. Bu grafik sapma açısal hızlarındaki değişime göre sapma momentlerinin değişimini göstermektedir. Bu değişimin tamamen lineer olduğu görülür. Grafikteki eğimin değeri bize N_r değişimini vermektedir.



Şekil 7.33 : Denek taşı çalışmasındaki sapma açısal hızlarına göre hesaplanan sapma momenti değerlerinin değişimi [15].

Elde edilen grafikteki eğiminin boyutsuzlaştırılmış hali bize $N_r{}'$ katsayısını verecektir.

$$\text{N}= \left(N_r{}' r \frac{1}{2}\rho l^3\right) u \quad \rightarrow \quad N_r{}' = \frac{N_r}{\left(\frac{1}{2}\rho u l^3\right)} \qquad \textbf{(7.6)}$$

$$\text{N}_\text{r} = -5353{,}4 \rightarrow \quad N_r{}' = \frac{-5353{,}4}{\left(\frac{1}{2}\times 998 \times 2{,}69 \times 5{,}25^3\right)} \quad \rightarrow \quad N_r{}' = -0{,}00513$$

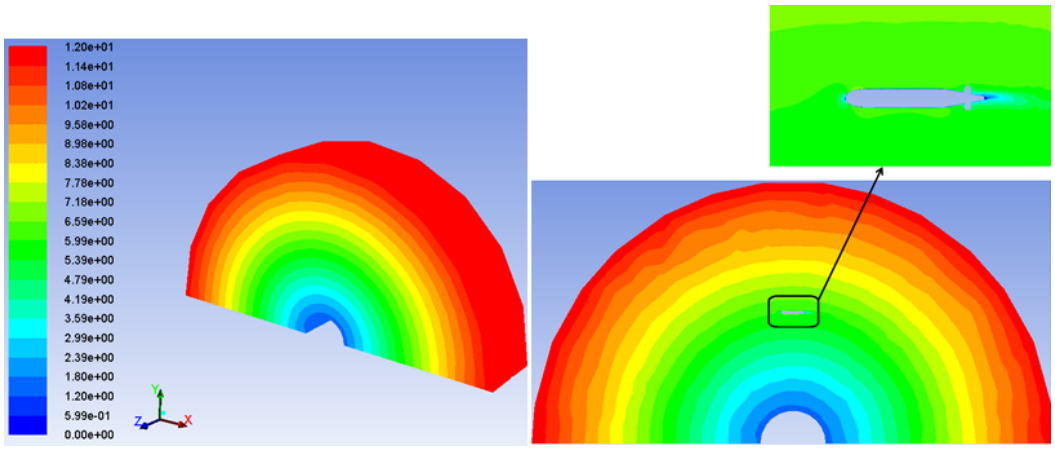
Deneysel çalışmalar sonucunda hesaplanan $N_r{}'$ denek taşı dokümanında -0,00540 olarak verilmiştir.

Çizelge 7.2 : Dinamik denek taşı çalışmasından elde edilen sonuçların karşılaştırılması [15].

$N_r{}'$ (HAD)	$N_r{}'$ $(Deneysel)$	**HAD Analizleri ile Deneysel Hesaplamalar Arasında Oluşan Fark**
-0,00513	-0,00540	% 4,94

Görüldüğü üzere, HAD analizleri sonucunda hesaplanan bir manevra katsayısı ile deneysel çalışmalar sonucunda hesaplanan manevra katsayısı arasında sadece %4,94'lük bir fark oluşmuştur. Bu durum, dinamik hidrodinamik katsayılardan lineer manevra katsayılarının HAD analiz yöntemleri kullanılarak yüksek güvenilirlik seviyesinde hesaplanabildiklerini göstermektedir.

Döner Kol benzetiminin yapıldığı HAD analizi soncunda akış hacmi üzerinde ortaya çıkan hız dağılımı aşağıdaki gibi oluşmuştur.



Şekil 7.34 : Döner kol mekanizması benzetimi sonucunda akış hacmi ve model üzerinde oluşan hız dağılımı**.**

Döner kol benzetimi sonucunda akış hacmi üzerinde oluşan hız dağılımı incelendiğinde, mekanizmanın merkezinde doğrusal hızın sıfır olması ancak, mekanizmanın dönüş yarıçapı arttıkça ve model merkezden uzaklaştıkça model etrafında oluşan doğrusal hız değerinin giderek artması beklenmektedir. Görüldüğü gibi fiziksel olarak beklenen sonuçlar ile HAD analizi sonucunda elde edilen sonuçlar uyumludur. Bu durum yapılan benzetimin fiziksel olarak bekleneni karşıladığını göstermektedir.

Sapma düzleminde doğrulanan bu hesaplama modeli yunuslama düzlemi için de kullanılabilecektir. Böylelikle yunuslama veya sapma manevrası yapan bir su altı aracı üzerine etkiyen hidrodinamik kuvvetlerin hesaplanması için yeni bir HAD hesaplama modeli oluşturulmuştur.

Bu bölümde statik ve dinamik hidrodinamik katsayıların hesaplanması için yeni HAD hesaplama yöntemleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu yeni hesaplama modelleri sayesinde bir su altı aracı üzerinde oluşan statik ve dinamik hidrodinamik katsayılar güvenilirliği yüksek bir şekilde hesaplanabilecektir. Geliştirilen bu modeller sayesinde, tasarlanan su altı araçlarının belirli manevralar için gerçekleştirdikleri hidrodinamik performansları su altı testleri veya atışlı testler yapılmadan incelenebilecektir.

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen yukarıda anlatılan HAD analiz yöntemleri kullanılarak Autosub su altı aracının altı serbestlik derecesindeki hidrodinamik veri tabanı oluşturulacak ve hidrodinamik performansı incelenecektir.

8. EK SU HİDRODİNAMİK KATSAYILARININ HESAPLANMASI İÇİN AMPİRİK HESAPLAMA YÖNTEMİNİN KURULMASI

Bu çalışmada literatürde bulunan küre, elipsoidal gibi temel geometrik cisimlerin ve su altı araçların ek su kütlesi katsayılarının hesaplanması için yapılan teorik ve ampirik çalışmalar anlatılacaktır. Küre vb. geometrik cisimler çok basit bir geometriye sahip olmalarından ötürü bu gibi cisimler için ek su kütlesi hesabında teorik yöntemler kullanılmaktadır. Ancak, elipsoidal ve daha karmaşık olan su altı araçlarının geometrileri için ek su kütlesi hesabı yapılırken ampirik yöntemler kullanılmıştır. Ek su kütlesi katsayıları ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 4.3.2.4'te verilmiştir. Ek su kütlesi ve ataleti katsayıları cisimleri zamana bağlı hareketlerinde oluşan ancak cisimlerin sahip olduğu hız değerlerinden bağımsız olan ve tamamen cisimlerin geometrik özelliklerine bağlı olan katsayılardır. Önceki bölümlerde ek su kütlesi katsayılarının sistem dinamiği için öneminden bahsedildiğinden, bu bölümde ek su kütlesi katsayılarını hesaplama yöntemlerinden bahsedilecektir.

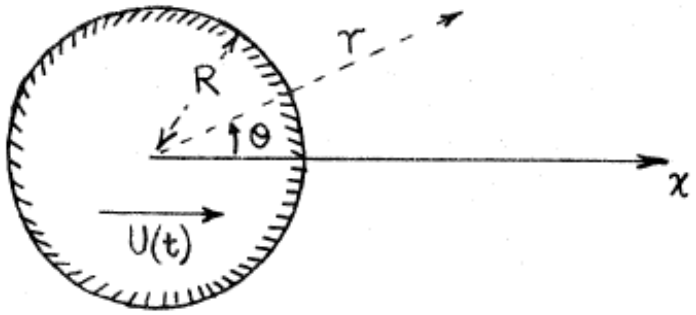
8.1 Temel Geometrik Cisimler İçin Ek Su Kütlesi Hesaplama Yöntemlerinin Geliştirilmesi

Bu bölümde temel geometrik cisimlerden küre, silindir ve elipsoit için geliştirilen ek su kütlesi hesaplama yöntemleri anlatılacaktır. Bu cisimlerden küre ve silindir için geliştirilen yöntemler teorik hesaplama tabanlı, elipsoit için geliştirilen yöntem ise yarı ampirik tabanlıdır.

8.1.1 Küre için geliştirilmiş ek su kütlesi hesaplama yöntemi

Küre için geliştirilen ek su kütlesi hesaplama yönteminde, çizgisel ivmeli hareket yapan bir kürenin üzerinde oluşan akışın, idealleştirilmiş potansiyel akış olduğu kabul edilmektedir. Bu kabule dayanarak, kürenin çizgisel ivmeli bir hareketi sonucunda kendi üzerinde oluşan ek su kütlesi analitik olarak hesaplanabilecektir. Küre için ek su kütlesi hesabının analitik olarak geliştirilmesi için R yarıçapında bir kürenin zaman ile değişen U(t) hızında pozitif X yönünde hareket ettiğini varsayalım. Yapılacak hesaplamalar için polar koordinatlar (r, υ) kullanılmıştır [36].

$$x = rcosv \qquad \textbf{(8.1)}$$



Şekil 8.1 : İvmeli hareket yapan küre için polar koordinat takımı [36].

Kürenin sahip olduğu hız potansiyeli (φ), küre üzerinde oluşan akışkanın hızları (u_r, u_v) ve polar koordinatlar (r, v) cinsinden ifade edilmiştir.

$$u_r = \frac{\partial \varphi}{\partial r} \quad ; \quad u_r = \frac{1}{r}\frac{\partial \varphi}{\partial r} \qquad \textbf{(8.2)}$$

Küre için hız potansiyeli açılımı yapılırsa;

$$\varphi_{Küre} = -\frac{UR^3}{2r^2} cosv \qquad \textbf{(8.3)}$$

Küre için yazılan hız potansiyeli denklemi aşağıdaki Laplace denklemini sağlamaktadır.

$$\nabla^2 \varphi = 0 \qquad \textbf{(8.4)}$$

Öyle ise, küre için tanımlanan hız potansiyeli ifadesi yukarıdaki Laplace denklemi içinde çözülebilir. Bu bir ikinci dereceden kısmi diferansiyel denklem çözümüdür. Küre denklemin sınır şartları $R'den\ \infty'a$ ve $0'dan\ \pi'ye$ olarak tanımlanırsa, yukarıdaki kısmı diferansiyel denkleminin çözümü aşağıdaki gibi bulunur [36].

$$Küre: I = \int_R^\infty \int_0^\pi \left[\left(\frac{1}{U}\frac{\partial \varphi}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{1}{Ur}\frac{\partial \varphi}{\partial v}\right)^2\right] 2\pi r^2 sinvdvdr = \frac{2}{3}\pi R^3 \qquad \textbf{(8.5)}$$

Yukarıda elde edilen çözüm, küre yer değiştirdiğinde hareket ettirdiği suyun hacmini vermektedir. Bu hacim kürenin içinde hareket ettiği akışkanın yoğunluğu ile çarpılırsa, küre için ek su kütlesi ifadesi elde edilir.

$$M_{küre} = \frac{2}{3}\pi R^3 \rho \qquad \textbf{(8.6)}$$

8.1.2 Silindir için geliştirilmiş ek su kütlesi hesaplama yöntemi

Küre için ek su kütlesi ifadesi türetilirken kullanılan hız potansiyeli ifadesi ve polar koordinatlar silindir için yapılacak ek su kütlesi hesabında da kullanılabilir. Küre ve silindirin kesit alanları benzer olduğundan ve her ikisi için de polar koordinatlar kullanılabildiğinden, küre için kullanılan aşağıdaki denklemler silindir için de kullanılacaktır [36].

$$u_r = \frac{\partial \varphi}{\partial r} \quad ; \quad u_r = \frac{1}{r}\frac{\partial \varphi}{\partial r} \tag{8.7}$$

Silindir için hız potansiyeli açılımı yapılırsa;

$$\varphi_{Silindir} = -\frac{UR^2}{2} cosv \tag{8.8}$$

Silindir için yazılan hız potansiyeli denklemi de, küre için geçerli olan aşağıdaki Laplace denklemini sağlamaktadır.

$$\nabla^2 \varphi = 0 \tag{8.9}$$

Öyle ise, silindir için tanımlanan hız potansiyeli ifadesi yukarıdaki Laplace denklemi için çözülebilir. Bu da küre denklemi gibi bir ikinci dereceden kısmi diferansiyel bir denklem çözümüdür. Silindir denklemin sınır şartları $R'den\ \infty'a$ ve $0'dan\ 2\pi'ye$ olarak tanımlanırsa, silindir için yukarıdaki kısmı diferansiyel denkleminin çözümü birim uzunlu için aşağıdaki gibi bulunur.

$$Silindir: I = \int_R^\infty \int_0^{2\pi} \left[\left(\frac{1}{U}\frac{\partial \varphi}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{1}{Ur}\frac{\partial \varphi}{\partial v}\right)^2\right] rdvdr = \pi R^2 \tag{8.10}$$

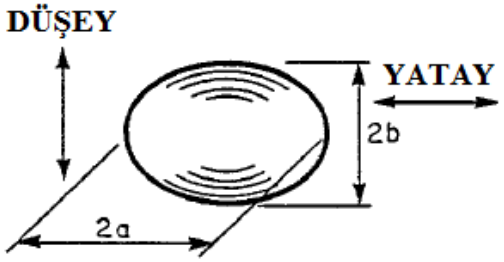
Yukarıda elde edilen çözüm, silindirin birim uzunluğunun yer değiştirmesinin hareket ettirdiği suyun hacmini vermektedir. Bu hacim silindirin içinde hareket ettiği akışkanın yoğunluğu ile çarpılırsa, silindirin birim uzunluğu için ek su kütlesi ifadesi elde edilir [36].

$$M_{Silindir} = \pi R^2 \rho \quad \text{birim uzunluk için} \tag{8.11}$$

8.1.3 Elipsoit için geliştirilmiş ek su kütlesi hesaplama yöntemi

Elipsoit için de potansiyel hız fonksiyonu kullanılarak ek su kütlesi hesabı yapılmıştır. Ancak elipsoit geometrisinde en boy oranı değişkenlik gösterebildiğinden ve sabit bir geometrik yapı olmadığından, farklı en boy oranları

için ek su kütlesi miktarı değişkenlik göstermektedir. Dolayısıyla Elipsoit ek su kütlesi ifadesi, içinde en boy oranını ifade bir parametre bulundurması icap etmektedir. Elipsoidin yatay veya dikey doğrultularda hareketine göre üzerine binen ek su kütlesi değişkenlik göstereceğinden yatay ve düşey doğrultular için farklı parametreler tanımlanmıştır [36].



Şekil 8.2 : Ek su kütlesi hesabı geliştirilen elipsoit geometrisi [36].

Elipsoit için ek su kütlesi hesabı da, küre ve silindir geometrileri için türetildiği gibi potansiyel akış varsayımına dayanılarak yapılmıştır. Bir elipsoidin düşey veya yatay eksenlerde ivmeli hareket yapması sonucu oluşan ek su kütlesi değeri aşağıdaki gibi hesaplanır [36].

$$M_{Elipsoit} = K\frac{4}{3}\pi\rho ab^2 \qquad \textbf{(8.12)}$$

Küre sahip olduğu en boy oranına göre düşey ve yatay eksenlerde ivmeli hareket yaptığında, farklı değerlerde ek su kütlesi oluşacaktır. Bu farklılık deneysel çalışmalar ile K parametresine bağlı olarak Çizelge 8.1'deki gibi ifade edilebilir.

Çizelge 8.1 : Kürenin en boy oranına göre K parametresinin değişimi [36].

a/b Oranı	Yatay hareket için K değeri	Düşey hareket için K değeri
1,00	0,5000	0,5000
1,50	0,3050	0,6210
2,00	0,2090	0,7020
2,51	0,1560	0,7630
2,99	0,1220	0,8030
3,99	0,0820	0,8600
4,99	0,0590	0,8950
6,01	0,0450	0,9180
6,97	0,0360	0,9330
8,01	0,0290	0,9450
9,02	0,0240	0,9540
9,97	0,0210	0,9600
10,00	0,0000	1,0000

Görüldüğü gibi elipsoit geometrisinde en boy oranları farklı olabildiğinden, elipsoit üzerinde oluşan ek su kütlesi değerini hesaplamak için, küre ve silindir formüllerinde olan parametreler haricinde ek bir K parametresinin ek su hesabı denklemine dâhil edilmesi gerekmektedir.

8.2 Su Altı Araçları İçin Ek Su Katsayılarının Hesaplama Yöntemlerinin Geliştirilmesi

Ek su katsayıları su altı araçları ivmeli hareket yaptığında oluşan dinamik hidrodinamik katsayılardır. Bu katsayılar araç ivmeli hareket yaptığında oluşmakta ancak, aracın içinde bulunduğu seyir koşulundan bağımsızdır. Dolayısıyla bu katsayılar aracın sahip olduğu seyir hızı veya hücum açısı gibi parametreler ile değişmezler. Ek su katsayıları sadece aracın geometrisine bağlı katsayılardır. Dolayısıyla bu katsayıların hesaplanması için su altı araçların geometrik parametrelerinden faydalanılır. Araç doğrusal harekete sahip olduğunda ek su kütlesi katsayıları, açısal harekete sahip olduğunda ise ek su ataleti katsayıları araca etkimektedir. Aşağıdaki bölümlerde, su altı araçlarının yatay veya düşey doğrusal hareket yapması sonucu oluşan ek su kütlesi katsayılarının ve aracın rotasyonel hareket yapması ile oluşan ek su ataleti katsayılarının ampirik tabanlı hesaplama yöntemleri anlatılmıştır [37]. Yatay ve düşey simetriye sahip olan su altı araçları için, ek su katsayıları matrisindeki diagonel elemanlar sistem dinamiği için önemli olduğundan aşağıdaki bölümde, ek su katsayıları matrisindeki diagonel olan elemanların hesaplanması anlatılmıştır. Ayrıca, ek su katsayıları ve sistem dinamiği açısından önemleri hakkında detaylı bilgi Bölüm 4.4'de verilmiştir.

8.2.1 Su altı araçları için ek su kütlesi katsayılarının hesaplanması

Bölüm 4.4'de anlatılan, ek su kütlesi matrisinin köşegeni üzerinde bulunan diagonel elemanlardan $X_{\dot{u}}$, $Y_{\dot{v}}$ ve $Z_{\dot{w}}$ katsayılarının hesaplanışı bu bölümde anlatılacaktır.

8.2.1.1 $X_{\dot{u}}{}'$ Ek su kütlesi katsayısının hesaplanması

$X_{\dot{u}}{}'$ ek su kütlesi katsayısı, aracın X yönündeki çizgisel ivmeli hareketi sonucunda oluşmaktadır. Bu katsayının hesaplanmasında su altı aracının kuyruk bölümlerinin oluşturacağı etki ihmal edilmektedir. Su altı araçlarının gövdesi elipsoit geometrisini andırmaktadır. Elipsoit geometrisinin ek su kütlesi katsayısının hesaplanmasına ait

çalışma önceki bölümde yapıldığından, bu çalışma referans alınarak X yönünde oluşan ek su kütlesi katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanabilir [37].

$$X_{\dot{u}}{}' = \frac{k_1 m_{df}}{{}^1/_2 \rho l^3} \quad \textbf{(8.13)}$$

Yukarıdaki formülde kullanılan m_{df} parametresi modelin taşırdığı su kütlesini ifade etmektedir. k_1 katsayısı ise X yönünde yapılan çizgisel ivmeli hareket için kullanılan bir katsayıdır ve aşağıda verilen formül ile hesaplanır [37].

$$k_1 = \frac{a_0}{2 - a_0} \quad \textbf{(8.14)}$$

k_1 değerinin hesaplanmasında kullanılan a_0 parametresi aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$a_0 = \frac{2(1-e^2)}{e^3}\left(\frac{1}{2} ln\left[\frac{1+e}{1-e}\right] - e\right) \quad \textbf{(8.15)}$$

Burada kullanılan e değeri elipsoidin kaçıklık oranını ifade etmektedir. Bu değer elipsoidin geometrik özelliklerine bağlıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$e = \frac{2}{l}\left(\frac{l^2}{4} - \frac{S_b}{\pi}\right)^{1/2} \quad \textbf{(8.16)}$$

Burada l elipsoidin boyu ve S_b ise elipsoidin gövdesinin maksimum kesit alanıdır.

8.2.1.2 $Z_{\dot{w}}{}'$ ve $Y_{\dot{v}}{}'$ Ek su kütlesi katsayılarının hesaplanması

$Z_{\dot{w}}{}'$ ek su kütlesi katsayısı, aracın Z yönündeki çizgisel ivmeli düşey hareketi sonucunda oluşmaktadır. Bu katsayının hesaplanmasında, gövde haricinde yatay kuyrukların etkisi de hesaba katılmaktadır [37].

$$Z_{\dot{w}}{}' = Z_{\dot{w}}{}'_{Gövde} + Z_{\dot{w}}{}'_{Yatay\ Kuyruklar} \quad \textbf{(8.17)}$$

Aşağıda su altı aracının gövdesi ve yatay kuyrukları için Z yönündeki ek su kütlesi katsayısının hesaplanması anlatılmaktadır.

$$Z_{\dot{w}}{}'_{Gövde} = \frac{k_2 m_{df}}{{}^1/_2 \rho l^3} \quad \textbf{(8.18)}$$

k_2 katsayısı Z yönündeki çizgisel ivmeli hareket için kullanılan bir katsayıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$k_2 = \frac{\beta_0}{2 - \beta_0} \quad \textbf{(8.19)}$$

β_0 ise aşağıdaki formül ile hesaplanır.

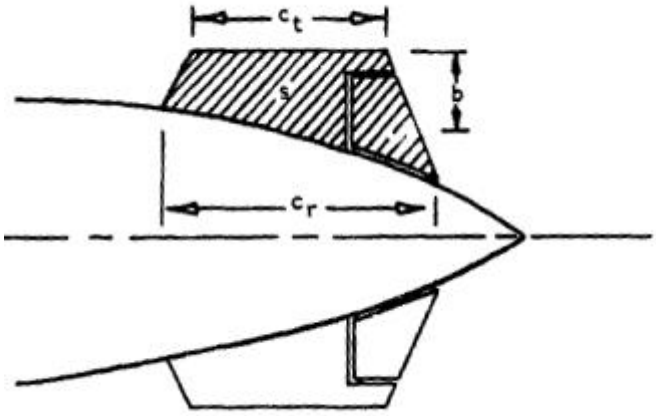
$$\beta_0 = \frac{1}{e^2} - \frac{1-e^2}{2e^3} ln\left(\frac{1+e}{1-e}\right) \quad \textbf{(8.20)}$$

Z yönündeki çizgisel ivmeli harekette dikey kuyrukların kesit alanı küçük olduğundan, Z yönündeki ek su katsayısı hesaplamalarında dikey kuyruklar dikkate alınmamaktadır. Ancak yatay kuyrukların etkisi hesaba katılmalıdır.

Su altı araçlarının sahip olduğu her bir yatay kuyruğun Z yönündeki ek su kütlesi katsayısına katkısı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Z_{\dot{w}}{}'_{Yatay\ Kuyruk} = \frac{1}{{}^1/_2 \rho l^3} \frac{k\pi\rho c^2 b}{2} = \frac{k\pi c^2 b}{l^3} \quad \textbf{(8.21)}$$

Yukarıdaki formülde $c = \frac{c_r + c_t}{2}$ ortalama veterin boyunu ifade etmektedir. Her bir yatay kuyruk için yazılan yukarıdaki formülde kullanılan c_y, c_r ve b parametrelerinin açıklamaları Şekil 8.3'de gösterilmiştir.



Şekil 8.3 : Yatay kuyruklar için tanımlanan parametrik ifadeler [37].

$Z_{\dot{w}}{}'_{Yatay\ Kuyruk}$ formülünde kullanılan k parametresinin ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$k = \frac{1}{\left(1+{}^1/_{AR}\right)^{1/2}} \quad \textbf{(8.22)}$$

Bu formülde kullanılan AR ifadesi yatay kuyruğun açıklık oranıdır $({}^{b^2}/_S)$. Sonuç olarak aracın Z eksenindeki hareketi sonucu oluşan ek su kütlesi katsayısı aşağıdaki

gibi şekillenir. Su altı araçlarında iki adet yatay kuyruk bulunduğundan, yatay kuyruk için hesaplanan ek su kütlesi ifadesi iki ile çarpılır [37].

$$Z_{\dot{w}}{}' = Z_{\dot{w}}{}'_{Gövde} + Z_{\dot{w}}{}'_{Yatay\ Kuyruklar} = \frac{k_2 m_{df}}{1/2 \rho l^3} + \frac{2k\pi c^2 b}{l^3} \qquad \textbf{(8.23)}$$

Yatay ve düşey kuyrukları aynı olan su altı araçlarının düşey eksende sahip olduğu $Z_{\dot{w}}{}'$ katsayısı ile aracın yatay eksende yapacağı doğrusal ivmelenme hareketi sonucunda oluşacak $Y_{\dot{v}}{}'$ katsayısı değerleri birbirine eşittir [37].

$$Z_{\dot{w}}{}' = Y_{\dot{v}}{}' \qquad \textbf{(8.24)}$$

Dolayısıyla $Y_{\dot{v}}{}'$ katsayısının hesaplanması ayrıca bir bölüm olarak anlatılmayacaktır.

8.2.2 Su altı araçları için ek su ataleti katsayılarının hesaplanması

Bölüm 4.4'de anlatılan, ek su matrisinin köşegeni üzerinde bulunan diagonel elemanlardan $M_{\dot{q}}$, $N_{\dot{r}}$ ve $K_{\dot{p}}$ ek su ataleti katsayılarının hesaplanışı bu bölümde anlatılacaktır.

8.2.2.1 $M_{\dot{q}}{}'$ ve $N_{\dot{r}}{}'$ Ek su ataleti katsayılarının hesaplanması

Bir su altı aracının açısal ivmeli bir yunuslama hareketi yapması sonucunda $M_{\dot{q}}{}'$ ek su ataleti katsayısı oluşmaktadır. Bu katsayının hesaplanmasında düşey hareket bileşenleri etkili olduğundan, gövdenin ve yatay kuyrukların etkisi hesaplamalara dâhil edilmelidir [37].

$$M_{\dot{q}}{}' = M_{\dot{q}}{}'_{Gövde} + M_{\dot{q}}{}'_{Yatay\ Kuyruklar} \qquad \textbf{(8.25)}$$

Gövdenin oluşturduğu ek su ataleti katsayısı, daha önceden tanımlanmış ek su kütlesi katsayılarının ($Z_{\dot{w}}{}'$) dâhil edilmesi ile aşağıda gibi elde edilir [37].

$$M_{\dot{q}}{}'_{Gövde} = \frac{-k'_b\, I_{y_{df}}}{1/2 \rho l^5} + Z_{\dot{w}}{}'_{Gövde} \frac{(X_{ncb} - X_{ncg})^2}{l^2} \qquad \textbf{(8.26)}$$

Yukarıdaki formülde kullanılan $I_{y_{df}}$ parametresi, gövde tarafından taşırılan suyun y eksenine göre atalet momenti, X_{ncb} parametresi su altı aracının hacim merkezinin burun noktasına olan X uzaklığını, X_{ncg} parametresi ise su altı aracının ağırlık merkezinin burun noktasına olan X uzaklığını ifade etmektedir. k'_b katsayısı ise aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmaktadır.

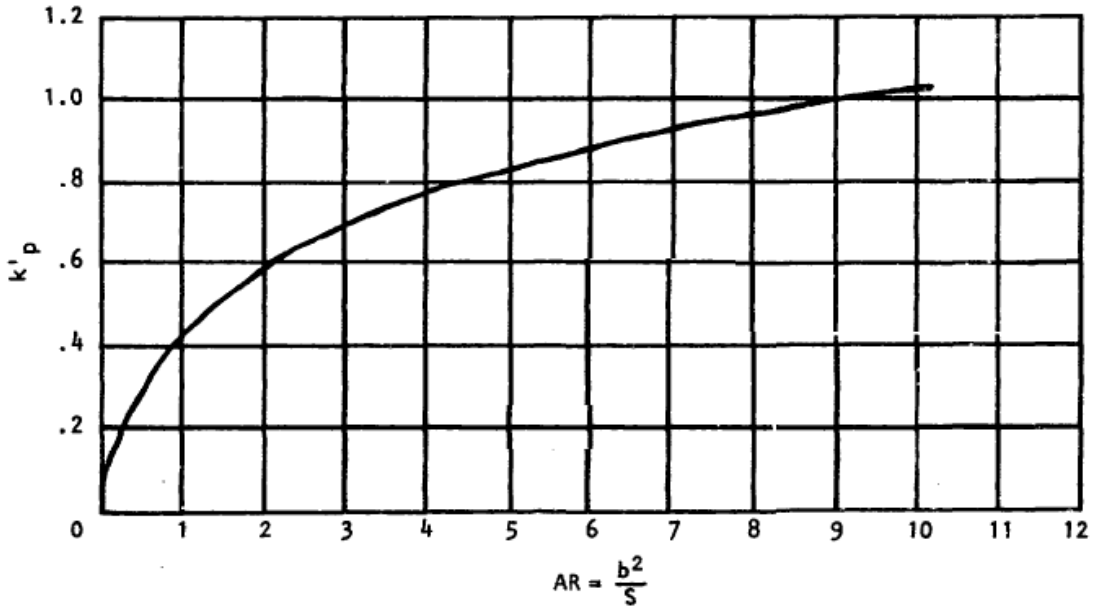
$$k'_b = \frac{e^4(\beta_0 - \alpha_0)}{(2-e^2)\{2e^2-(2-e^2)(\beta_0-\alpha_0)\}} \qquad \textbf{(8.27)}$$

Yukarıdaki formülde bulunan β_0 , e ve α_0 parametrelerinin açılımları ek su kütlesi katsayılarının hesaplanması bölümünde gösterilmiştir.

Açısal ivmeli yunuslama hareketi sırasında yatay kuyrukların oluşturduğu ek su ataleti katsayısı aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanabilir [37].

$$M_{\dot{q}}{}'_{Yatay\ Kuyruk} = -\frac{1}{1/_2\rho l^5}\frac{\left(k'_p \pi \rho b^2 c^{-3}\right)}{48} + Z_{\dot{w}}{}'_{Yatay\ Kuyruk}\frac{(X_{nht}-X_{ncg})^2}{l^2} \qquad \textbf{(8.28)}$$

Yukarıdaki formülde kullanılan X_{nht} parametresi, su altı aracının sahip olduğu yatay kuyruğun hacim merkezinin aracın burun noktasına olan X uzaklığını ifade etmektedir. Ayrıca yukarıdaki formülde geçem k'_p parametresi, düz plaka için ek su ataleti katsayısıdır. Şekil 8.4'te k'_p'ın açıklık oranı ile değişimi verilmiştir.



Şekil 8.4 : Düz plaka için $\boldsymbol{k'_p}$'ın açıklık oranı ile değişimi [37].

Görüldüğü gibi $M_{\dot{q}}{}'$ ek su kütlesi ataleti katsayısı, yatay kuyruklar ve gövde için ayrı ayrı tanımlanan ifadelerin toplamı sonucunda elde edilmektedir. Yukarıda yatay kuyruk için yazılan ek su kütlesi ifadesi tek bir yatay kuyruk için yazıldığından, o ifade iki ile çarpılarak aşağıdaki formülde yerine yazılır [37].

$$M_{\dot{q}}{}' = M_{\dot{q}}{}'_{Gövde} + M_{\dot{q}}{}'_{Yatay\ Kuyruklar} \qquad \textbf{(8.29)}$$

$$= \frac{-k'_b I_{y_{df}}}{1/2\rho l^5} + Z_{\dot{w}}{}'_{Gövde} \frac{(X_{ncb}-X_{ncg})^2}{l^2} -$$

$$2\left(\frac{1}{1/2\rho l^5}\frac{(k'_p \pi \rho b^2 c^{-3})}{48} - Z_{\dot{w}}{}'_{Yatay\ Kuyruk} \frac{(X_{nht}-X_{ncg})^2}{l^2}\right)$$

Yatay ve düşey kuyrukları aynı olan su altı araçları sapma açısal ivmesi ile hareket ettiğinde oluşan $N_{\dot{r}}{}'$ katsayısı ile yunuslama açısal ivmesi ile hareket ettiğinde oluşan $M_{\dot{q}}{}'$ katsayısı birbirine eşittir [37].

$$M_{\dot{q}}{}' = N_{\dot{r}}{}' \tag{8.30}$$

Dolayısıyla $N_{\dot{r}}{}'$ifadesinin hesaplamaması için ayrıca bir açıklama yapılmayacaktır.

8.2.2.2 $K_{\dot{p}}{}'$ Ek su ataleti katsayısının hesaplanması

Bir su altı aracının açısal ivmeli bir yuvarlanma hareketi yapması sonucunda $K_{\dot{p}}{}'$ ek su ataleti katsayısı oluşmaktadır. Su altı araçları sapma manevrası yaparlarken genelde yuvarlanma hareketi de yaparlar. Dolayısıyla yuvarlanma hareketinin kontrolü daha çok düşey kuyruklar ile sağlanabilir. Bu sebeple yuvarlanma hareketi ek su ataleti sönümleme katsayının hesaplanmasında gövde bölümünden gelen etkiler haricinde düşey kuyruklardan gelen etkiler de hesaplamalara dâhil edilmelidir [37].

$$K_{\dot{p}}{}' = K_{\dot{p}}{}'_{Gövde} + K_{\dot{p}}{}'_{Düşey\ Kuyruklar} \tag{8.31}$$

Gövdenin oluşturduğu ek su ataleti katsayısı, daha önceden tanımlanmış ek su kütlesi katsayılarının ($Z_{\dot{w}_b}{}' = Y_{\dot{v}_b}{}'$) hesaplamalara dâhil edilmesi ile aşağıda şekilde elde edilir.

$$K_{\dot{p}}{}'_{gövde} = Y_{\dot{v}}{}'_{gövde} \frac{Z_{cb}^2}{l^2} \tag{8.32}$$

Yukarıdaki formülde z_{cb} ifadesi, aracın ağırlık merkezi ile hacim merkezi aracındaki Z ekseni yönündeki uzaklığı ifade etmektedir. Açısal ivmeli yuvarlanma hareketi sırasında her bir düşey kuyruğun oluşturduğu ek su ataleti katsayısı aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanabilir [37].

$$K_{\dot{p}}{}'_{Düşey\ Kuyruk} = Y_{\dot{v}}{}'_{Düşey\ Kuyruk} \frac{Z_{uct}^2}{l^2} \tag{8.33}$$

Yukarıdaki formülde kullanılan $Y_{\dot{v}}{}'_{Düşey\ Kuyruk}$ ifadesi yerine, daha önceden hesaplanma tekniği anlatılan $Z_{\dot{w}}{}'_{Yatay\ Kuyruk}$ kullanılabilir. Ayrıca düşey kuyruk formülünde kullanılan Z_{uct} ifadesi ise, su altı aracına ait bir düşey kuyruğun hacim merkezinin aracın ağırlık merkezine olan düşey uzaklığı ifade etmektedir.

Sonuç olarak aracın yuvarlanma hareketi yaptığında oluşan ek su ataleti katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanır. Su altı araçlarında iki adet düşey kuyruk bulunduğundan, düşey kuyruk için hesaplanan ek su kütlesi ifadesi iki ile çarpılır ve aşağıdaki yuvarlanma ek su ataleti katsayısı için genel formül türetilmiş olur [37].

$$K_{\dot{p}}{}' = K_{\dot{p}}{}'_{Gövde} + K_{\dot{p}}{}'_{Düşey\ Kuyruklar} = Y_{\dot{v}_b}{}' \frac{Z_{cb}^2}{l^2} + 2\, Y_{\dot{v}}{}'_{Düşey\ Kuyruk} \frac{Z_{uct}^2}{l^2} \quad \textbf{(8.34)}$$

Görüldüğü üzere bu bölümde, bir su altı aracının altı serbestlik derecesinde yaptığı ivmeli hareket sonucunda oluşan ek su kütlesi ve ataleti katsayılarının hesaplanması için ampirik formüller oluşturulmuştur. Bu sayede su altı araçları üzerinde oluşan ek su kütlesi ve ataleti sönümleme katsayıları deneysel ve hesaplamalı yöntemler haricinde, ampirik tabanlı formüller kullanılarak hesaplanabilecektir. Ek su kütlesi ve ataleti katsayıları aracın sahip olduğu seyir koşullarından bağımsız olduğu ve sadece aracın geometrik özellikleri ile değiştiği için, yukarıda geometrik parametrelere bağlı olarak geliştirilen ampirik formüller ile yüksek güvenilirlik seviyesi ile bu projede kullanılacaktır.

9. AUTOSUB OTONOM SU ALTI ARACININ HİDRODİNAMİK VERİ TABANININ HAZIRLANMASI

Bu çalışmada Autosub otonom su altı aracının farklı seyir koşullarında altı serbestlik dereceli hidrodinamik veri tabanı oluşturulmuş ve Autosub'ın bu veri tabanındaki seyir koşullarında üzerinde oluşan hidrodinamik kuvvetler (X, Y, Z) ve momentler (L, M, N) incelenmiştir. Oluşturulan veri tabanı statik ve dinamik hidrodinamik veri tabanı olarak iki alt kategoride incelenecektir. Statik veri tabanı, aracın farklı hücum açılarında (α, β), farklı kontrol yüzeyi sapma açılarında (δ_e, δ_r) ve farklı seyir hızlarında (V) yunuslama ve sapma düzlemlerindeki seyir koşulları için oluşturulmuştur. Dinamik hidrodinamik veri tabanı ise, aracın belirli dönme yarıçapları ile dönerken farklı yunuslama (q), sapma(r) ve yuvarlanma (p) açısal hızlarına sahip olduğu seyir koşullarını barındırmaktadır. Bu kapsamda statik veri tabanı için toplamda 810 seyir koşulunda, dinamik veri tabanı için ise toplamda 32 seyir koşulunda hidrodinamik veri üretilmiştir. Aşağıdaki bölümlerde üretilen bu hidrodinamik veriler detaylı bir şekilde incelenecektir.

9.1 Statik Hidrodinamik Veri Tabanının Hazırlanması ve Sonuçların İncelenmesi

Autosub statik hidrodinamik veri tabanının hazırlanması için Bölüm 7.1'de geliştirilen statik HAD analiz yöntemleri kullanılmıştır. Bu analiz yöntemlerinde Autosub aracının sonsuz büyüklükte bir akışkan hacmi içinde zamandan bağımsız bir şekilde doğrusal hareket ettiği varsayılmıştır, aracın rotasyonel hareketlerini içeren seyir koşullarındaki HAD analiz sonuçları bir sonraki bölümde incelenecektir. Akışkan hacminin oluşturulması ve analiz modelinin kurulması ile ilgili detaylar, Bölüm 7.1'de Darpa ve Autosub modelleri üzerine yapılan denek taşı çalışmalarında anlatılmıştır. Bu bölümde, doğrulanan HAD analiz yöntemleri kullanılarak Autosub su altı aracının statik hidrodinamik veri tabanı oluşturulacak ve elde edilen sonuçlar incelenecektir.

Statik hidrodinamik veri tabanı, Autosub'ın farklı seyir hızlarında, farklı hücum açılarında ve farklı kontrol yüzeyi sapma açılarında yunuslama ve sapma düzlemlerinde sahip olduğu seyir koşullarında oluşturulmuştur. Autosub aracının gövdesinin eksenel simetrik ve kontrol yüzeylerinin de her birinin aynı olması sebebi ile yunuslama düzleminde hesaplanan hidrodinamik kuvvet ve moment değerleri sapma düzlemi için de kullanılmıştır. Statik hidrodinamik veri tabanının oluşturulması için toplamda 225 farklı seyir koşulunda HAD analizi yapılmıştır. Autosub aracının geometrisinin düşey ve yatay eksenlerdeki simetrikliğinden faydalanılarak toplamda 810 farklı seyir koşulu için hidrodinamik veri üretilmiştir. Kontrol yüzeyleri sapmasının yön tayini için; yunuslama düzleminde negatif yunuslama momenti (M) oluşturan yatay kontrol yüzeyi sapma açısı (δ_e) pozitif, sapma düzleminde pozitif sapma momenti (N) oluşturan düşey kontrol yüzeyi sapma açısı (δ_r) pozitif kabul edilmiştir. Ayrıca, farklı seyir koşullarında arasın seyir yaptığı hücum açılarının yön tayini için ise, pozitif yunuslama momenti oluşturan hücum açısı (α) pozitif, negatif sapma momenti oluşturan sapma açısı (β) pozitif kabul edilmiştir. İncelenen bütün değerlerdeki işaret notasyonları Bölüm 3.1'de tanımlanan eksen takımı ile uyumludur. Analiz yapılan seyir koşulları Çizelge 9.1'de, hesaplanan hidrodinamik parametreler ve bunların bağlı olduğu değerler Çizelge 9.2'de verilmiştir.

Çizelge 9.1 : Statik hidrodinamik veri tabanı analiz noktaları.

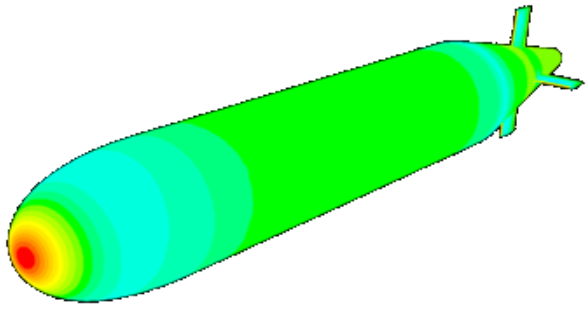
Seyir Hızı (V_∞)	[5knot, 10knot, 15knot, 20knot, 25knot]
Hücum Açısı (α)	[-10°, -7°, -5°, -2°, 0°, 2°, 5°, 7°, 10°]
Sapma Açısı (β)	[-10°, -7°, -5°, -2°, 0°, 2°, 5°, 7°, 10°]
Yatay Kontrol Yüzeyi Sapma Açısı (δ_e)	[-20°, -15°, -10°, -5°, 0°, 5°, 10°, 15°, 20°]
Düşey Kontrol Yüzeyi Sapma Açısı (δ_r)	[-20°, -15°, -10°, -5°, 0°, 5°, 10°, 15°, 20°]

Çizelge 9.2 : Statik hidrodinamik veri tabanında hesaplanan hidrodinamik parametreler.

Hidrodinamik Parametreler	Açıklamaları	Bağlı Olduğu Değerler
X	Eksenel Kuvvet	$V_\infty, \alpha, \beta, \delta_e, \delta_r$
Y	Yanal Kuvvet	$V_\infty, \beta, \delta_r$
Z	Düşey Öteleme Kuvveti	$V_\infty, \alpha, \delta_e$
M	Yunuslama Momenti	$V_\infty, \alpha, \delta_e$
N	Sapma Momenti	$V_\infty, \beta, \delta_r$

Yapılan hidrodinamik analizlerde pervane modeli kullanılmamıştır. Dolayısıyla Autosub'ın üzerinde, hareket ettiği düzlemin içinde kuvvet ve momentler oluşmuştur. Autosub'ın hareket etmediği düzlemlerdeki kuvvet ve momentlerin araca etkisi olmamıştır. Örneğin, yunuslama düzleminde belirli bir hücum açısı ve yatay kontrol yüzeyi sapma açısı ile hareket eden aracın üzerinde yanal kuvvet (Y) ve sapma momenti (N) oluşmayacaktır. Aynı şekilde, yapılan analizler pervanesiz olduğundan ve statik hidrodinamik analizlerde yuvarlanma açısal hızı tanımlanmadığından aracın üzerinde yuvarlanma momenti (K) oluşmamaktadır.

Bu projede yapılan hidrodinamik analizlerde yerçekimi etkileri dikkate alınmamıştır. Modelin sonsuz büyük bir akış hacminde hareket ettiği varsayılmış ve hesaplamalar olası blokaj etkilerinden arındırılmıştır. Yapılan statik hidrodinamik analizlerde Çizelge 9.1'de belirtilen seyir koşullarında eksenel kuvvet (X), yanal kuvvet (Y), düşey öteleme kuvveti (Z), yunuslama momenti (M) ve sapma momenti (N) değerleri hesaplanmıştır. Yapılan tüm hesaplamalarda deniz suyunun yoğunluğu 1020 (kg/m^3) ve deniz suyunun dinamik viskozitesi 0,00141 (kg/m.s) kullanılmıştır. Şekil 9.1'de hidrodinamik bir analiz sonucunda elde edilen çözüme ait hidrodinamik yük dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 9.1 : Autosub otonom su altı aracı hidrodinamik yük dağılımı

Yukarıda anlatılan özellikler kapsamında aşağıda, statik hidrodinamik analizler sonucunda elde edilen kuvvet ve moment değerlerinin farklı seyir koşulları için değişimi incelenecektir.

9.1.1 Eksenel kuvvet sonuçlarının incelenmesi

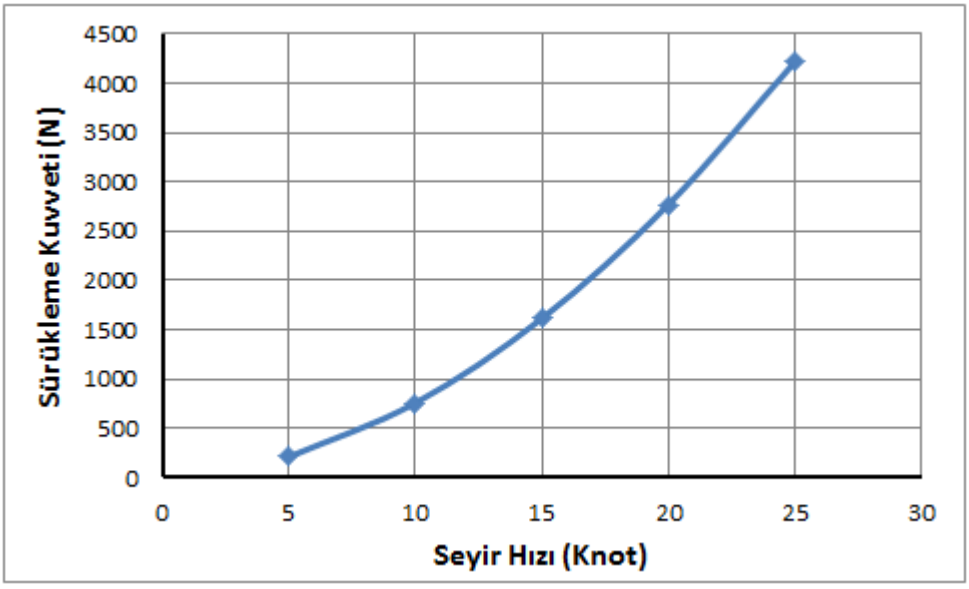
Bu bölümde, yapılan statik hidrodinamik analizler sonucunda Autosub su altı aracı üzerinde oluşan eksenel kuvvetlerin (X) Çizelge 9.1'de verilen hücum açılarında, kontrol yüzeyi sapma açılarında ve seyir hızlarında değişimi incelenecektir. Eksenel

kuvvetin hangi parametrelere bağlı olduğu Çizelge 9.2'de gösterilmiştir. Aracın sıfır hücum açısında ve kontrol yüzeyi sapma açısında sahip olduğu negatif X kuvveti aracın sahip olduğu sürükleme kuvvetini vermektedir. Aracın sahip olduğu sürükleme katsayısının, Reynolds sayısı ile değişimi aracın içinde bulunduğu akış rejiminin incelenmesi açısından önemlidir. Bu bölümde öncelikle farklı hız kademelerinde seyir yapan aracın sürükleme kuvvetinin değişimi ve Reynolds sayısının sürükleme kuvveti katsayısı ile değişimi incelenecektir. Dolayısıyla aşağıda Çizelge 9.3'de aracın farlı hızlarda sahip olduğu sürükleme kuvveti ve Reynolds sayısı değerleri verilmiştir.

Çizelge 9.3 : Farklı seyir hızlarında oluşan sürükleme kuvvetleri ve Reynolds sayıları

Hız (Knot)	Sürükleme Kuvveti (N)	Sürükleme Katsayısı (Cd)	Re
5	212,56	0,001286	1,303E+07
10	758,57	0,001147	2,605E+07
15	1615,15	0,001085	3,908E+07
20	2768,62	0,001047	5,210E+07
25	4216,23	0,001020	6,513E+07

Farklı seyir hızlarında oluşan sürükleme kuvveti dağılımını incelediğimizde aşağıdaki gibi bir grafik elde ederiz.



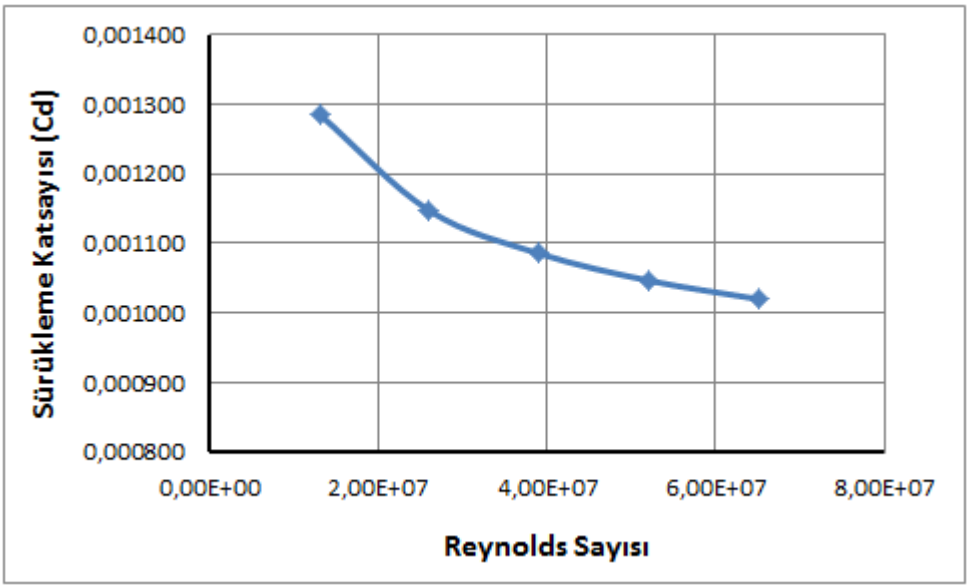
Şekil 9.2 : Autosub aracının farklı hızlarda sahip olduğu sürükleme kuvveti değerleri

Yukarıdaki grafikten görüldüğü üzere, Autosub aracının sürükleme kuvvetinin farklı hız kademelerine göre artış grafiği ikindi dereceden bir polinom eğrisi şeklindedir.

Bu durum aracın hızının artmasıyla sahip olduğu sürükleme kuvvetinin, hızın karesi ile orantılı olarak artacağını göstermektedir. Dolayısıyla yüksek hızlarda araca etkiyen sürükleme kuvveti ciddi şekilde artabilmektedir. Aracın üzerinde oluşan sürükleme kuvvetinin içeriği incelendiğinde, viskoz kuvvetlerin basınç kuvvetlerine göre çok daha baskın olduğu görülmektedir. Aracın ıslak yüzey alanı oldukça fazla olduğundan ve su ortamının viskoz özelliklerinden dolayı aracın üzerinde oluşan sürükleme kuvvetinin yaklaşık %75'i viskoz kuvvetlerden geri kalanı ise basınç kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır.

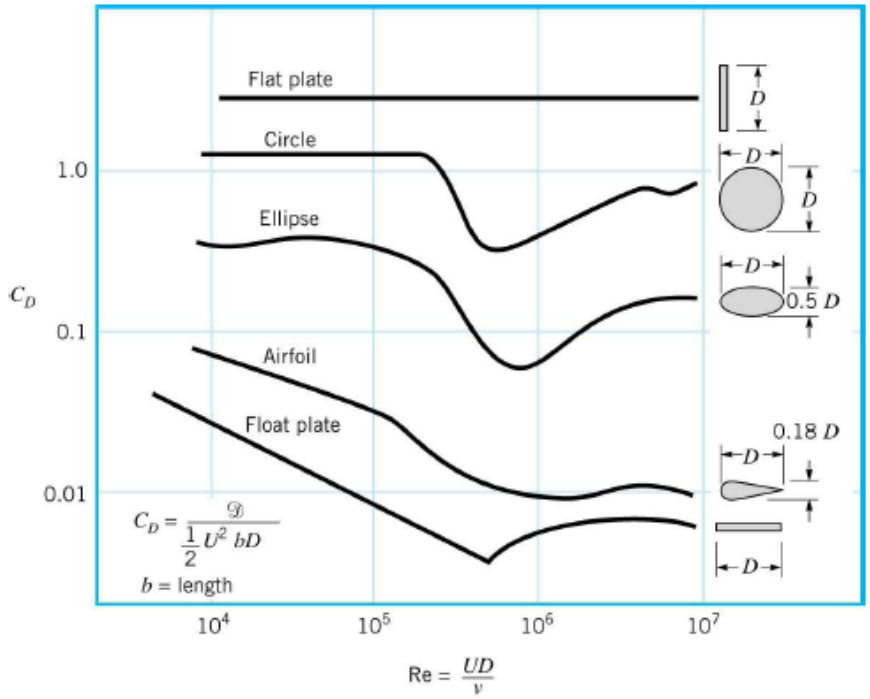
Elde edilen bu grafikten eksenel kuvvetin X yönündeki seyir hızı (u) ile değişimi incelenebildiğinden, X kuvvetinin u hızı ile değişiminin birinci ve ikinci türevlerinden oluşan katsayılar (X_u, X_{uu}) hesaplanabilir.

Ayrıca aracın içinde hareket ettiği akış rejimini inceleyebilmek için sahip olduğu Reynolds sayısının, sürükleme kuvveti katsayısı ile değişimi incelenmelidir.



Şekil 9.3 : Autosub aracının C_d – Reynolds sayısı grafiği

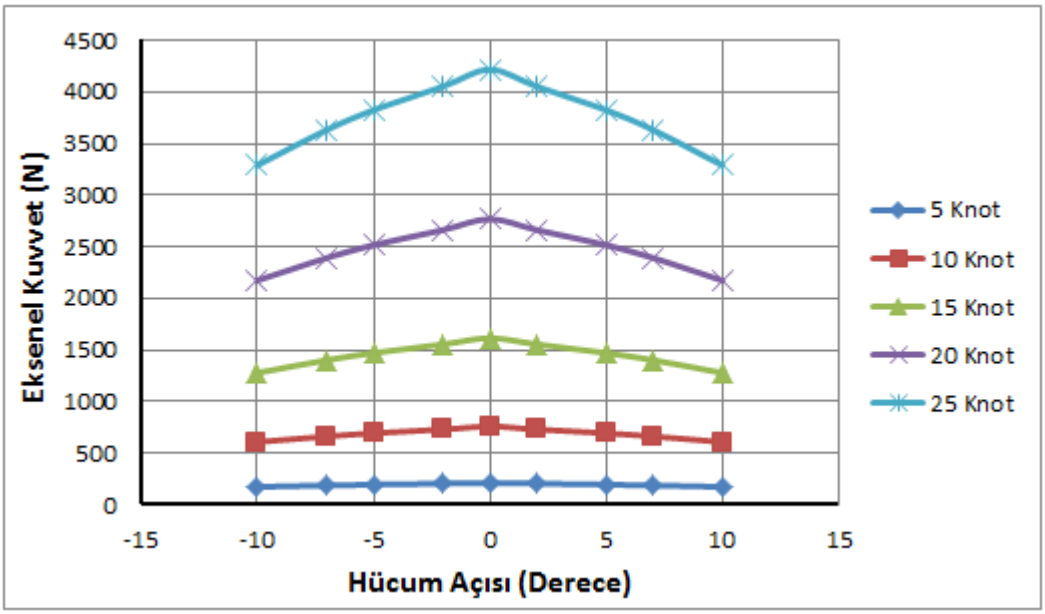
Yukarıdaki grafik sürükleme katsayısının Reynolds sayısı ile orantılı olarak değiştiğini ve olağan dışı bir değişim olmadığını göstermektedir. Bu durum aracın sahip olduğu Reynolds sayısı değerlerinin kritik Reynolds sayısı değerinin uzağında olmasından kaynaklanmaktadır. Aşağıda temel geometrik cisimler için Reynolds sayısının sürükleme katsayıları ile değişimi ve kritik Reynolds sayısı değerleri gösterilmektedir.



Şekil 9.4 : Temel geometrik cisimler için $C_d -$ Reynolds değişimi [38].

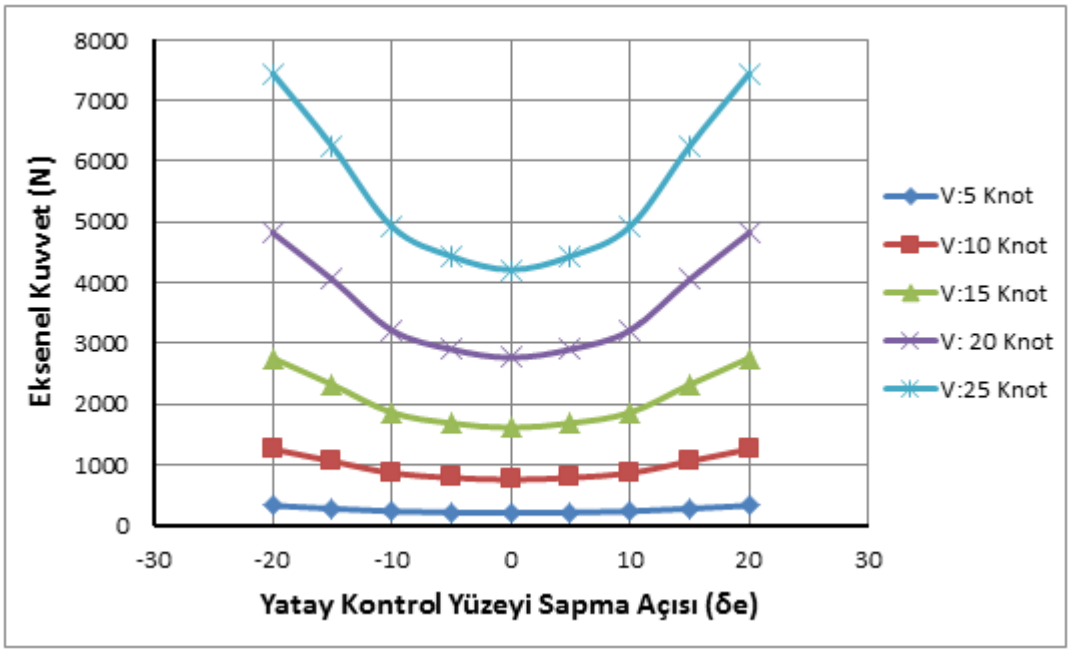
Yukarıdaki grafik incelendiğinde, kritik Reynolds sayısının (Re_{Kritik}) farklı geometrik cisimler için 10^6 civarında olduğu ve bu değerin uzağında kalan bölgelerde düzenli bir değişimin olduğu görülmektedir. Autosub su altı aracı Reynolds sayısının 10^7 mertebelerinde olduğu akış rejiminde seyir yaptığından, aracın sahip olduğu akış karakteristiğinin hızın artması ile beraber olağan değişeceği ve beklenmeyen bir türbülans durumunun oluşmayacağı beklenmektedir [39].

Autosub aracın üzerinde oluşan sürükleme kuvveti değişim incelendikten sonra, aracın sahip olduğu eksenel kuvvet değerlerinin farklı seyir koşullarındaki değişimi incelenebilir. Öncelikle eksenel kuvvetin hücum açısı ve kontrol yüzeyi sapma açısı ile değişimleri farklı hız kademelerinde incelenecektir. Aşağıdaki grafikte sıfır derece kontrol sapma açısı ile hareket eden aracın üzerinde oluşan eksenel kuvvet değerinin hücum açısı ile değişimi farklı hız kademeleri için verilmiştir. Grafiklerin daha kolay anlaşılabilmesi için eksenel kuvvet değerleri grafiklerde mutlak değer olarak verilmiştir. Şekil 9.5'teki grafikten görüleceği üzere eksenel kuvvet değeri hücum açısının artışı ile giderek azalmaktadır. Eksenel kuvvetin azalma miktarı düşük hızlarda çok az miktarda olurken, yüksek hızlarda ciddi değişimler yaratmaktadır. Eksenel kuvvet hücum açısı ile doğrusal olarak değişmektedir.



Şekil 9.5 : Eksenel kuvvetin farklı hız kademelerinde hücum açısı ile değişimi ($\boldsymbol{\delta_e = 0}$).

Dolayısı ile elde edilen grafiklerin eğimleri boyutsuzlaştırılarak hidrodinamik katsayılar hesaplanabilir. Elde edilen bu grafikten eksenel kuvvetin hücum açısı ile dolayısı ile düşey öteleme hızı (w) ile değişimi incelenebildiğinden, X kuvvetinin w hızı ile değişiminin birinci ve ikinci türevlerinden oluşan katsayılar (X_w, X_{ww}) hesaplanabilir. Eksenel kuvvetin (X) yatay kontrol yüzeyi sapma açısı (δ_e) ile değişimi farklı hız kademelerinde incelendiğinde ise aşağıdaki gibi bir grafik elde edilir.



Şekil 9.6 : Eksenel kuvvetin farklı hız kademeleri için $\boldsymbol{\delta_e}$ ile değişimi (α=0).

Grafikte gösterildiği gibi aracın eksenel kuvveti kontrol yüzeyi sapmasının artması ile artmaktadır. Aracın herhangi bir seyir koşulunda kontrol yüzeylerini saptırdığında, X ekseni yönünde akışın karşılaştığı yüzey kesit alanı artmaktadır. Dolayısı ile daha fazla basınç kuvveti oluşacağından karşılaşılan sürükleme kuvveti artmaktadır.

Autosub su altı aracı düşey ve yatay eksenlerde simetrik geometriye sahip olduğundan, suyun kaldırma kuvveti ve yerçekimi etkilerinin ihmal edildiği durumda, benzer seyir koşulları için benzer davranışlar sergilemesi beklenmektedir. Bu durum sebebi ile yunuslama ve sapma düzlemlerindeki aynı hücum açıları için aracın üzerinde oluşacak eksenel kuvvetlerin aynı olması beklenmektedir. Dolayısı ile X kuvvetinin *w* ve *v* doğrusal hızlarına göre türevlerinin eşit olması beklenir [17].

$$X_{ww} = X_{vv} \tag{9.1}$$

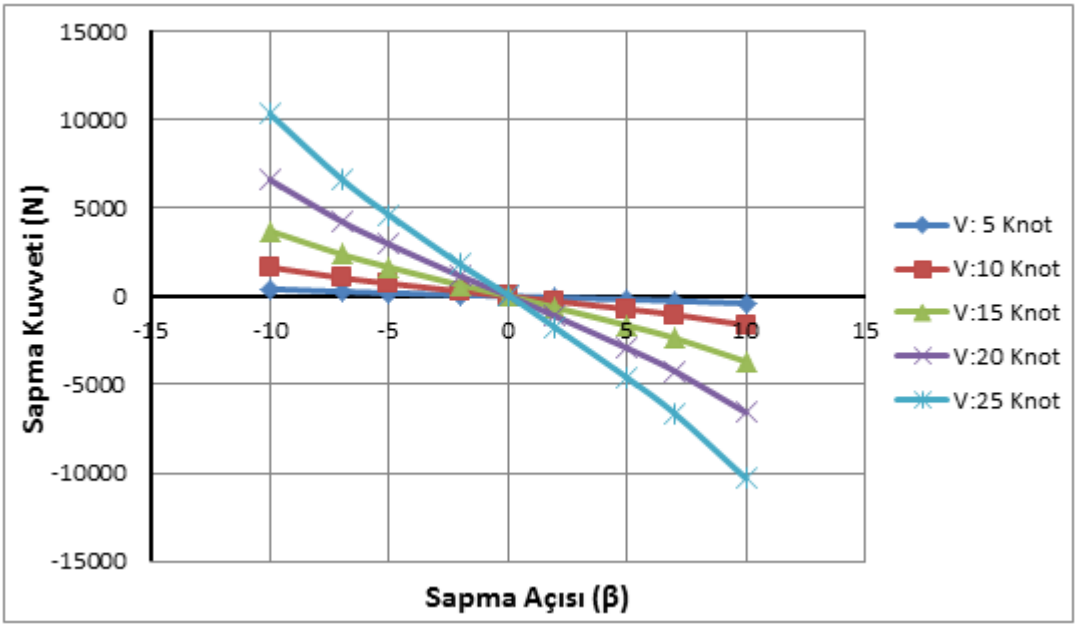
Benzer bir durum yatay ve düşey kontrol yüzeyleri için de geçerlidir.

$$X_{\delta e \delta e} = X_{\delta r \delta r} \tag{9.2}$$

Bu durum sebebi ile eksenel kuvvetin (X) sapma açısı (β) ve düşey kontrol yüzeyleri(δ_r) ile değişimleri, yunuslama düzleminde X kuvvetinin α ve δ_e için değişimleri ile aynı olacağından, sapma düzlemindeki eksenel kuvveti değişim bu bölümde tekrardan incelenmemiştir.

9.1.2 Yanal kuvvet sonuçlarının incelenmesi

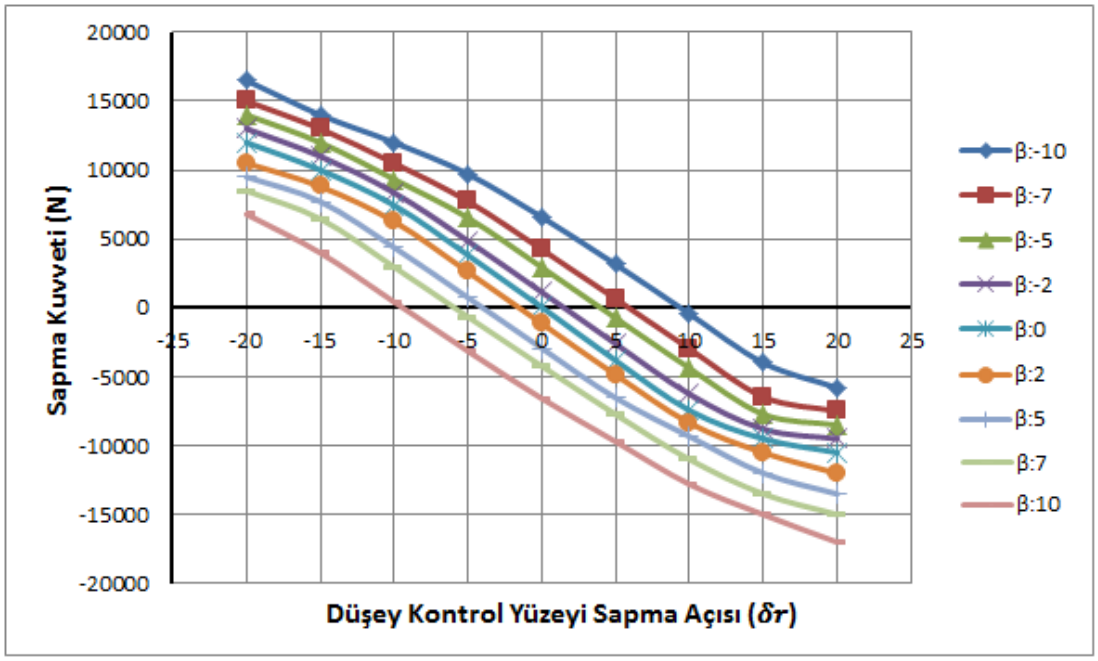
Bu bölümde, yapılan statik hidrodinamik analizler sonucunda Autosub su altı aracı üzerinde oluşan yanal kuvvetlerinin (Y) Çizelge. 9.1'de verilen hücum açılarında, kontrol yüzeyi sapma açılarında ve seyir hızlarında değişimi incelenecektir. Yanal kuvveti hangi parametrelere bağlı olarak değişebileceği Çizelge 9.2'de gösterilmiştir. Autosub sapma düzlemine bir manevra yaparken karşılaşabileceği sapma açısı ve sahip olması gereken düşey kontrol yüzey sapma açılarında maruz kalacağı yanal kuvvetler bu bölümde incelenecektir. Yanal kuvvet oluşmasını sağlayan en temel parametre aracın sapma açısıdır (β). Sapma açısı arttıkça sapma kuvvetinin de artması beklenmektedir. Aşağıdaki grafikte sıfır derece düşey kontrol yüzeyi sapma açısına sahip aracın farklı hızlarda seyirleri esnasında sapma açısının neden olduğu sapma kuvvetleri incelenmiştir.



Şekil 9.7 : Sapma kuvvetinin farklı hız kademelerinde sapma açısı ile değişimi ($\boldsymbol{\delta_r = 0}$).

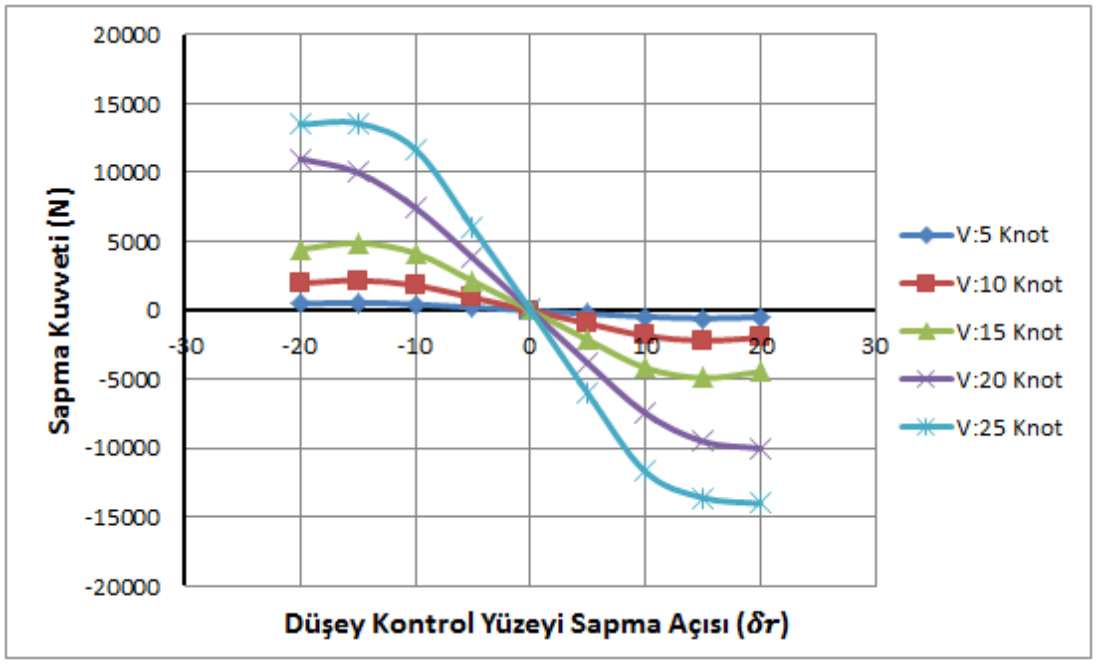
Şekil 9.7'deki grafikten görüldüğü üzere, sapma kuvvetinin sapma açısı ile değişimi doğrusal bir rejime sahiptir. Bu değişimin eğimi düşük hızlarda küçük iken, yüksek hızlarda değişimin eğimi de artmaktadır. Bölüm 3.1'de verilen eksen takımına göre bu araç, pozitif sapma açısında negatif sapma kuvveti oluşturmaktadır. Sapma hareketi sırasında, sapma açısından dolayı bir sapma hızı (v) oluşmaktadır. Yukarıdaki grafikteki sapma kuvvetinin birim sapma açısına göre değişimi değeri kullanılarak aracın sahip olduğu Y_v ve $Y_{v|v|}$ katsayıları hesaplanabilir. Grafikteki doğruların eğimleri her bir sapma açısı ile değişen sapma kuvvetinin miktarını vermektedir. Bu değerler Bölüm 4.3'te anlatıldığı gibi boyutsuzlaştırılırsa istenilen katsayılar elde edilir.

Ayrıca bu bölümde farklı kontrol yüzeyi sapma açılarında oluşan sapma kuvvetleri, farklı sapma açılarında incelenirse, aracın sapma manevrası yaparken sahip olduğu denge koşulları hesaplanabilir. 20 Knot seyir hızında sapma manevrası yapan bir aracın, manevra konfigürasyonları ve manevra sırasında sahip olacağı denge koşulları aşağıda verilmiştir. Şekil 9.8'deki grafikten görülebileceği üzere, aracın bazı sapma açısı ve düşey kontrol yüzeyi sapma açısı konfigürasyonlarında aracın üzerinde oluşan sapma kuvveti değerleri sıfır olmaktadır. Bu noktalar aracın sapma manevrası yaparken sahip olduğu denge koşullarıdır.



Şekil 9.8 : Sapma kuvvetinin farklı sapma açılarında $\boldsymbol{\delta_r}$ ile değişimi (V= 20 Knot).

Denge koşullarında, kontrol yüzeyi sapma açılarının ve hücum açılarının geometri üzerinde oluşmasına sebep oldukları kuvvetler yönünden ters yönde çalışmakta ve aracı belirli bir denge koşulunda tutarak ivmesiz bir dönüş hareketi yapmasını sağlamaktadırlar. Denge koşulundan incelediğimiz düşey kontrol yüzeyi sapma açısının sapma kuvvetine göre değişim grafiği de bizim için önemlidir. Bu sebeple aşağıda, farklı hızlar için sapma kuvvetinin δ_r'ye göre değişimi verilmiştir.



Şekil 9.9 : Sapma kuvvetinin farklı seyir hızlarında $\boldsymbol{\delta_r}$ ile değişimi ($\boldsymbol{\beta = 0}$).

Görüldüğü gibi düşey sapma açısının da sapma kuvveti ile değişimi küçük kontrol yüzeyi sapma açıları için doğrusal bir rejime sahiptir. Bu durum kontrol yüzeyi sapma açılarının istenilen değerleri için interpolasyon veya ekstrapolasyon yapılabilmesi ve o açıda karşılaşılabilecek sapma kuvvetinin tahmin edilebilmesi olanağı tanır.

Daha önce bahsedildiği gibi, aracın sapma ve yunuslama düzlemleri birbirleri ile simetrik olduğundan bu iki farklı düzlemde yapılan hareketlere karşı aracın maruz kaldığı kuvvet ve momentler aynı olacaktır. Dolayısıyla bu bölümde incelenen sapma kuvvetinin (N) sapma açısı (β) ve düşey kontrol yüzeyi sapma açısı (δ_r) ile değişimleri kullanılarak, aracın yunuslama düzleminde karşılaşacağı düşey öteleme kuvvetinin (Z) farklı hücum açıları (α) ve yatay kontrol yüzeyi sapma açıları (δ_e) ile değişimleri hakkında yaklaşım yapılabilir. Bu yaklaşımlar yapılarak aşağıdaki katsayı eşitliklerine varılabilir [17].

$$Y_v = Z_w \quad \textbf{(9.3)}$$

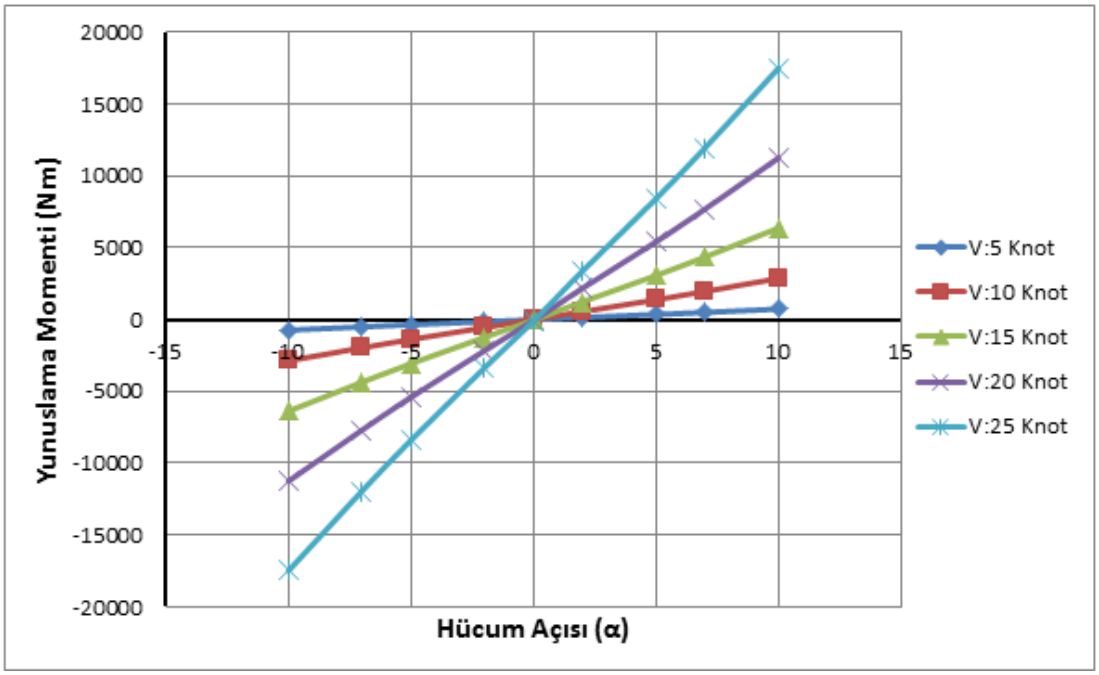
$$Y_{v|v|} = Z_{w|w|} \quad \textbf{(9.4)}$$

$$Y_{\delta r} = Z_{\delta e} \quad \textbf{(9.5)}$$

Bu simetrik özelliklerden ötürü düşey öteleme kuvvetinin farklı hücum açıları ve yatay kontrol yüzeyi sapma açıları ile değişimi incelenmemiştir.

9.1.3 Yunuslama momenti sonuçlarının incelenmesi

Bu bölümde, yapılan statik hidrodinamik analizler sonucunda Autosub su altı aracı üzerinde oluşan yunuslama momentlerinin (M) Çizelge 9.1'de verilen hücum açılarında, yatay kontrol yüzeyi sapma açılarında ve seyir hızlarında değişimi incelenecektir. Yunuslama momentlerinin hangi parametrelere bağlı olarak değişebileceği Çizelge 9.2'de gösterilmiştir. Autosub yunuslama düzlemi içinde bir manevra yaparken karşılaşabileceği hücum açısı ve sahip olması gereken yatay kontrol yüzey sapma açılarında maruz kalacağı yunuslama momentleri bu bölümde incelenecektir. Yunuslama momenti oluşmasını sağlayan en temel parametreler aracın hücum açısı (α) ve yatay kontrol yüzey sapma açısı (δ_e) değişimleridir. Hücum açısı ve δ_e birbirlerinden bağımsız bir şekilde arttıklarında aracın yunuslama düzleminde bir manevra yapması ve yunuslama momentinin de artması beklenmektedir. Aşağıdaki grafikte farklı seyir hızları için hücum açısının neden olduğu yunuslama momenti değişimleri incelenmiştir.

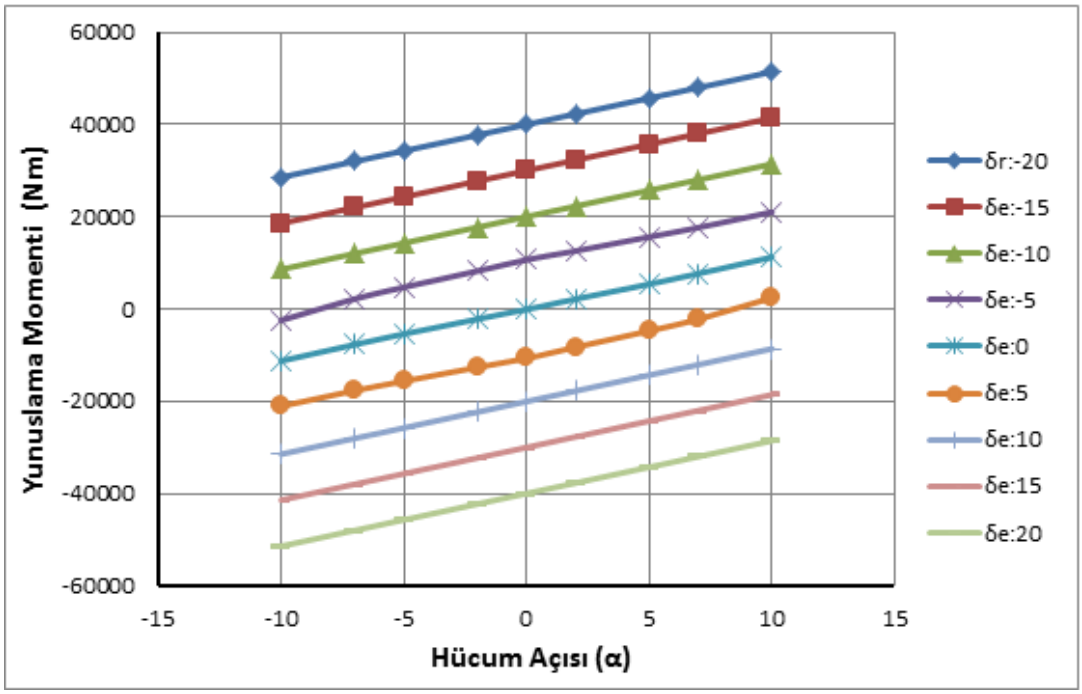


Şekil 9.10 : Yunuslama momentinin farklı seyir hızlarında hücum açısı ile değişimi ($\boldsymbol{\delta_e = 0}$).

Şekil 9.10'daki Yunuslama momentinin hücum açısına göre değişim grafiği incelendiğinde, değişimin oldukça düzenli olduğu görülmektedir. Autosub'ın yunuslama momenti hücum açısı arttıkça artmaktadır. Bu bilgi ileriki bölümlerde aracın statik stabilitesinin incelenmesinde kullanılacaktır. Farklı hız kademelerinde grafiğin artış rejiminde bir değişiklik olmamıştır. Hücum açısının var olduğu seyir koşullarında aracın üzerinde w doğrusal hızı bileşeni oluşmaktadır. Yukarıdaki grafikteki değişimin eğimi boyutsuzlaştırıldığında aracın $M_w, M_{|w|}, M_{ww}$ ve $M_{w|w|}$ hidrodinamik katsayıları hesaplanabilir.

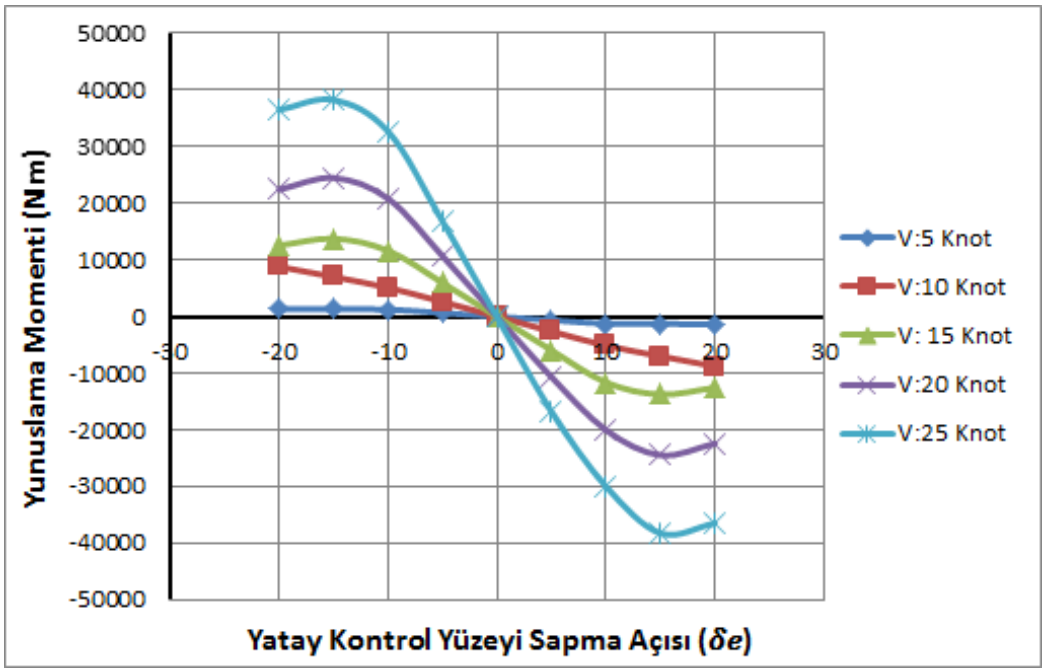
Aracın hücum açısının ve yatay kontrol yüzeyi sapma açısının aynı anda değiştiği koşullar incelendiğinde, aracın yunuslama manevrası yaparken denge durumuna ulaştığı seyir koşulları belirlenebilir. Aşağıda hücum açısındaki değişimin yunuslama momenti üzerinde oluşturacağı değişiklik farklı kontrol yüzeyi sapma açılarında incelenmiştir.

Şekil 9.11'deki grafikte yunuslama momentinin sıfır olduğu durumlar, aracın yunuslama momenti yaparken sahip olduğu denge koşullarıdır. Manevralar sırasında sağlanan bu denge koşulları aracın dinamik stabilitesinin incelenmesi açısından önem taşımaktadır.



Şekil 9.11 : Yunuslama momentinin farklı kontrol yüzeyi sapma açılarında hücum açısı ile değişimi (V= 20 Knot).

Ayrıca aracın yatay kontrol yüzeyi sapmasının da yunuslama momentine etkisi incelenmelidir. Aşağıda farklı hız kademelerinde, yunuslama momentinin yatay kontrol yüzeyi sapma açıları ile değişimi incelenmiştir.



Şekil 9.12 : Yunuslama momentinin farklı hızlarda kontrol yüzeyi sapma açısı ile değişimi ($\boldsymbol{\alpha = 0}$).

Görüldüğü gibi yunuslama momentinin yatay kontrol yüzeyi sapma açısı ile değişimi doğrusal bir rejime sahiptir. Bu durum kontrol yüzeyi sapma açılarının istenilen değerleri için interpolasyon veya ekstrapolasyon yapılabilmesi ve istenilen açıda karşılaşılabilecek yunuslama momenti değerinin tahmin edilebilmesi olanağı tanır. Bu grafikteki değişimi incelendiğinde, değişimin eğimi boyutsuzlaştırılarak aracın $M_{\delta e}$ katsayısı hesaplanabilir.

Aracın geometrisi düşey ve yatay eksenler için simetrik olduğundan, yunuslama düzlemi için hesaplanan katsayılar sapma düzlemi için de kullanılabilir. Ancak dönüşüm yapılırken Bölüm 3.1'de verilen eksen takımı dikkate alınmalı ve işaret hatası yapılmamalıdır. Bu yaklaşımı kullanarak aşağıdaki eşitlikleri yazabiliriz [17].

$$M_w = -N_v \quad \textbf{(9.6)}$$

$$M_{|w|} = N_{|v|} \quad \textbf{(9.7)}$$

$$M_{ww} = N_{vv} \quad \textbf{(9.8)}$$

$$M_{w|w|} = -N_{v|v|} \quad \textbf{(9.9)}$$

$$M_{\delta e} = N_{\delta r} \quad \textbf{(9.10)}$$

Autosub'ın yunuslama momenti ile ilgili verileri kullanılarak, sapma momenti değerlerinin değişimi ile ilgili yaklaşımlar yapılabildiğinden sapma momenti değerlerinin değişimi ayrıca bir alt bölüm olarak incelenmeyecektir.

Bu bölümde Autosub'ın statik hidrodinamik analizleri sonucunda hesaplanan kuvvet ve moment değerleri farklı seyir koşulları için incelenmiştir. Bu projede kullanılan Autosub modeli pervanesiz olduğundan, pervanenin sebep olduğu ters akış terimleri ve katsayıları bu projede kullanılmamıştır. Ters akış terimleri aracın hareket ettiği düzlemin dışında kuvvet ve moment oluşturmasına sebep olmaktadırlar. Bu durum yatay ve düşey eksenlerdeki simetriyi bozmakta ve aracın yunuslama ve sapma düzlemlerindeki davranış benzerliğini engellemektedir. Ayrıca Autosub aracının geometrisi eksenel simetrik bir gövdeden ve dört adet benzer kontrol yüzeyinden oluştuğu için yatay ve düşey eksenlerde simetriklik kabulü bu araç için yapılır. Bu sebeplerden ötürü, statik hidrodinamik veri tabanında kuvvet ve moment değerlerinin değişimi tek bir düzlem için incelenmiş, diğer düzlemde aracın üzerinde oluşabilecek yükler benzetim yapılarak hesaplanmıştır.

Statik hidrodinamik analizler sonucunda hesaplanan değerler üzerinde yapılan incelemelerde elde edilen grafiklerin değişim rejimleri genellikle doğrusaldır. Bu sayede doğrusal eğimli grafiklerin eğimleri Bölüm 4.2'de anlatıldığı gibi boyutsuzlaştırılarak hidrodinamik katsayılar hesaplanabilir. Bu bölümde hesaplanan hidrodinamik katsayıların çizelgesi EK.1'de verilmiştir. Değişim rejimleri doğrusal olmayan ve ters akış terimlerinin etkin bir şekilde sistem dinamiğinin içinde olduğu durumlarda hidrodinamik kuvvet ve moment değerlerinden katsayıların çekilmesi için "*Sistem Tanılama*" çalışmaları yapılmaktadır. Ancak "*Sistem Tanılama*" konusu bu tez kapsamında olmadığından detayları bu projede anlatılmayacaktır.

9.2 Dinamik Hidrodinamik Veri tabanının Hazırlanması ve Sonuçların İncelenmesi

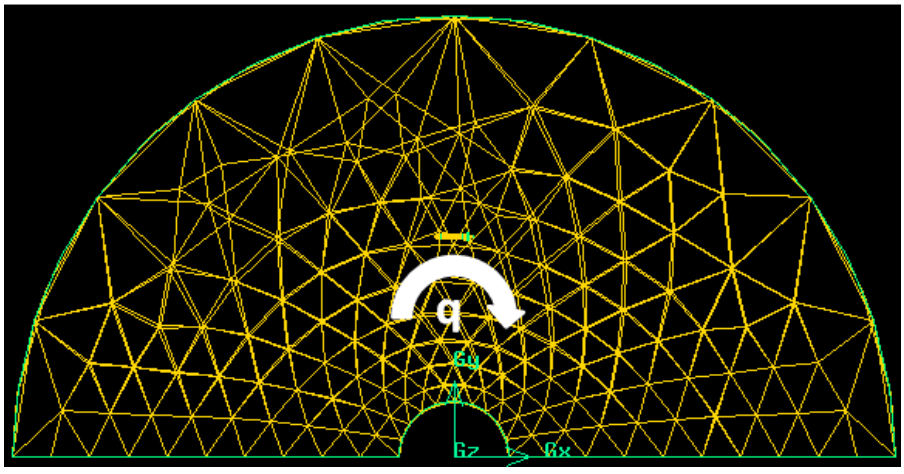
Bu bölümde Autosub su altı aracının rotasyonel veya ivmeli hareketleri sonucunda üzerinde oluşan hidrodinamik kuvvetlerin ve momentlerin hesaplanması, elde edilen kuvvet ve momentlerden dinamik hidrodinamik katsayıların türetilmesi ve elde edilen sonuçların detaylı bir şekilde incelenmesi üzerinde durulmuştur. Yapılan Çalışmalarda Bölüm 7.2'de geliştirilen HAD modelleme teknikleri ve Bölüm 8'de anlatılan ampirik hesaplama teknikleri kullanılmıştır. Autosub'ın rotasyonel hareketleri sonucunda oluşan manevra katsayıları HAD analiz teknikleri ile hesaplanırken, ivmeli hareketi sonucunda oluşan ek su katsayıları ise ampirik hesaplama teknikleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu bölümde kullanılan HAD çalışmalarında zamandan bağımsız ve rotasyonel hareketleri içeren modellemeler yapılmıştır. Aracın ivmeli hareketleri sonucunda oluşan ek su katsayılarının hesaplanması HAD yöntemleri ile çok zaman alıcı ve güvenilir olmadığından bu katsayılar, ampirik hesaplama yöntemleri kullanılarak hesaplanmıştır.

Su altı araçlarının manevra kabiliyetlerinin hesaplanabilmesi, performans analizlerinin yapılabilmesi ve dinamik davranış karakteristiklerinin bilinebilmesi için rotasyonel veya ivmeli hareketleri sırasında karşılaştıkları hidrodinamik kuvvet ve momentlerin bilinmesi gerekmektedir. Bu kapsamda Autosub aracının yunuslama (q), sapma (r) veya yuvarlanma (p) açısal hızları ile zamandan bağımsız manevra yaptığı durumlar simüle edilmiş ve bu rotasyonel hareketler sırasında araç üzerinde oluşan hidrodinamik kuvvet ve momentler hesaplanmıştır. Autosub'ın daha önceki bölümlerde bahsedilen simetrik özelliklerinden ötürü bu bölümde yunuslama ve sapma hareketleri için aynı HAD analiz sonuçları kullanılmıştır. Yunuslama

manevrası için yapılan HAD analizleri sonucunda elde edilen sonuçlar Bölüm 3.1'deki eksen takımına göre dönüştürülmüş ve sapma manevrası için kullanılmıştır. Yuvarlanma manevrası HAD analizleri için ise yeni akış hacmi ve analiz modeli kurulmuş ve araca yuvarlanma hareketi tanımlanarak HAD analizleri yapılmıştır. Ayrıca Bölüm 7.1'de geliştirilen ampirik formülde bulunan değişkenler için Autosub'ın geometrik özellikleri tanımlanmış, aracın sahip olduğu ek su kütlesi ve ataleti katsayıları hesaplanmıştır.

9.2.1 Yunuslama manevrası sonuçlarının incelenmesi

Autosub su altı aracının yunuslama manevrası sonucunda oluşan hidrodinamik kuvvet ve momentlerin incelenebilmesi için su altı döner kol test mekanizmasında yapılan hareketin benzetimi HAD ortamında kurulmuş ve hidrodinamik analizler yapılmıştır. Su altı araçlarının dinamik hidrodinamik katsayılarının bulunması için kullanılan döner kol mekanizması ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 5.2'de detaylıca verilmiştir. Bu bölümde yapılacak HAD analizleri için Bölüm 7.2'de anlatılan dinamik hidrodinamik katsayıların hesaplanması için geliştirilen HAD analiz yöntemleri kullanılacaktır. Bu analiz yönteminin kurulması için aracın yunuslama düzleminde manevra hareketini yapabileceği bir akış hacmi tanımlanır.



Şekil 9.13 : Autosub aracının yunulama manevrası için oluşturulan akış hacmi.

Tanımlanan bu akış hacminde araç modeli ağırlık merkezi noktasında döner kol mekanizmasının hareketli kolu üzerine istenilen manevra yarıçapı kadar mesafeye oturtturulur ve aracın değişik dönme yarıçaplarında yunuslama manevrası yaptığı varsayılır. Araç farklı dönme yarıçaplarında farklı açısal hızlarda hareket ettirilerek aracın farklı seyir hızlarına sahip olması sağlanır.

$$V(m/s) = \omega(rad/s) \times R(m) \quad \textbf{(9.11)}$$

Autosub aracının pozitif ve negatif yunuslama manevraları sırasında üzerinde oluşan hidrodinamik kuvvetlerin ve momentlerin hesaplanabilmesi için yukarıda gösterilen akış hacmi kullanılarak aşağıdaki seyir koşullarında HAD analizleri yapılmıştır. Aracın sadece yunuslama açısal hızı ile değişen hidrodinamik katsayılarının hesaplanabilmesi için tanımlanana seyir koşullarında hücum açısız ve üzerinde herhangi bir kontrol yüzeyi sapması olmadan seyir yaptığı kabul edilmiştir. Çizelge 9.4'te Autosub aracının yunuslama manevrası analizlerinin yapıldığı seyir koşulları verilmiştir.

Çizelge 9.4 : Autosub aracının yunuslama manevrası analizlerinin yapıldığı seyir koşulları.

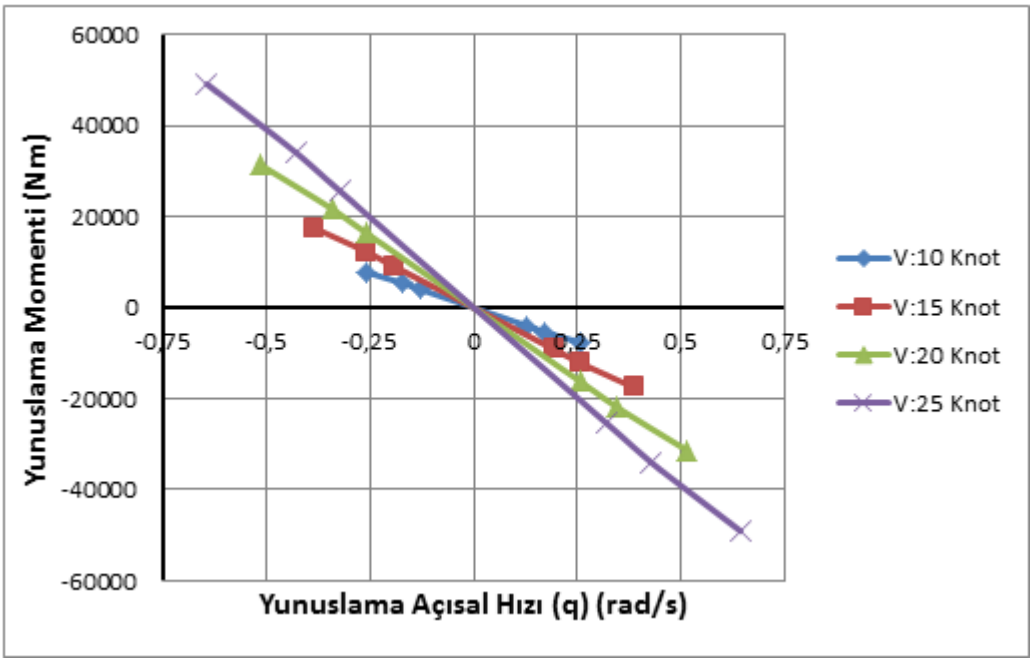
Hız (kts)	Dönme Yarıçapı (m)	Açısal Hız (q) (rad/s)	α	β	ϕ	δe	δr	δa
10	20	-0,25722	0	0	0	0	0	0
10	30	-0,17148	0	0	0	0	0	0
10	40	-0,12861	0	0	0	0	0	0
10	40	0,12861	0	0	0	0	0	0
10	30	0,17148	0	0	0	0	0	0
10	20	0,25722	0	0	0	0	0	0
15	20	-0,38583	0	0	0	0	0	0
15	30	-0,25722	0	0	0	0	0	0
15	40	-0,192915	0	0	0	0	0	0
15	40	0,192915	0	0	0	0	0	0
15	30	0,25722	0	0	0	0	0	0
15	20	0,38583	0	0	0	0	0	0
20	20	-0,51444	0	0	0	0	0	0
20	30	-0,34296	0	0	0	0	0	0
20	40	-0,25722	0	0	0	0	0	0
20	40	0,25722	0	0	0	0	0	0
20	30	0,34296	0	0	0	0	0	0
20	20	0,51444	0	0	0	0	0	0
25	20	-0,64305	0	0	0	0	0	0
25	30	-0,4287	0	0	0	0	0	0
25	40	-0,321525	0	0	0	0	0	0
25	40	0,321525	0	0	0	0	0	0
25	30	0,4287	0	0	0	0	0	0
25	20	0,64305	0	0	0	0	0	0

Bu kapsamda toplamda 24 adet yunuslama manevrasının benzetiminin yapıldığı HD analizi yapılmıştır. Yunuslama manevrası sırasında sistem dinamiği için değişimi en önemli olan parametre aracın yunuslama momenti (M) değişim be düşey öteleme kuvveti (Z) değişimidir. Dolayısıyla bu bölümde yapılan analizler sonucunda aracın üzerinde oluşan yunuslama momenti ve düşey öteleme kuvveti değerlerinin yunuslama açısal hızı ile değişimleri incelenecektir.

Çizelge 9.5 : Yunuslama manevrası analizlerinde incelenecek hidrodinamik parametreler ve bağlı olduğu değişkenler.

Parametre	Bağlı Olduğu Değişken
X	V, R, q
Z	V, R, q
M	V, R, q

Aşağıdaki grafikte farklı seyir hızlarında yunuslama manevrası yapan Autosub aracının üzerinde oluşan yunuslama momentinin çeşitli yunuslama açısal hızlarına göre değişimleri incelenmiştir.



Şekil 9.14 : Farklı hızlarda yunuslama momentinin yunuslama açısal hızına göre değişimi.

Grafikten görüldüğü üzere, farklı seyir hızlarında yunuslama manevrası yapan Autosub aracının üzerinde oluşan yunuslama momenti, aracın sahip olduğu yunuslama açısal hızı ile doğrusal olarak değişmektedir. Yunuslama açısal hızı pozitif yönde arttıkça aracın üzerinde oluşan moment değeri negatif yönde artmaktadır. Burada (-) işareti Bölüm 3.1'de tanımlanan eksen takımına göre yön

tayini açısından verilmiştir. Yukarıdaki grafikteki eğrilerin eğimleri Bölüm 4.2'de anlatıldığı gibi boyutsuzlaştırıldığı takdirde Autosub aracının $M_q{}'$ katsayısı hesaplanabilir. Bu katsayıya yunuslama momentinin sönümleme katsayısı adı verilir. $M_q{}'$ katsayısı aracın yunuslama hareketinin benzetiminin yapıldığı sistem dinamiği açısından büyük önem taşımaktadır.

Şekil 9.14'te yer alan grafikte bulunan eğrilerin eğimleri, aşağıdaki denklemleri M_q değerini vermektedir. Bu değer herhangi bir yunuslama açısal hızı ile çarpılırsa, o açısal hızda aracın üzerinde oluşan yunuslama momenti değeri hesaplanabilir [20].

$$M = M_q.q \qquad \textbf{(9.12)}$$

$$M_q = M_q{}'.u.\frac{\rho}{2}l^4 \qquad \textbf{(9.13)}$$

$$M = M_q{}'.q.u.\frac{\rho}{2}l^4 \quad \rightarrow \quad M_q{}' = \frac{M_q}{u.\frac{\rho}{2}l^4} \qquad \textbf{(9.14)}$$

Şekil 9.14'te bulunan grafikteki eğrilenin eğimleri yukarıda anlatıldığı gibi boyutsuzlaştırıldığı takdirde elde edilen $M_q{}'$ katsayısı aşağıdaki gibi bulunur.

Çizelge 9.6 : Farklı seyir hızlarında Autosub aracının sahip olduğu yunuslama momenti sönümlemesi katsayıları

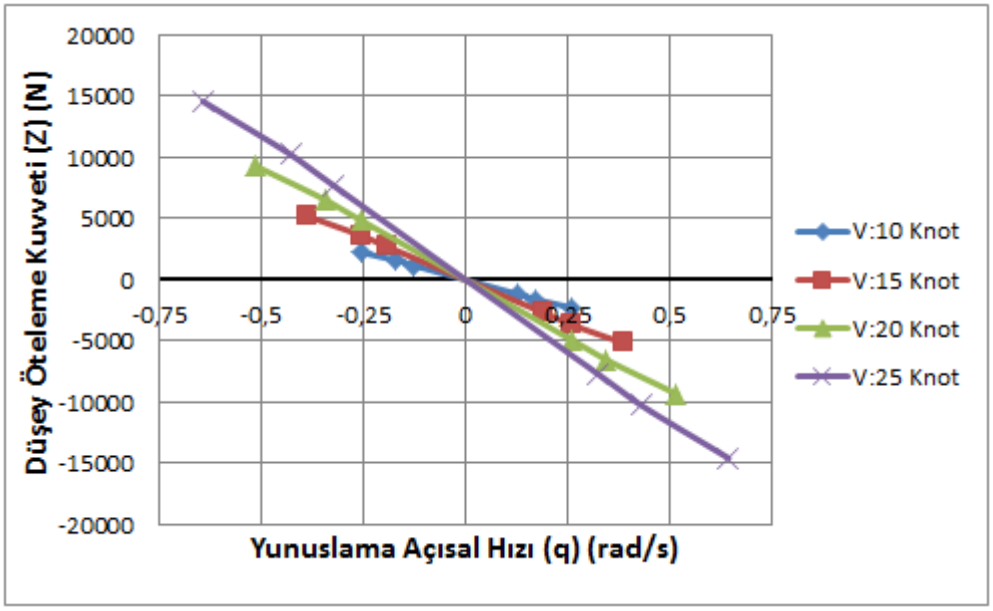
V (Knot)	M_q	$M_q{}'$
10	-30950	-0,00491
15	-46475	-0,00491
20	-61968	-0,00491
25	-77590	-0,00491

Çizelge 9.6'da dikkat çekici olan şudur ki, farklı seyir hızları için hesaplanan $M_q{}'$ katsayılarının değerleri aynı bulunmuştur. Aslında bu durum su altı araçlarının lineer manevra katsayıları için beklenen bir durumdur. O halde söylenebilir ki, su altı araçları için $M_q{}'$ katsayısı seyir hızından bağımsızdır. Bu durum, sistem simülasyonu ve modelleme çalışmaları açısından büyük kolaylık sağlamaktadır. Tek bir hız kademesi için bilinen $M_q{}'$ katsayısı kullanılarak diğer hız kademelerinde sistem simülasyonu çalışmaları yapılabilir ve farklı hızlardaki sistem dinamiği incelenebilir.

Yunuslama manevrası yapan bir su altı arasının üzerinde incelenmesi gereken ikinci önemli bir parametre ise düşey öteleme kuvvetidir (Z). Bu kuvvet yunuslama hareketi yapan bir aracın bölümlerinin üzerinde oluşan farklı basınç dağılımlarından ötürü meydana gelmektedir. Düşey öteleme kuvveti de, yunuslama momentinin

incelendiği Çizelge 9.4'te yer alana 24 adet HAD analizinden oluşan dinamik hidrodinamik veri tabanı için incelenmiştir. Bu veri tabanı, herhangi bir hücum açısında, sapma açısında ve kontrol yüzeyi sapma açısında seyir yapılan bir seyir koşulunu içermemektedir. Dolayısıyla bu bölümde düşey öteleme kuvvetinin sadece yunuslama açısal hızı ile değişimi incelenmiştir.

Aşağıdaki grafikte farklı seyir hızlarında yunuslama manevrası yapan Autosub aracının üzerinde oluşan düşey öteleme kuvvetinin, yunuslama açısal hızlarına göre değişimi verilmiştir.



Şekil 9.15 : Farklı hızlarda düşey öteleme kuvvetinin yunuslama açısal hızına göre değişimi.

Grafikten görüldüğü gibi, farklı seyir hızlarında yunuslama manevrası yapan Autosub aracının üzerinde oluşana düşey öteleme kuvveti (Z) aracın sahip olduğu yunuslama açısal hızı ile doğrusal olarak değişmektedir. Yunuslama açısal hızı pozitif yönde arttıkça aracın üzerinde oluşan kuvvet değeri negatif yönde artmaktadır. Burada (-) yön tayini amacıyla kullanılmıştır. Yukarıdaki grafikte bulunan eğrileni eğimleri Bölüm 4.2'de anlatıldığı gibi boyutsuzlaştırıldığı zaman Autosub aracının sahip olduğu $Z_q{}'$ katsayısı hesaplanabilir. $Z_q{}'$ katsayısı aracın yunuslama hareketinin benzetiminin yapıldığı sistem dinamiği hesaplamalarından göz ardı edilmemesi gereken önemli bir hidrodinamik parametredir. Şekil 9.15'te yer alan grafikte bulunana eğrilerin eğimleri aşağıdaki denklemlerde kullanılan Z_q değerini vermektedir [20].

$$Z = Z_q.q \quad \textbf{(9.15)}$$

$$Z_q = Z_q{}'.u.\frac{\rho}{2}l^4 \quad \textbf{(9.16)}$$

$$Z = Z_q{}'.q.u.\frac{\rho}{2}l^4 \quad \rightarrow \quad Z_q{}' = \frac{Z_q}{u.\frac{\rho}{2}l^4} \quad \textbf{(9.17)}$$

Şekil 9.15'de bulunan grafiklerin eğimleri yukarıda anlatıldığı gibi boyutsuzlaştırıldığı takdirde elde edilen $Z_q{}'$ katsayısı aşağıdaki gibidir.

Çizelge 9.7 : Farklı seyir hızlarında Autosub aracının sahip olduğu düşey öteleme kuvvetinin yunuslama açısal hızına göre değişim katsayıları

V (Knot)	Z_q	$Z_q{}'$
10	-9110	-0,01025
15	-13783	-0,01025
20	-18449	-0,01025
25	-23148	-0,01025

Çizelge 9.7'de ilgi çekici olan durum şudur ki, farklı seyir hızlarında hesaplanan $Z_q{}'$ katsayılarının değerleri aynı bulunmuştur. Bu durumda bir önceki bölümde olduğu gibi su altı araçları için beklenen bir durumdur. O halde söylenebilir ki, su altı araçları için $Z_q{}'$ katsayısı aynı $M_q{}'$ katsayısı gibi aracın seyir hızından bağımsızdır. Bu durumda sistem simülasyonu ve modelleme çalışmaları açısında büyük kolaylık sağlamaktadır. Tek bir hız kademesi için bilinen $Z_q{}'$ katsayısı kullanılarak diğer hız kademelerinde yunuslama açısal hızından kaynaklana düşey öteleme kuvveti hesaplanabilir ve sistem simülasyonu çalışmaları yapılabilir.

Bu bölümde, yunuslama düzleminde farklı seyir hızlarında ve çeşitli dönme yarıçaplarında manevra yapan Autosub su altı aracının üzerinde oluşan kuvvet (Z) ve moment (M) değerleri incelenmiştir. Hesaplanan düşey öteleme kuvveti ve yunuslama momenti değerleri yukarıda anlatıldığı gibi boyutsuzlaştırıldığında elde edilen $Z_q{}'$ ve $M_q{}'$ katsayıları, çeşitli hızlar ile boyutlulaştırıldığında istenilen hız kademesi için yunuslama açısal hız kaynaklı kuvvet ve moment değerleri hesaplanabilir. Bu durum sistem benzetimi ve modelleme çalışmalarında kullanılan hidrodinamik veri tabanını çeşitli hızlarda için genişletmek amacıyla kullanılabilmekte ve büyük kolaylık sağlamaktadır.

9.2.2 Sapma manevrası sonuçlarının incelenmesi

Daha önceki bölümlerde bahsedilen Autosub su altı aracının geometrisinin sahip olduğu simetrik özellikler sebebi ile sapma manevrası sonuçları olarak bir önceki

bölümde anlatılan yunuslama manevrası sonuçları kullanılabilir. Bölüm 3.1'de tanımlanan eksen takımına göre kuvvet ve momentlerin yunuslama düzleminden sapma düzlemine dönüşümü yapılırsa, Autosub'ın sapma açısal hızı ile sapma manevrası yaptığı sırada oluşan hidrodinamik kuvvet ve momentleri içeren dinamik veri tabanı oluşturulmuş olur. Belirli bir dönüş yarıçapında (R), bir sapma açısal hızı (r) ile yapılan sapma manevrası sırasında oluşan ve incelenmesi gereken parametreler eksenel kuvvet (X), sapma kuvveti (Y) ve sapma momentidir (N). Aşağıdaki tabloda sapma manevrası sırasında oluşan hidrodinamik parametrelerin bağlı olduğu parametreler verilmiştir.

Çizelge 9.8 : Sapma manevrası sırasında oluşan hidrodinamik parametreler ve bağlı olduğu değişkenler

Parametre	Bağlı Olduğu Değişken
X	V, R, r
Y	V, R, r
N	V, R, r

Autosub'ın negatif yunuslama açısal hızı (q) ile manevra yaparken üzerinde oluşan pozitif yunuslama momenti (M) ile negatif sapma açısal hızı (r) ile manevra yaparken üzerinde oluşan pozitif sapma momentinin değerleri ve işaretleri aynıdır. Bu sebeple aşağıdaki katsayılar için eşitlik ifadesi yazılabilir.

$$M_q{}' = N_r{}' \qquad \textbf{(9.18)}$$

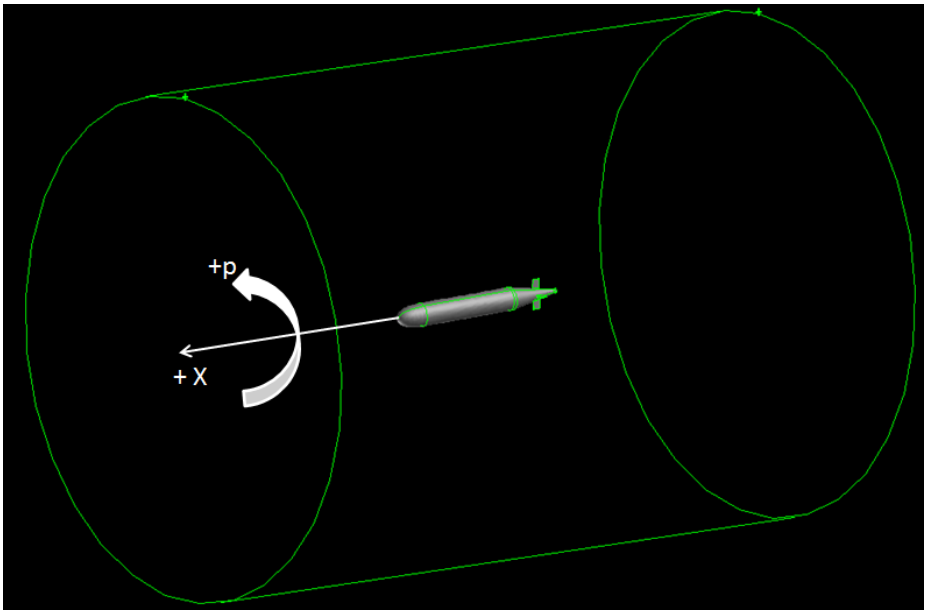
Benzer şekilde Autosub negatif bir yunuslama açısal hızı (q) ile manevra yaparken üzerinde oluşan pozitif düşey öteleme kuvveti (Z) ile negatif sapma açısal hızı (r) ile manevra yaparken üzerinde oluşan negatif sapma kuvvetinin (Y) değerleri aynıdır. Bu sebeple aşağıdaki katsayılar için eşitlik ifadesi yazılabilir.

$$Z_q{}' = -Y_r{}' \qquad \textbf{(9.19)}$$

Yukarıda eşitlikleri yazılan manevra katsayıları bir önceki Yunuslama Manevrası Sonuçlarının İncelenmesi bölümünde anlatıldığı gibi hesaplanmıştır. Bu bölümde yunuslama manevrası için hesaplanan hidrodinamik değerler kullanılabildiğinden, sapma manevrası sırasında Autosub'ın maruz kaldığı kuvvet ve moment değerleri ile sahip olduğu hidrodinamik katsayılar için bu bölümde değerler veya grafikler verilmemiştir. Bir önceki bölümde verilen sonuçlar sapma manevrası için kullanılabilir. Bu noktada önemli olan değerlerin Bölüm3.1'de verilen eksen takımına göre notasyon dönüşümü yapılarak kullanılmasıdır.

9.2.3 Yuvarlanma manevrası sonuçlarının incelememesi

Bu bölümde Autosub'ın yuvarlanma hareketi yaptığı zamanlarda üzerinde oluşan hidrodinamik kuvvet ve momentler incelenecektir. Yuvarlanma hareketi, araç belirli bir seyir hareketi yaparken aracın X ekseni etrafında dönmesi olarak nitelendirilebilir. Yuvarlanma hareketi genellikle diğer açısal veya doğrusal hızlar ile birlikte araca etkiyen ve aracın üzerinde akuple hidrodinamik katsayıların oluşmasına neden olan bir hidrodinamik parametredir. Bu bölümde aracın X ekseni yönünde çeşitli doğrusal hızlar ile seyir yaparken üzerinde yuvarlanma hareketinin tanımlanmasıyla oluşan hidrodinamik kuvvet ve momentler üzerinde durulacaktır. Yuvarlanama hareketinin sistem dinamiğine olan etkilerinin incelenmesi için Bölüm 5.4'te anlatılan Konileme Hareket Mekanizması Su Altı Test Düzenekleri kullanılmaktadır. Ancak bu çalışmada yuvarlanma hareketinin Autosub aracı üzerinde oluşan etkileri HAD analizleri kullanılarak incelenmiştir. HAD analiz yöntemleri ile yuvarlanma hareketinin modellenmesi için silindir şeklinde sonsuz büyük bir akış hacmi tanımlanmıştır. Autosub tanımlanan akış hacmi içerisinde +X yönünde hücum açısı ve kontrol yüzeyi sapmasının olmadığı seyir koşulunda bir hareket yaparken, aracın üzerinde X ekseni etrafında yuvarlanma açısal hızı (p) tanımlanmıştır. Bu sayede aracın üzerinde tanımlanan yuvarlanma açısal hızının aracın üzerinde nasıl bir kuvvet ve moment oluşturacağı incelenebilecektir. HAD analizleri ile araca yuvarlan açısal hızının tanımlanması için aşağıdaki gibi bir akış hacmi oluşturulmuştur.



Şekil 9.16: Yuvarlanma açısal hızının tanımlanması için oluşturulan akış hacmi.

Tanımlanan bu akış hacminde yuvarlanma açısal hızı aracın hacim merkezinden geçen X ekseni etrafında tanımlanmıştır. Yuvarlanma hareketinin Autosub üzerinde oluşturduğu etkileri incelemek ve yuvarlanma momentinin değişimini görebilmek için aşağıdaki seyir koşullarında HAD analizi yapılmıştır.

Çizelge 9.9 : Yuvarlanma açısal hızı ile yapılan HAD analizi seyir koşulları

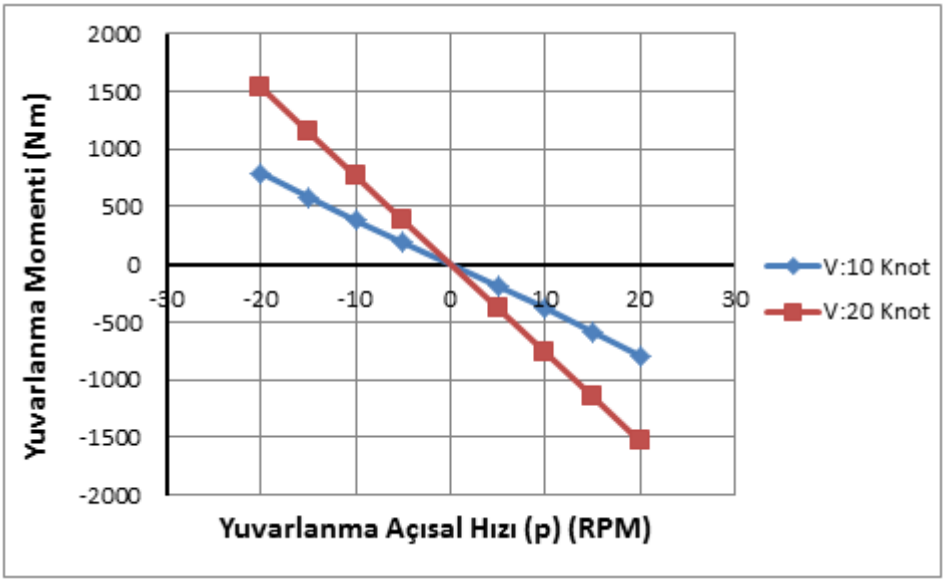
Hız (Knot)	p (RPM)	q (RPM)	r (RPM)	α	β	δ_e	δ_r	δ_a
10	5	0	0	0	0	0	0	0
10	10	0	0	0	0	0	0	0
10	15	0	0	0	0	0	0	0
10	20	0	0	0	0	0	0	0
10	-5	0	0	0	0	0	0	0
10	-10	0	0	0	0	0	0	0
10	-15	0	0	0	0	0	0	0
10	-20	0	0	0	0	0	0	0
20	5	0	0	0	0	0	0	0
20	10	0	0	0	0	0	0	0
20	15	0	0	0	0	0	0	0
20	20	0	0	0	0	0	0	0
20	-5	0	0	0	0	0	0	0
20	-10	0	0	0	0	0	0	0
20	-15	0	0	0	0	0	0	0
20	-20	0	0	0	0	0	0	0

Bu kapsamda toplamda 16 adet yuvarlanma manevrasının benzetiminin yapıldığı HAD analizi yapılmıştır. Sadece yuvarlanma açısal hızının var olduğu yuvarlanma manevrası sırasında sistem dinamiği açısından değişimi en önemli olan parametreler aracın üzerinde oluşan yuvarlanma (K), yunuslama (M) ve sapma (N) momentleridir. Dolayısıyla bu bölümde hidrodinamik momentlerin, yuvarlanma açısal hızına (p) göre değişimi incelenecektir. Bu bölümdeki HAD analizleri sonucunda oluşan kuvvet ve moment değerleri aşağıdaki tabloda belirtilen değişkinlere bağlı olarak değişmektedir.

Çizelge 9.10 : Yuvarlan manevrası sonucunda oluşan hidrodinamik parametreler ve bağlı olduğu değişkenler

Parametre	Bağlı Olduğu Değişken
X	V, p
K	V, p
M	V, p
N	V, p

Aşağıdaki grafikte farklı hızlarda seyir yapan Autosub aracının yuvarlanma manevrası yaptığı sırada üzerinde oluşan yuvarlanma momenti değerlerinin değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 9.17 : Çeşitli hızlarda hareket eden Autosub'ın yunuslama açısal hızına göre yunuslama momenti değişimi.

Görüldüğü üzere, yuvarlanma açısal hızının artması ile yuvarlanma momenti doğrusal olarak negatif yönde artmaktadır. Burada negatiflik yön belirtmek amacıyla kullanılmıştır. Ayrıca aracın seyir hızının artması ile oluşan yuvarlanma momentini değeri büyümektedir. Bölüm 9.2.1'de anlatıldığı gibi yukarıdaki grafiğin eğrilerinin eğimleri boyutsuzlaştırıldığı takdirde, yuvarlanma momentinin yuvarlanma açısal hızına göre değişim katsayısı türetilebilir [20].

$$K = K_p.p \tag{9.20}$$

$$K_P = K_p'.u.\frac{\rho}{2}l^4 \tag{9.21}$$

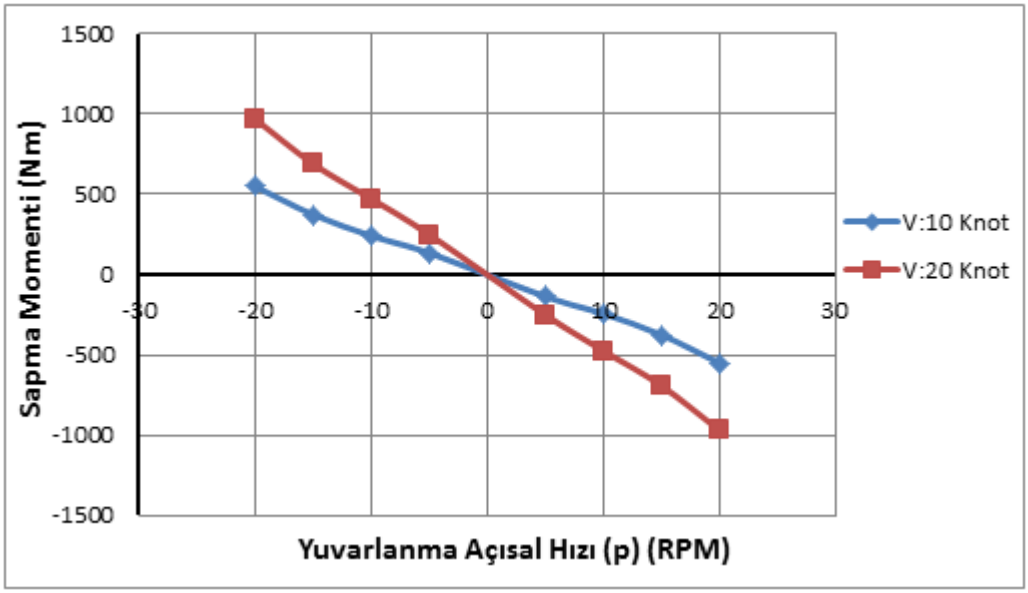
$$K = K_p'.p.u.\frac{\rho}{2}l^4 \quad \rightarrow \quad K_p' = \frac{K_P}{u.\frac{\rho}{2}l^4} \tag{9.22}$$

Bu şekilde boyutsuzlaştırılan K_p' katsayısı yuvarlanma hareketinin benzetiminin yapıldığı sistem dinamiği hesaplamalarında büyük önem taşımaktadır. Bu katsayıya yuvarlanma momenti sönümleme katsayısı adı verilir. Şekil 9.17'deki grafikte bulunan eğimlerin yukarıda anlatıldığı gibi boyutsuzlaştırıldığı takdirde elde edilen K_p' katsayıları aşağıdaki gibidir.

Çizelge 9.11 : Farklı seyir hızlarında Autosub aracının sahip olduğu yuvarlanma momentinin yuvarlanma açısal hızına göre değişim katsayıları

V (Knot)	K_P	$K_p{}'$
10	-39,123	-3,1E-06
20	-76,493	-3,1E-06

Yuvarlanma manevrası yapan bir su altı aracının üzerinde oluşan ve incelenmesi gereken diğer bir parametre ise sapma momentinin yuvarlanma açısal hızına göre değişimidir. Çünkü su altı araçları sapma manevrası sırasında yuvarlanma hareketine maruz kalırlar. Ancak yunuslama hareketi sırasında ciddi bir yuvarlanma hareketi yapmazlar. Bu sebeplerden ötürü 10 ve 20 Knot hızlarda seyir yapan Autosub aracının sahip olduğu yuvarlanma açısal hızına göre üzerinde oluşan sapma momenti değerlerinin değişimi aşağıdaki grafikte verilmiştir.



Şekil 9.18 : Çeşitli hızlarda hareket eden Autosub'ın yunuslama açısal hızına göre sapma momenti değişimi.

Görüldüğü üzere, yuvarlanma açısal hızının artması ile sapma momenti neredeyse doğrusal bir değişim göstermektedir. Grafikte negatiflik yön belirtmek amacıyla kullanılmıştır. Aracın seyir hızının artması ile oluşan yuvarlanma momentini değeri büyümektedir. Bölüm 9.2.1'de anlatıldığı gibi yukarıdaki grafiğin eğrilerinin eğimleri boyutsuzlaştırıldığı takdirde, Sapma momentinin yuvarlanma açısal hızına göre değişim katsayısı türetilebilir [20].

$$N = N_p.p \tag{9.23}$$

$$N_P = N_p{}'.u.\frac{\rho}{2}l^4 \tag{9.24}$$

$$N = N_p{}'.p.u.\frac{\rho}{2}l^4 \quad \rightarrow \quad N_p{}' = \frac{N_P}{u.\frac{\rho}{2}l^4} \qquad \textbf{(9.25)}$$

Bu şekilde boyutsuzlaştırılan $N_p{}'$ katsayısı yuvarlanma ve sapma hareketlerinin akuple olduğu seyir koşullarının benzetiminin yapıldığı sistem dinamiği hesaplamalarında büyük önem taşımaktadır. Bu katsayıya sapma momentinin yuvarlanma açısal hızına göre değişim katsayısı adı verilir. Şekil 9.18'deki grafikte bulunan eğimlerin yukarıda anlatıldığı gibi boyutsuzlaştırıldığı takdirde elde edilen $N_p{}'$ katsayıları aşağıdaki gibidir.

Çizelge 9.12 : Farklı seyir hızlarında Autosub aracının sahip olduğu sapma momentinin yuvarlanma açısal hızına göre değişim katsayıları

V (Knot)	N_P	$N_p{}'$
10	-26,288	-2,086E-06
20	-52,50	-2,086E-06

Bu bölümde hesaplanan katsayılar için önemli olan konularda biri de, katsayıların aracın seyir hızı ile değişmediğidir. Görüldüğü gibi yuvarlanma ve sapma momenti değerlerinin yunuslama açısal hızına göre değişiminden elde edilen katsayılar aracın seyir hızı ile değişmemiştir. Bu durumda, seyir dinamiği hesaplamalarında yukarıdaki katsayılar kullanılarak istenilen seyir hızı değerindeki yuvarlanma ve sapma momenti değerlerinin yuvarlanma açısal hızına göre değişimi hesaplanabilir.

9.2.4 Ek su katsayılarının hesaplanması

Ek su terimleri bir su altı aracının doğrusal veya açısal ivmeli hareket yaptığı seyir koşullarında oluşan ve aracın kendisi ile beraber hareket ettirdiği ek kütle veya aracın üzerinde oluşan ek atalet olarak tanımlanabilir. Ek su terimleri su altı hareketlerinde suyun sahip olduğu viskoz özelliklerden ötürü oluşmaktadır ve ihmal edilemez seviyelerde değerlere sahiptirler. Ek su katsayıları, ivmeli hareket yapan aracın sahip olduğu seyir koşullarından bağımsızdır ve sadece aracın geometrisi ile değişmektedir. Ek su terimleri ile ilgili teorik bilgiler Bölüm 4.4.2.4'te detaylıca verilmiştir. Autosub aracının geometrik bilgileri üzerinden ek su kütlesi veya ataleti katsayılarının ampirik hesaplama yöntemleri ile hesaplanması ilgili bilgiler Bölüm.8'de anlatıldığından bu bölümde hesaplamaların yapıldığı ampirik yöntemler üzerinde durulmayacaktır. Bu bölümde Autosub aracının ek su katsayıları matrisindeki diagonel terimlerin hesaplanması için yapılan ampirik çalışmaların sonuçları üzerinde durulacaktır. Autosub aracının X, Y ve Z eksenleri doğrultusunda

yapacağı doğrusal ivmeli hareketler veya X, Y ve Z eksenlerinin etrafında yapacağı açısal ivmeli hareketler sonucunda aracın üzerinde ek su kütleleri ve ataletleri oluşmaktadır. Aşağıdaki verilen tabloda hangi hareketin hangi ek su katsayısının oluşmasına sebep olduğu verilmiştir.

Çizelge 9.13 : Ek su katsayılarının oluşmasına neden olan hareket tipleri

X ekseni yönünde yapılan doğrusal ivmeli hareket sonucunda	$X_{\dot{u}}$
X ekseni etrafında yapılan açısal ivmeli hareket sonucunda	$K_{\dot{p}}$
Y ekseni yönünde yapılan doğrusal ivmeli hareket sonucunda	$Y_{\dot{v}}$
Y ekseni etrafında yapılan açısal ivmeli hareket sonucunda	$M_{\dot{q}}$
Z ekseni yönünde yapılan doğrusal ivmeli hareket sonucunda	$Z_{\dot{w}}$
Z ekseni etrafında yapılan açısal ivmeli hareket sonucunda	$N_{\dot{r}}$

Sistem dinamiği açısından duyarlılığı en fazla olan katsayılar ek su matrisinde diagonel eksen üzerindeki katsayılar olduğundan bu bölümde diagonel eksen üzerindeki katsayıların sonuçları üzerinde durulmuştur. Aşağıda Bölüm.8'de anlatılan ampirik hesaplama yöntemleri kullanılarak hesaplanmış, Autosub aracına ait ek su katsayıları bulunmaktadır.

Çizelge 9.14 : Autosub aracının ek su katsayıları

$X_{\dot{u}}$	-6,12E-04
$Y_{\dot{v}}$	-2,02E-02
$Z_{\dot{w}}$	-2,02E-02
$M_{\dot{q}}$	-7,37E-04
$N_{\dot{r}}$	-7,37E-04
$K_{\dot{p}}$	-5,20E-06

Görüldüğü gibi Autosub aracının simetrik olan geometrisinden ötürü yatay ve düşey eksenle yönünde ve bu eksenler etrafında oluşan ek su kütlesi ve ataleti katsayılarının sonuçları aynı bulunmuştur.

$$Z_{\dot{w}} = Y_{\dot{v}} \qquad \textbf{(9.26)}$$

$$M_{\dot{q}} = N_{\dot{r}} \qquad \textbf{(9.27)}$$

Çizelge 9.14'de sonuçları verilen ek su katsayıları aşağıdaki boyutlulaştırma parametreleri ile boyutlulaştırıldığında Autosub aracının üzerinde aşağıdaki tabloda verilen kütle ve atalet değerleri etkiyecektir. Çizelge 9.10'da Autosub aracının üzerinde eksenler doğrultusunda oluşabilecek ek su kütlesi değerleri, Tablo 9.11'de ise Autosub aracının üzerinde eksenler etrafında oluşabilecek ek su ataleti değerleri

verilmiştir. Ek su kütlesi katsayıları aşağıdaki şekilde boyutlu hale getirilebilir ve aracın üzerinde oluşan ek su kütlesi hesaplanabilir [20].

$$X_{\dot{u}} = X_{\dot{u}}' \frac{\rho}{2} l^3 \quad \textbf{(9.28)}$$

$$Y_{\dot{v}} = Y_{\dot{v}}' \frac{\rho}{2} l^3 \quad \textbf{(9.29)}$$

$$Z_{\dot{w}} = Z_{\dot{w}}' \frac{\rho}{2} l^3 \quad \textbf{(9.30)}$$

Çizelge 9.15 : Doğrusal ivmeli hareket sonucunda Autosub aracının üzerinde oluşan ek su kütlesi değerleri

Ek Su Kütlesi Katsayısının İfadesi	Ek Su Kütlesi Katsayısının Değeri	Ek Su Kütlesinin Değeri (Kg)
$X_{\dot{u}}'$	-6,12E-04	-104,75
$Y_{\dot{v}}'$	-2,02E-02	-3457,37
$Z_{\dot{w}}'$	-2,02E-02	-3457,37

Çizelge 9.15'de bulunan ek su kütlesi değerlerinin (-) işaretli çıkması, bu katsayılarının sistem hareketine ters yönde etkidiğini göstermek amaçlı kullanılmıştır. Ek su ataleti katsayıları ise aşağıdaki şekilde boyutlu hale getirildiğinde, aracın üzerinde oluşan ek su ataleti değerleri hesaplanmış olur [20].

$$M_{\dot{q}} = M_{\dot{q}}' \frac{\rho}{2} l^5 \quad \textbf{(9.31)}$$

$$N_{\dot{r}} = N_{\dot{r}}' \frac{\rho}{2} l^5 \quad \textbf{(9.32)}$$

$$K_{\dot{p}} = K_{\dot{p}}' \frac{\rho}{2} l^5 \quad \textbf{(9.33)}$$

Çizelge 9.16 : Açısal ivmeli hareket sonucunda Autosub aracının üzerinde oluşan ek su ataleti değerleri

Ek Su Ataleti Katsayısının İfadesi	Ek Su Ataleti Katsayısının Değeri	Ek Su Ataletinin Değeri (Kg.m^2)
$M_{\dot{q}}'$	-7,37E-04	-6180,99
$N_{\dot{r}}''$	-7,37E-04	-6180,99
$K_{\dot{p}}'$	-5,20E-06	-43,61

Autosub aracın büyük hacimli bir otonom su altı aracın olduğundan, yatay ve düşey doğrusal veya açısal hareket yaptığında aracın üzerinde ciddi miktarlarda ek su kütlesi ve ataleti oluşmaktadır. Bu değerler ihmal edilemeyecek seviyelerdedir. Dolayısıyla yapılacak sistem dinamiği ve otopilot çalışmalarında ek su katsayıları hesaplamalara kesinlikle dâhil edilmelidir.

Görüldüğü gibi bu bölümde rotasyonel hareketler sonucunda oluşan hidrodinamik değerlerin rotasyonel hareketlerdeki açısal hızlara göre değişimleri ve ivmeli hareketler yapan bir su altı aracının üzerinde oluşan ek su katsayıları incelenmiştir. Kuvvet veya momentlerin açısal hızlara göre değişimleri incelendiğinde değişimlerin genellikle doğrusal olduğu görülmüştür. Doğrusal olan değişimlerin birinci dereceden türevleri alınarak manevralar sırasında büyük önem taşıyan dinamik hidrodinamik sönümleme katsayıları hesaplanmıştır. Bu katsayılar hesaplanırken göze alınması gereken önemli bir konu, bu katsayıların su altı araçlarının seyir hızları ile değişmediğidir. Bu durum tüm sistem için yapılan seyir simülasyonu ve modellemesi çalışmalarında büyük kolaylık sağlamaktadır. Ayrıca hesaplanan ek su katsayıları boyutlulaştırıldığı zaman hareket eden su atlı aracının üzerinde ne denli büyük kütle ve atalet değerleri oluştuğu görülmüştür. Dolayısıyla ek su katsayıları sistemin davranışının gözlemlendiği simülasyon ve modelleme çalışmalarına mutlaka dahil edilmelidir.

Su altında manevra yapan araçların üzerinde oluşan doğrusal manevra ve ek su katsayıları yukarıdaki bölümlerde anlatıldığı gibi bulunabilirken, doğrusal olmayan ve akuple hareketler sonucunda oluşan hidrodinamik katsayıların hesaplanması için çok daha karmaşık yöntemlerin kullanılması gerekmektedir. Bu akuple katsayıların hesaplanabilmesi için, su altı araçlarının yaptığı akuple manevralar ayrıklaştırılmalı ve her hareket kendi içinde incelenmelidir. Bu ayrıştırma işlemleri için sistem tanılama çalışmaları yapılmaktadır, böylece akuple olan ve doğrusal olmayan hidrodinamik katsayılar hesaplanabilmektedir. Sistem tanılama çalışmaları ile hidrodinamik katsayıların hesaplanması konusu bu tezin kapsamı içinde kalan bir konu olmadığından bu tezde akuple hidrodinamik katsayıların hesaplanmasından bahsedilmemiştir. Bu bölümde hesaplanan doğrusal manevra katsayıları kullanılarak önümüzdeki bölümde Autosub aracına ait stabilite ve performans hesaplamaları yapılacaktır.

10. STABİLİTE VE PERFORMANS HESAPLAMALARI

Bir su altı aracının seyrine kontrollü bir şekilde devam edebilmesi için o aracın sahip olduğu hidrodinamik katsayıların hesaplanarak, analiz sonuçları üzerinden stabilite hesaplamalarının yapılması gerekmektedir. Stabilite hesaplamaları statik ve dinamik olmak üzere iki alt guruba ayrılır. Bir su altı aracının statik ve dinamik kararlılık seviyelerine göre o aracın kontrollünü sağlayacak otopilot tasarımı yapılır ve aracın kontrollü bir şekilde seyir yapması sağlanır.

Su altı araçlarının performans gereksinimleri henüz tasarım aşamasında belirlenmekte ve bu performans gereksinimleri doğrultusunda araç tasarımları gerçekleştirilmektedir. Tasarım sürecinde iteratif bir şekilde performans hesaplamaları yapılmakta ve gerek görüldüğü koşullarda tasarımlar optimize edilmektedir. Bu çalışmasa tasarımı tamamlanmış ve ürün haline gelmiş olan Autosub aracının hesaplanan hidrodinamik parametrelerinden yola çıkılarak stabilite ve performans hesaplamaları yapılacaktır. Bir su altı aracının herhangi bir manevra görevini yerine getirirken kontrol edilebilir olması kadar ve istenilen performans değerlerini yerine getirebilmesi de önemlidir. Bu kapsamda bir su altı aracının kararlılığın istenilen seviyelere çekmek adına performans değerlerinden feragat edilebilmektedir. Ve ya bu durumun tersi de mevcuttur. Tasarımcılar genel olarak araçların manevra kabiliyetleri ile kararlılık dereceleri arasında, araçların kullanım amaçlarına göre, optimizasyon yapmaları gerekmektedir. Çünkü bu iki kavram birbirleri ile zıt çalışmaktadır ve istenilen tasarım gereksinimlerine göre bir diğerinden feragat edilebilir. Ancak istenilen durum, aracın kabul edilebilir performans değerlerini sağlayan karakteristikte olduğu ve kararlı bir şekilde seyirlerini yapabildiği durumdur.

10.1 Stabilite Hesaplamaları

Bu bölümde Autosub aracının düşey ve yatay düzlemlerdeki hareketleri için statik stabilite hesaplamaları yapılacak ve bu düzlemlerdeki manevra yapabilme kabiliyetleri incelenecektir. Aracın kararlılık seviyesinin belirlenebilmesi için detaylı

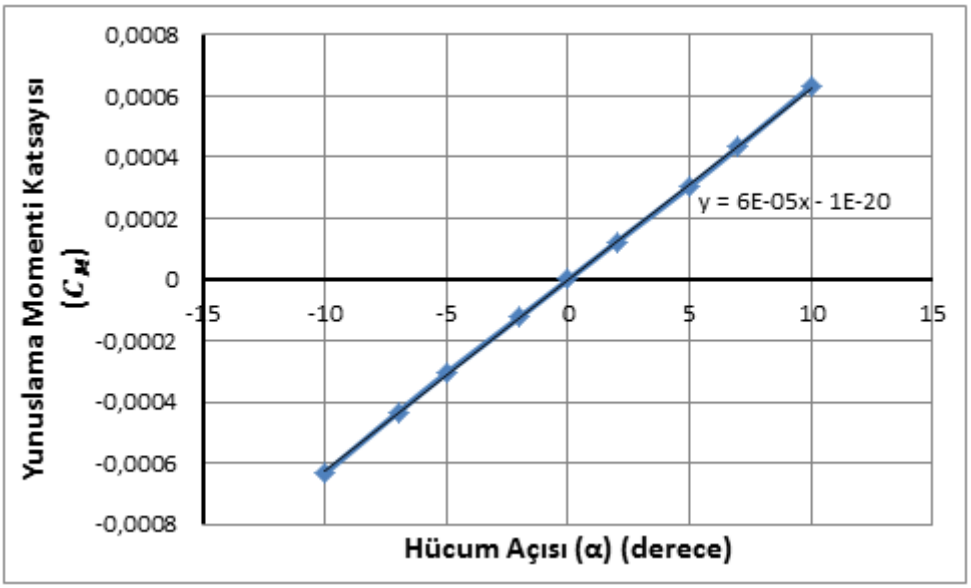
statik ve dinamik stabilite analizlerinin ikisinin de yapılması ve bu kapsamda kontrolcüler tasarlanması gerekmektedir.

10.1.1 Statik stabilitenin incelenmesi

Statik stabilite bir su altı aracının tasarlanırken dikkate alınması gereken ilk kararlılık kriterlerinin başında gelmektedir. Statik stabilite uçak gibi kanadı olan araçlarda yunuslama, sapma ve yuvarlanma olmak üzere üç düzlemdeki hareketler için de kontrol edilmelidir. Ancak su altı araçlarında kanadın olmaması ve bu araçların eksenel simetrik gövdelere sahip olmaları, su altı araçları için statik Stabilitenin yunuslama ve sapma düzlemlerinde incelenmesini yeterli kılmaktadır. Yüksek derecede kararlı yapıda olan bir aracın düşük manevra kabiliyetlerinde olacağı göz önüne alındığında aracın stabilite ve manevra kabiliyetleri arasında optimizasyon yapılması gerekmektedir. Statik stabilite en genel olarak, ilk konumunda seyir yapan bir aracın seyrini bozucu yönde bir kuvvet geldiğin zaman aracın bozuntuya karşı ilke seyir konumunu koruma eğilimi olarak tanımlanabilir. Bu kapsamda aracın farklı düzlemlerde seyir yaptığı koşullar simüle edilmiş, Autosub aracının yunuslama ve sapma düzlemlerindeki statik stabilitesi incelenmiştir. Autosub aracının statik stabilitesini belirlemek amacıyla farklı seyir hızlarında, hücum açılarında ve sapma açılarında model üzerinde oluşan moment katsayılarının hücum açılarına ve sapma açılarına göre değişimleri incelenmiştir. Tüm moment hesaplamalarında moment merkezi olarak aracın ağırlık merkezi kabul edilmiştir.

10.1.1.1 Doğrusal statik stabilitenin incelenmesi

Autosub'ın doğrusal statik stabilitesinin incelenebilmesi için yunuslama düzleminde hareket ettiği kabul edilen aracın farklı seyir hızlarında (V) ve hücum açılarında (α) HAD analizleri yapılmış, elde edilen sonuçlar değerlendirilerek model üzerinde oluşan yunuslama momenti katsayılarının (C_M) hücum açılarına göre değişimi incelenmiştir. Autosub'ın doğrusal statik stabilitesinin incelenmesi için aracın 10 Knot seyir hızında seyir yaptığı ve üzerinde herhangi bir kontrol yüzeyi sapmasının olmadığı koşullarda HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Autosub'ın farklı hücum açılarında seyir yaparken üzeninde oluşan yunuslama momenti katsayılarının değişimi aşağıdaki grafikte verilmiştir.



Şekil 10.1 : Autosub Aracının 10 Knot seyir hızında farklı hücum açılarında sahip olduğu yunuslama momenti katsayıları.

Su altında seyir yapan bir aracın doğrusal olarak kararlı olmasının koşulu, hücum açısının artması ile üzerinde oluşan yunuslama momenti katsayısının negatif yönde artmasıdır [26,40,41].

$$C_M(Yunuslama\ Momenti\ Katsayısı) = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho V^2 l^3} \qquad \textbf{(10.1)}$$

$$\frac{\partial C_M}{\partial \alpha} < 0 \rightarrow \ Doğrusal\ Statik\ Kararlılık\ Durumu$$

Ancak Autosub aracı için bu durum incelendiğinde aracın hücum açısının artması ile üzerinde oluşan yunuslama momenti katsayısı da doğrusal olarak artmaktadır. Bu durum Autosub'ın doğrusal statik kararsız bir yapıda olduğunu göstermektedir.

$$\frac{\partial C_M}{\partial \alpha}_{Autosub} = +6E-05 > 0 \quad \rightarrow \quad Doğrusal\ Statik\ Kararsızlık\ Durumu$$

Bu statik kararsız durumun sebeplerinin incelenmesi amacıyla Autosub aracının hücum açılı seyir yaptığı sırada üzerinde oluşan kuvvet dağılımları incelenmiştir. Yapılan incelemelerde aracın arka gövde bölümünün sahip olduğu eğimden ötürü, hücum açısının artması ile +Z yönünde kuvvet oluşturduğu ve bu durumun aracın basınç merkezini aracın burun bölümüne doğru kaydırdığı görülmüştür. Dolayısıyla aracın basınç merkezi ağırlık merkezinin önünde kaldığı zamanlarda, hücum açısının artması ile yunuslama momenti de düzenli olarak artmaktadır. Su altı araçlarında statik kararlılık durumunun oluşmasının tek şartı, araçların ağırlık merkezlerinin

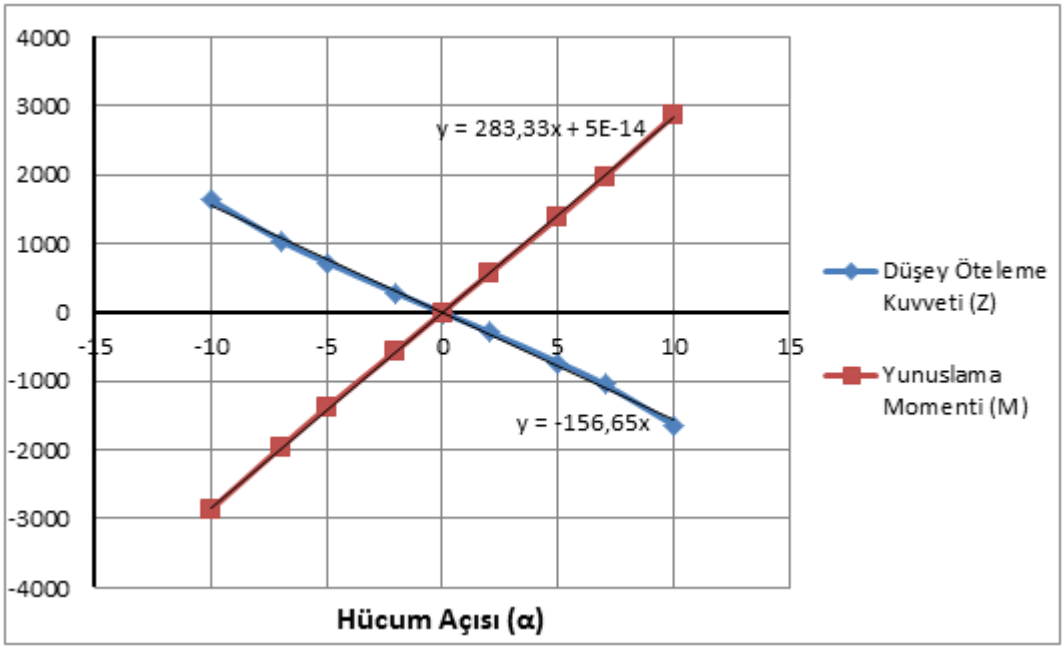
basınç merkezlerinin gerisinde olmasıdır. Statik kararsızlığın derecesinin belirlenebilmesi için Autosub aracının stabilite marjını incelenmiştir.

10.1.1.2 Stabilite marjının ve hidrodinamik merkezin incelenmesi

Autosub aracının stabilite marjını, aracın hücum açılı seyir yaptığı koşullarda üzerinde oluşan kuvvetlerin basınç merkezi ile aracın ağırlık merkezi aracındaki mesafenin mertebesinin incelenebilmesi açısından önemlidir. Autosub'ın stabilite marjının incelenebilmesi için, hücum açılı seyir yapılan koşullarda aracın üzerinde oluşan kuvvet ve moment katsayılarının hücum açılarına göre türevlerinin oranları incelenmelidir [26,40,41].

$$Stabilite\ Marjını \rightarrow \frac{M_\alpha{}'}{Z_\alpha{}'} = \frac{X_{HM}-X_{CG}}{l}\ (Boyutsuz) \qquad \textbf{(10.2)}$$

Bu kapsamda 10 Knot seyir hızında farklı hücum açıları ile hareket eden Autosub aracının üzerinde oluşan düşey öteleme kuvveti ve yunuslama momenti değerlerinin hücum açılarına göre değişim grafiği incelenmiştir.



Şekil 10.2 : Yunuslama momenti ve düşey öteleme kuvvetinin hücum açılarına göre değişimi.

Grafikteki kuvvet ve moment değerlerinin hücum açısına göre türevleri alındığında aşağıdaki değerler bulunur.

$$M_\alpha = 283.4 \qquad Z_\alpha = -156.65 \qquad \textbf{(10.3)}$$

$$M_\alpha = M_\alpha{}'.\frac{1}{2}.\rho.U^2.l^3 \qquad Z_\alpha = Z_\alpha{}'.\frac{1}{2}.\rho.U^2.l^2 \qquad \textbf{(10.4)}$$

$$\frac{M_\alpha{}'}{Z_\alpha{}'} = \frac{M_\alpha}{Z_\alpha.l} = \frac{283.4}{-156.65\times7} \qquad \textbf{(10.5)}$$

Autsoub aracının ağırlık merkezinin burundan itibaren 3.159 metre geride olduğu hatırlanırsa, stabilite marjını hesabı aşağıdaki gibi yapılabilir [26,40,41].

$$Stabilite\ Marjını \rightarrow \frac{M_\alpha{}'}{Z_\alpha{}'} = \frac{283.4}{-156.65\times7} = \frac{X_{HM}-3.159}{7} \qquad \textbf{(10.6)}$$

Bu hesap üzerinden, aracın stabilite marjını aşağıdaki gibi bulunur.

$$Stabilite\ Marjını = -0.258$$

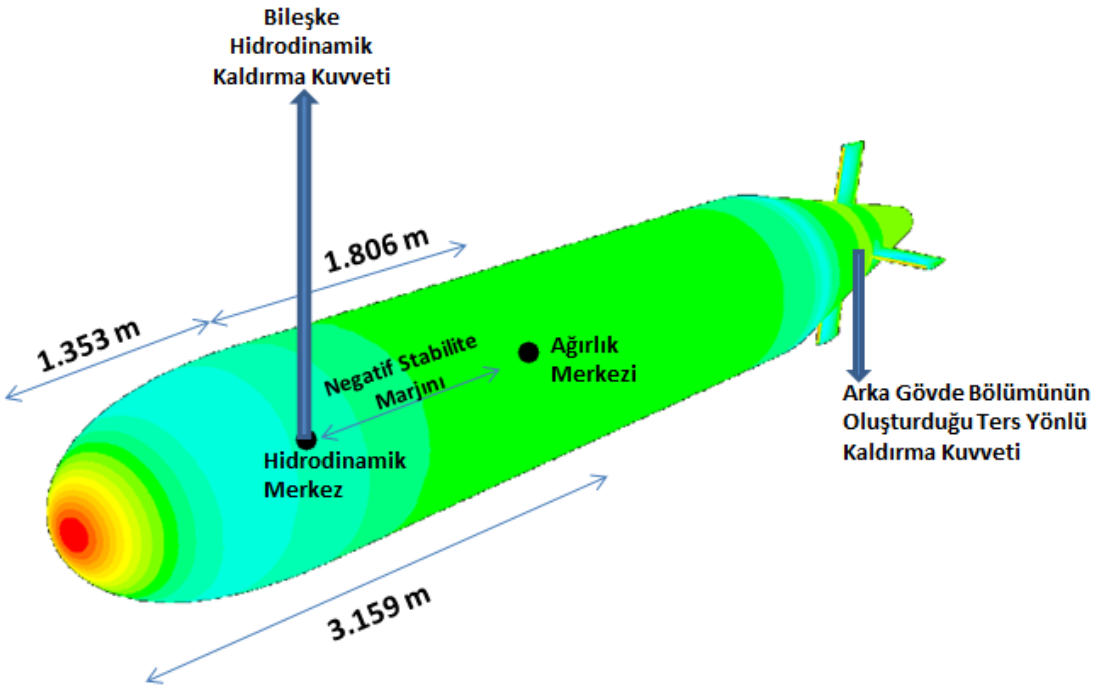
Ayrıca stabilite marjının belirlenmesi sayesinde, hücum açısının değişmesi ile yunuslama momentinin değişmediği yer olan hidrodinamik merkez noktası hesaplanabilir.

$$Stabilite\ Marjını = -0.258 = \frac{X_{HM} - 3.159}{7} \rightarrow X_{HM} = 1.353\ m$$

Autosub aracının hidrodinamik merkezi aracın burun bölümünden 1.353 m geride, ağırlık merkezinin ise 1.806 m önündedir. Aracın moment merkezi olarak hidrodinamik merkez seçildiğinde aracın yunuslama momentinin hücum açısı ile değişkenlik göstermediği görülmüştür.

Seyir Dinamiği hesaplamalarında, stabilite marjının negatif çıkması aracın statik olarak kararsız olduğunu gösterirken, pozitif çıkması ise aracın statik olarak kararlı olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada Autosub aracının stabilite marjını negatif çıkmıştır ve aracın statik olarak kararsız olduğu görülmüştür. Autosub'ın stabilite marjının negatif çıkmasının yegâne sebebi aracın hidrodinamik merkezinin ağırlık merkezinin önünde olmasıdır. Autosub'ın hidrodinamik merkezinin, ağırlık merkezinden önde olmasının sebeplerinin araştırılması amacıyla aracının hücum açılı seyir koşullarında üzerinde oluşan hidrodinamik kaldırma kuvveti dağılımları incelendiğinde, aracın arka gövdesinin sahip olduğu eğimden ötürü, bu bölümde bileşke kuvvete zıt yönde bir kaldırma kuvveti oluştuğu belirlenmiştir. Bu durum, aracın üzerinde oluşan hidrodinamik kaldırma kuvvetlerinin moment merkezinin aracın önüne doğru kaymasına sebep olmuştur. Mevcut durum Şekil 10.3'de gösterilmiştir.

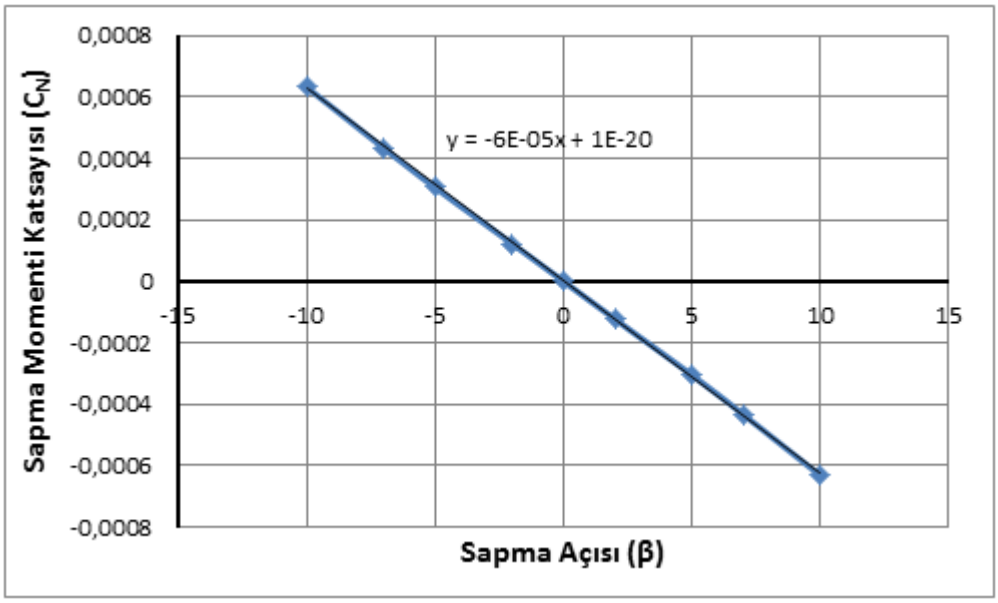


Şekil 10.3 : Autosub aracının hidrodinamik merkezi ve negatif stabilite marjını

Autosub'ın ağırlık merkezinin burundan 3.159 metre geride olduğu göz önüne alındığında, basınç merkezi burundan yaklaşık 1.353 metre geridedir. Dolayısıyla hidrodinamik merkezin ağırlık merkezinin önünde olması, statik marjının negatif olmasına sebep olmaktadır. Bu şekilde aracın hidrodinamik merkezi, ağırlık merkezinin önünde olduğunda hücum açısının artması ile aracın yunuslama momenti pozitif yönde doğrusal olarak artmakta ve dolayısıyla Autosub aracı doğrusal düzlemse statik kararsız bir yapıya bürünmektedir.

10.1.1.3 Yatay statik stabilitenin incelenmesi

Autosub su altı aracının yatay statik stabilitesinin incelenebilmesi için sapma düzleminde hareket ettiği kabul edilen aracın farklı seyir hızlarında (V) ve sapma açılarında (β) HAD analizleri yapılmış elde edilen sonuçlar değerlendirilerek model üzerinde oluşan sapma momenti katsayılarının (C_N) sapma açılarına göre değişimleri incelenmiştir. Autosub'ın yatay statik stabilitesinin incelenebilmesi için aracın 10 Knot seyir hızında seyir yaptığı ve üzerinde herhangi bir kontrol yüzeyi sapmasının olmadığı koşullarda HAD analizleri yapılmıştır. Autosub'ın farklı sapma açılarında seyir yaparken üzerinde oluşan sapma momenti katsayılarının değişimi aşağıdaki grafikte verilmiştir.



Şekil 10.4 : Autosub Aracının 10 Knot seyir hızında farklı sapma açılarında sahip olduğu sapma momenti katsayıları

Su altında seyir yapan bir su altı aracının yatay düzlemde kararlı olmasının koşulu, sapma açısının artması ile üzerinde oluşan sapma momenti katsayısının da pozitif yönde artmasıdır [26,40,41].

$$C_N(Sapma\ Momenti\ Katsayısı) = \frac{N}{\frac{1}{2}\rho V^2 l^3} \qquad \textbf{(10.6)}$$

$$\frac{\partial C_N}{\partial \beta} > 0 \rightarrow \ Yatay\ Statik\ Kararlılık\ Durumu$$

Ancak Autosub aracın için bu durum incelendiğinde aracın sapma açısının artması ile üzerinde oluşan sapma momenti katsayısı doğrulsa olarak negatif yönde artmaktadır. Bu durum Autosub'ın yatay düzlemde statik kararsız bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

$$\frac{\partial C_N}{\partial \beta}_{Autosub} = -6E-05 < 0 \quad \rightarrow \quad Yatay\ Statik\ Kararsızlık\ Durumu$$

Yatay düzlemdeki statik kararsız durumun gerekçeleri incelendiğinde, aracın arka bölümünde oluşan kuvvetin aracın basınç merkezini burun bölümüne yaklaştırıcı yönde etki yaptığı ve dolayısıyla basınç merkezinin ağırlık merkezinin önünde kalarak aracın yatay düzlemde statik kararsız bir yapıya büründüğü gözlemlenmiştir. Autosub aracı üzerinde yapılan doğrusal ve yatay statik stabilite incelemeleri sonucunda Autosub'ın doğrusal ve yatay olarak statik kararsız bir yapıda olduğu

belirlenmiştir. Bu durum yunuslama düzlemindeki bir seyir esnasında hücum açısının artması ile yunuslama momentinin doğrusal olarak artması ve sapma düzleminde yapılan bir seyir esnasında sapma açısının artması ile sapma momentinin azalması anlamına gelmektedir. Autosub hidrodinamik formuna benzer geometrilere sahip olan su altı araçlarının çoğu statik olarak kararsız yapıya sahiptirler. Bu statik kararsız yapının düzenlenmesi ve kararlı hale getirilmesi bu tip hidrodinamik formlara sahip su altı araçlarında pek mümkün değildir. Ancak bu araçların statik kararsızlık seviyelerinin azaltılması için, hidrodinamik formların arka gövde bölümlerinin eğimleri azaltılabilir. Bu sayede arka gövde bölümünde oluşan zıt yönlü hidrodinamik kaldırma kuvvetinin değeri azalacaktır ve hidrodinamik kuvvetlerin moment merkezi, aracın ağırlık merkezine doğru yaklaşacaktır. Statik kararsızlığın azaltılmasının bir başka yolu ise, aracın arka gövde bölümünde bulunan hareketli kontrol yüzeylerinin ve sabit kanatlarının yüzey alanlarının büyültülmesidir. Bu sayede sabit kanatlar ve kontrol yüzeyleri üzerinde oluşan hidrodinamik kaldırma kuvvetinin yönleri bileşke kuvvet ile aynı yönde olacak ve aracın hidrodinamik merkezi, ağırlık merkezine doğru yaklaşacaktır. Ancak bu hamleler dahi, aracın tam anlamıyla statik kararlı hale gelmesini sağlayamaz. Bu sebeplerden ötürü, su altı araçlarında dinamik sönümleme katsayıları ve hareketli kontrol yüzeyleri manevralar sırasında yeterli sönümleme kuvvetlerini oluşturamazlar ise, manevralar sırasında araç takla atabilir. Bu gibi durumlar ile karşılaşılmaması için aracın dinamik kararlı bir yapıda olması ve istenilen manevra kabiliyetlerini karşılayabilmesi beklemektedir. Autosub aracının stabilite konusunun çözümlenebilmesi ve manevra yapabilirliğinin belirlenebilmesi için aracın yatay ve düşey düzlemlerdeki manevra yapabilme karakteristikleri incelenmelidir.

10.1.2 Manevra kabiliyetinin incelenmesi

Bir su altı aracının stabilite karakteristiği hakkında kesin yorumlar yapılmadan önce kesinlikle dinamik stabilitesi ve manevra yapabilme kabiliyeti incelenmelidir. Dinamik stabilite bir aracın denge konumundaki hareketinin herhangi bir bozuntu ile bozulmasından sonra sergilenecek hareketin karakteristiği ile ilgilenir. Bu hareket birinci ve ya ikinci dereceden hidrodinamik türevlerin oluşmasına sebep olacak karakterde bir hareket olabilir. Aracın dinamik stabilitesinin var olabilmesi için denge konumunda seyir eden aracın, herhangi bir bozuntu ile karşılaşmasından belirli bir zaman sonra tekrar bir denge konumuna ulaşması eğiliminin olması

gerekmektedir. Nötr stabiliteye sahip olan bir araç ise, bozuntu karşısında denge konumunu sağlayacak yönde herhangi bir eğilim göstermediği gibi, bozuntunun etkisi ile denge konumundan giderek ıraksayan bir yapıya da bürünmeyecektir. Dinamik olarak kararsız bir araç ise denge konumunda seyrine devam ederken, bir bozuntu ile karşılaşması durumunda sahip olduğu denge konumundan giderek uzaklaşan karakteristikte bir hareket sergileyecektir. Autosub aracının statik kararsız bir yapıda olduğu önceki bölümde anlatılmıştı, bu bölümde ise Autosub aracının statik olarak kararsız hali ile manevra kabiliyeti incelenecektir. Autosub aracının manevra kabiliyetinin incelenebilmesi için önceki bölümlerde hesaplanmış olan lineer manevra katsayılarına ihtiyaç duyulacaktır. Autosub aracının manevra kabiliyetleri sapma manevrası ve yunuslama manevrası kabiliyetleri olmak üzere iki alt kategoride incelenecektir.

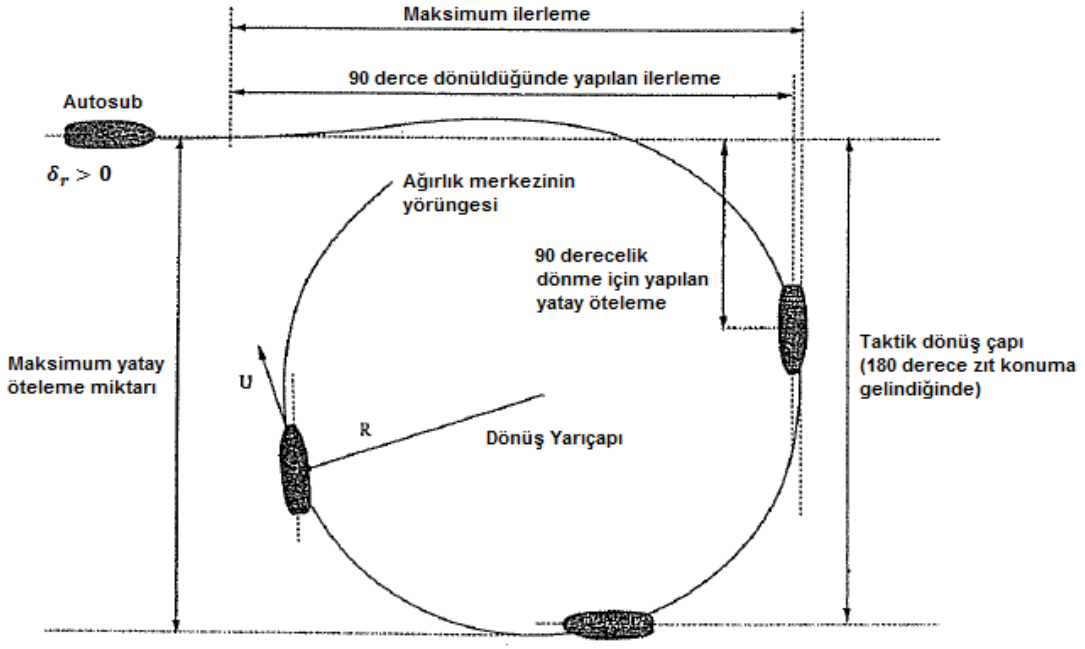
10.1.2.1 Sapma manevrası kabiliyetinin incelenmesi

Autosub aracının sapma manevrası kabiliyetinin incelenebilmesi için Bölüm 4.2'de türetilen hidrodinamik denklem setlerinden sapma momenti ve sapma kuvveti denklemleri lineerleştirilmek amacıyla, hidrodinamik türevlerin sadece birinci dereceden Taylor serisi açılımlarını içerecek şekilde düzenlenmiştir. Sapma manevra kabiliyetinin incelenebilmesi amacıyla, ivmesiz hareket eden Autosub aracının R dönüş yarıçapındaki bir manevrayı $+\delta_r$ düşey kontrol yüzeyi komutu ile r açısal hızında ve U doğrusal hızında yaptığını varsayalım. Bu manevra koşulu Autosub aracının ivmesiz manevra yaptığı bir denge koşuludur. Sapma düzleminde yapılan manevra sırasında denge koşullarını sağlayan lineerleştirilmiş kuvvet ve moment denklemlerini aşağıdaki gibi yazabiliriz [24].

$$Y_v v + Y_{\delta r}\delta r + Y_r r = m(u_0 r) \qquad \textbf{(10.7)}$$

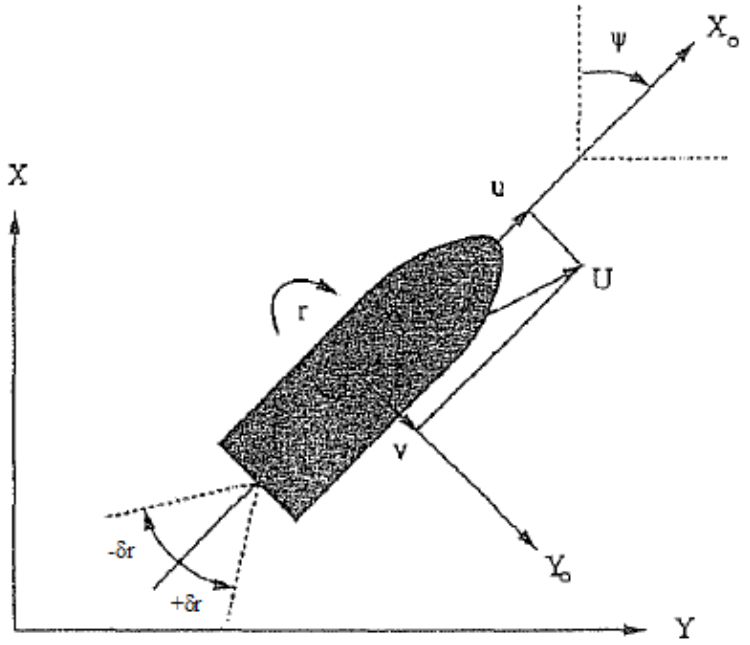
$$N_v v + N_{\delta r}\delta r + N_r r = 0 \qquad \textbf{(10.8)}$$

Manevra hareketinin daha iyi anlaşılabilmesi için üzerinde çalışılacak manevra hareketinin görseli Şekil 10.5'te gösterilmiştir [24].



Şekil 10.5 : Autosub Aracının sapma manevrası [24].

Bu projede kullanılan notasyona göre pozitif düşey kontrol yüzeyi sapmasının ($+\delta_r$) pozitif sapma momenti (+N) ve negatif sapma kuvveti (-Y) oluşturduğu kabul edilmektedir. Bu kapsamda dinamik olarak kararlı yapıdaki bir su altı aracının $+\delta_r$ komutu ile +r açısal hızına sahip olması ve karşılığında aracın –Y kuvvetine maruz kalarak üzerinde +N momentinin oluşması beklenir.



Şekil 10.6 : Pozitif $+\delta_r$ komutu ile sapma manevrasının notasyonu [24].

Yani dinamik kararlı bir su altı aracının sapma momentinin ve sapma kuvvetinin yatay kontrol yüzeyi (δ_r) ve sapma doğrusal(v) değişimlerine göre türevlerinin işaretleri aşağıdaki gibi olur [24].

$$N_{\delta r} > 0 \quad \text{ve} \qquad N_v < 0$$

$$Y_{\delta r} < 0 \quad \text{ve} \qquad Y_v < 0$$

Denge koşulundaki manevra için yazılan yukarıdaki lineerleştirilmiş kuvvet ve moment eşitlikleri kullanılarak $^{r}/_{\delta r}$ eşitliğini sağlayacak forma dönüştürülürse,

$$\frac{r}{\delta_r} = -\frac{Y_v N_{\delta_r} - N_v Y_{\delta r}}{Y_v N_r - N_v(Y_r - mu_0)} \qquad \textbf{(10.9)}$$

Şekil 10.6'da anlatılan notasyon gereği sapma düzleminde manevra yapan bir su altı aracının $^{r}/_{\delta r}$ işleminin sonucunun pozitif olması gerekmektedir. Dolayısıyla, $-(Y_v N_{\delta_r} - N_v Y_{\delta r})$ işleminin sonucunun pozitif olduğuna dikkat edilirse, su altı aracının sapma düzleminde istenilen manevrayı yapabilmesi için aşağıdaki koşul sağlanmalıdır.

Sapma düzleminde manevra yapabilme koşulu [24];

$$Y_v N_r - N_v(Y_r - mu_0) > 0 \qquad \textbf{(10.10)}$$

Autosub aracın 10 Knot seyir hızı ile farklı sapma açıları ve farklı sapma açısal hızlarındaki seyir koşulları için yapılan HAD analizlerinin sonuçları Autosub'ın altı serbestlik dereceli veri tabanında bulunmaktadır. Bu seyir koşullarında oluşan sapma kuvveti ve momenti değerlerinin sapma açısal hızlarına ve sapma doğrusal hızlarına göre değişimlerinin grafikleri çizdirildiğinde, elde edilen eğrilerin eğimleri aşağıdaki sonuçları vermektedir. Bu sonuçlar aynı zamanda sapma düzlemindeki birinci dereceden lineer manevra katsayılarının boyutlaştırılmış halleridir.

$$N_r = \text{-}30323{,}4\ \left(\frac{Nm.s}{rad}\right) \qquad \text{ve} \qquad N_v = -3996{,}66\ (N.s)$$

$$Y_r = 9043{,}212\ \left(\frac{N.s}{rad}\right) \qquad \text{ve} \qquad Y_v = -3763{,}49\ \left(\frac{N.s}{m}\right)$$

Ayrıca Autosub'ın sapma manevrası yapabilirliğinin belirlenmesi için yapılan hesaplamalarda aracın sapma manevrası yaparken sahip olduğu sapma açılarının küçük değerlere sahip olduğu varsayılarak aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

$$U = u_0 \times cos\beta$$

$$\beta \cong 0$$

$$cos\beta \cong 1 \; ve \; U = u_0$$

m kütleli Autosub aracı için yukarıda değerleri verilen türevlerin sonuçları kullanılarak sapma manevrası için yapılan kabuller eşliğinde, sapma düzlemindeki manevra kabiliyeti incelenirse,

$$Y_v N_r - N_v(Y_r - mu_0) = 117367876{,}9 > 0$$

Autosub aracının sapma düzleminde kararlı bir şekilde sapma manevrası yapabileceği görülür.

10.1.2.2 Yunuslama manevrası kabiliyetinin incelenmesi

Autosub aracının düşey düzlem üzerinde yunuslama manevrası kabiliyetinin incelenebilmesi için Bölüm 4.2'de türetilen hidrodinamik denklem setlerinden yunuslama momenti (M) ve düşey öteleme kuvveti (Z) denklemleri lineerleştirilmek amacıyla, hidrodinamik türevlerin sadece birinci dereceden Taylor serisi açılımlarını içerecek şekilde düzenlenmiştir. Yunuslama manevrasının incelenebilmesi amacıyla, ivmesiz hareket eden Autosub aracının R dönüş yarıçapında yapacağı yunuslama düzlemindeki bir manevrayı $+\delta e$ yatay kontrol yüzeyi komutu ile q yunuslama açısal hızında ve w doğrusal hızında yaptığını varsayalım. Bu manevra koşulu Autosub'ın ivmesiz manevra yaptığı bir denge koşulu olduğundan aracın üzerinde ek su katsayıları oluşmayacaktır. Yunuslama düzleminde senaryolanan manevra koşulunda yerçekimi ve hidrostatik kaldırma kuvvetlerinin olmadığı kabul edilmiştir. Yunuslama düzlemindeki manevra sırasında denge koşullarını sağlayan lineerleştirilmiş kuvvet ve moment denklemlerini aşağıdaki gibi yazabiliriz [24].

$$Z_w w + Z_{\delta e}\delta e + Z_q q = -m(u_0 q) \qquad \textbf{(10.11)}$$

$$M_w w + M_{\delta e}\delta e + M_q q = 0 \qquad \textbf{(10.12)}$$

Bu projede kullanılan notasyona göre pozitif yatay kontrol yüzeyi sapmasının $(+\delta_e)$, negatif yunuslama momenti (-M) ve pozitif düşey öteleme kuvveti (-Z) oluşturduğu görülmektedir. Bu kapsamda, yunuslama düzleminde dinamik olarak kararlı yapıdaki bir su altı aracının $+\delta_e$ komutu ile $-q$ açısal hızına sahip olması beklenir. Yani dinamik kararlı bir aracın yunuslama momentinin ve düşey öteleme kuvvetinin düşey

kontrol yüzeyi ve düşey öteleme hızı değişimlerine göre birinci dereceden türevleri aşağıdaki gibi olur [24].

$$M_{\delta e} < 0 \quad \text{ve} \quad M_w > 0$$

$$Z_{\delta e} < 0 \quad \text{ve} \quad Z_w < 0$$

Denge koşulundaki yunuslama manevrası için yazılan yukarıdaki denklem seti $^{q}/_{\delta e}$ eşitliğini sağlayacak forma dönüştürülürse, aşağıdaki denklem elde edilir [24].

$$\frac{q}{\delta_e} = -\frac{Z_w M_{\delta_e} - M_w Z_{\delta e}}{Z_w M_q - M_w (Z_q + m u_0)} \qquad \textbf{(10.13)}$$

Yatay manevra kabiliyetinin incelenmesinde yapılan küçük hücum açısı kabulü bu bölümde de yapılmıştır. Yukarıda anlatılan notasyon gereği yunuslama düzleminde $+\delta_e$ komutu ile manevra yapan bir aracın $^{q}/_{\delta e}$ işleminin sonucunun negatif olması gerekmektedir. Dolayısıyla, yukarıda anlatılan türevlerin işaretlerinden ötürü

$Z_w M_{\delta_e} - M_w Z_{\delta e} > 0$ olduğuna dikkat edilirse, Autosub aracının yunuslama düzleminde yunuslama manevrası yapabilmesi için aşağıdaki koşul sağlanmalıdır.

Yunuslama düzleminde manevra yapabilme koşulu [24];

$$Z_w M_q - M_w (Z_q + m u_0) > 0 \qquad \textbf{(10.14)}$$

Autosub aracın 10 Knot seyir hızı ile farklı hücum açıları ve farklı yunuslama açısal hızlarındaki seyir koşulları için yapılan HAD analizlerinin sonuçları Autosub'ın altı serbestlik dereceli veri tabanında bulunmaktadır. Bu seyir koşullarında oluşan düşey öteleme kuvveti ve yunuslama momenti değerlerinin yunuslama açısal hızlarına ve düşey öteleme hızlarına göre değişimlerinin grafikleri çizdirildiğinde, elde edilen eğrilerin eğimleri aşağıdaki sonuçları vermektedir. Bu sonuçlar aynı zamanda yunuslama düzlemindeki birinci dereceden lineer manevra katsayılarının boyutlaştırılmış halleridir.

$$M_q = \text{-}30323{,}4 \quad \text{ve} \quad M_w = 3996{,}66$$

$$Z_q = -9043{,}212 \quad \text{ve} \quad Z_w = -3763{,}49$$

Yukarıda değerleri verilen türevlerin sonuçları kullanılarak Autosub'ın küçük hücum açılarında seyir yaptığı kabulü eşliğinde yunuslama düzlemindeki manevra kabiliyeti incelenirse,

$$Z_w M_q - M_w(Z_q + mu_0) = 117367876{,}9 > 0$$

Autosub aracının sapma düzleminde olduğu gibi yunuslama düzleminde de istenilen manevra kabiliyetini sergileyebilecek karakteristikte olduğu görülür.

Bir önceki bölümde Autosub aracının statik stabilitesi incelendiğinde, Autosub'ın statik olarak kararsız bir yapıda olduğu belirlenmişti. Bu aracın manevra hareketlerini kararlı bir şekilde yapabilmesi için dinamik katsayılarının statik katsayıları sönümleyici etki yapması ve aracın statik olarak kararsız olsa bile, dinamik olarak kararlı bir yapıda olması beklenmekteydi. Bu bölümde yapılan çalışmalar sonucunda beklentilerin karşılandığı ve Autosub aracının genel hidrodinamik karakteristiğinin kararlı bir yapıda olduğu ve istenilen düzlemlerde manevra yapabileceği görülmüştür. Bu sayede, su altında hareket eden Autosub aracının sahip olduğu manevra katsayılarının sönümleyici etkisi sayesinde Autosub aracı manevra hareketlerini stabil bir şekilde yapabilecektir.

10.2 Performans Hesaplamaları

Su altı araçlarının performans hesaplamalarının detaylı bir şekilde yapılabilmesi için, seyir koşullarının, ortam şartlarının ve aracın alt sistemleri ile beraber sistem seviyesindeki modelinin simülasyon ve benzetim ortamlarında analizlerinin yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda yapılan en sağlıklı performans analizleri, Matlab Simulink gibi benzetim programlarında kurulan modelleme ve benzetim çalışmaları ile yapılmaktadır. Kurulan bu simülasyon alt yapılarında su altı aracının kendi modeli, hareket modeli ve ortam şartlarını simlerden dünya benzetim modeli benzetimi yapılarak aracın simülasyon ortamında belirli manevra senaryolarını yerine getirmesi sağlanarak, performans hesaplamaları yapılır. Yapılan performans analizleri sayesinde tasarlanan aracın manevra kabiliyetleri belirlenebilir ve aracın tasarım gereksinimlerinin karşılayabilirliği kontrol edilebilir. Simülasyon ve benzetim çalışmalarında, bu tez çalışmasında anlatılan ve hesaplanan hidrodinamik katsayılar kullanılarak aracın hidrodinamik modeli kurulur ve kurulun hidrodinamik model kapsamında, hidrodinamik katsayılar sisteme beslenerek araç simülasyon

ortamında hareket ettirilir. Aracın hareketini belirleyen ve etkileyen gerek seyir dinamiğinde, gerek alt sistemlerde gerekse dünya şartlarında birçok değişken olduğu için, bu değişkenlerin tanımlanmadan yapıldığı performans hesaplamaları çok sağlık olmayacaktır. Ancak Matlab Simulink tabanlı benzetim modelleri üzerinden Autosub aracının performans analizlerinin yapılması bu tez kapsamı içinde olmadığından, bu çalışmada Autosub aracının performans analizleri çok temel seviyede yapılmış ve dönüş yarıçapı incelenmiştir. Bu kapsamda Autosub aracına belirli bir kontrol yüzeyi komutu verildikten sonra aracın hangi dönüş yarıçapı ile manevra yapacağa belirli kabuller çerçevesinde hesaplanmıştır.

10.2.1 Dönüş yarıçapının hesaplanması

Bu bölümde Autosub su altı aracının zamandan bağımsız olarak hareket ettiği seyir koşulları altında, üzerinde herhangi bir çevresel faktörün olmadığı ve akuple hidrodinamik terimlerin oluşmadığının varsayıldığı şartlarda dönüş yarıçapı hesaplamaları yapılacaktır. Bu kapsamda Autosub'ın belirli bir kontrol yüzeyi komutu ile hareket ettiğinde yapacağın manevranın dönüş yarıçapı hesaplamaları yapılmıştır. Yerçekimi ve hidrostatik kaldırma kuvveti etkilerinin performans hesaplamalarına etkisinin olmaması için bu bölümde yapılacak çalışmada Autosub aracının sapma düzleminde manevra yaptığı kabul edilmiştir. Yapılan kabuller çerçevesinde Autosub'ın dönüş yarıçapının hesaplanması için aşağıdaki yöntem izlenmiştir.

Dönüş yarıçapı hesaplamaları yatay dinamik stabilite hesaplamalarında kullanılan $r/_{\delta r}$ formülü üzerinden yapılacaktır [24].

$$\frac{r}{\delta_r} = -\frac{Y_v N_{\delta_r} - N_v Y_{\delta r}}{Y_v N_r - N_v (Y_r - m u_0)} \qquad \textbf{(10.15)}$$

Bu formül kullanılarak araca herhangi bir δr düşey kontrol yüzeyi sapması ile manevra komutu verildiğinde aracın hangi sapma açısal hızı ile manevra yapacağı hesaplanabilir.

$$r = -\frac{Y_v N_{\delta_r} - N_v Y_{\delta r}}{Y_v N_r - N_v (Y_r - m u_0)} \delta_r \qquad \textbf{(10.16)}$$

Bu bölümde yapılan çalışmalarda aracın sapma manevrası yaparken sahip olacağı sapma açısının (β) çok küçük olduğu kabulü üzerinden,

$$U = u_0 \times cos\beta$$

$$\beta \cong 0$$

$cos\beta \cong 1\ ve\ U = u_0$ kabulü yapılmıştır.

U burada aracın seyir hızını ve *m* aracın kütlesini ifade etmektedir. Sapma manevrası sırasında aracın üzerinde oluşan sapma kuvveti ve momenti değerlerinin aracın sahip olduğu sapma açısal hızına, sapma doğrusal hızına ve düşey kontrol yüzeyi sapma açısına göre değişim grafikleri Bölüm 9.1 ve 9.2'de verilmişti. Bu grafiklerdeki doğrusal değişimlerin eğimleri alınarak ve yukarıdaki formülde yerlerine koyularak bir δ_r komutu ile sahip olacağı r açısal hızı hesaplanabilir. Autosub'ın 10 Knot seyir hızı ile hareket ederken, 10 derece δ_r komutu ile üzerinde oluşacak kuvvet ve moment değerlerinin, bu manevra sırasında değişken olan terimlere göre türevleri aşağıda verilmiştir.

N_r = -30323,4 $(\frac{Nm.s}{rad})$ $\quad N_v = -3996{,}66\ (N.s)$ $\quad N_{\delta r} = +20923{,}51\ (\frac{N.m}{derece})$

$Y_r = 9043{,}212\ (\frac{N.s}{rad})$ $\quad Y_v = -3763{,}49\ (\frac{N.s}{m})$ $\quad Y_{\delta r} = -7119{,}31\ (\frac{N}{derece})$

Bu projede kullanılan eksen takımında göre su altı araçları için her zaman aşağıdaki durumlar geçerlidir. Görüldüğü gibi Autosub için HAD yöntemler kullanılarak hesaplanmış aşağıdaki türevlerin işaretleri beklentileri karşılamaktadır.

$$N_{\delta r} > 0 \quad \text{ve} \quad Y_{\delta r} < 0$$

Yukarıda verilen sapma açısal hızı formülü üzerinden 10 Knot hızında seyir yapan Autosub'ın 10 derece δ_r ile komutu yapacağı sapma manevrası için sahip olacağı sapma açısal hızı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$r = -\frac{-3763{,}49 \times 20923{,}51 - (-3996{,}66 \times -7119{,}31)}{-3763{,}49 \times (-30323{,}4) - (-3996{,}66) \times (9043{,}212 - 1600 \times 5{,}1444)} \times (10 \times \frac{\pi}{180})$$

Bu işlem sonucunda,

$r = 0{,}15941\ rad/s$ bulunur.

Sapma açısal hızı hesaplanan aracın, 10 Knot seyir hızı ile hareket ederken sapma manevrasını yapabilmesi için sahip olması gereken dönme yarıçapı aşağıdaki gibi hesaplanır [24].

$$Dönme\ Yarıçapı\ (R) = \frac{Seyir\ Hızı\ (U)}{Aracın\ Sapma\ Açısal\ Hızı\ (r)} \qquad \textbf{(10.17)}$$

$$Dönme\ Yarıçapı\ (R) = \frac{5{,}1444\left(\frac{m}{s}\right)}{0{,}15941\left(\frac{rad}{s}\right)} = 32{,}27\ m \quad \text{olarak bulunur.}$$

Görüldüğü gibi bu bölümde çok temel seviyede ve birçok kabul altında, düşey kontrol yüzeyi sapması komutu sonucunda Autosub aracının yapacağı sapma manevrasının dönüş yarıçapı hesaplamaları yapılmıştır. Bu hesaplamalar üzerinden su altı araçlarının belirli manevraları için sahip oldukları dönüş yarıçapları hakkında bilgi edinilebilse de, detaylı manevra analizleri ve performans hesaplamaları için Matlab Simulink vb. yazılımlarında kurulmuş seyir benzetim modelleri kullanılarak simülasyon ve modelleme çalışmaları yapılmalıdır. Su altı araçlarının performans hesaplamaları ve manevra kabiliyetleri hakkında detaylı bilgiler, ölçekli araç modellerinin durgun su ortamında testi yapılmadan veya araçlara gerçek seyir yaptırılmadan ancak bu detaylı simülasyon çalışmaları sayesinde elde edinilebilir. Simülasyon ve benzetim çalışmalarının yapılabilmesi için en önemli girdi ise, bu tez kapsamında anlatılan hidrodinamik katsayılardır. Hidrodinamik katsayılar bir aracın tasarım ve geçerleme süreçlerinde hayati önem taşımaktadırlar.

11. SONUÇLAR VE YORUMLAR

11.1 Yapılan Çalışmalar Sonucunda Elde Edilen Sonuçlar ve Yorumlar

Günümüz teknolojisinde insansız araçların ve robotların kullanımı her sektörde artarken, su altı dünyasında da insansız ve otonom kontrollü araçların kullanımı giderek önem kazanmaktadır. Su altında ulaşılması zor bölgelere ulaşılarak bilimsel çalışmaların yapılması, riskli askeri bölgelerde insan faktörünü ortaya sokmadan incelemelerin yapılması ve ticari açıdan kullanılacak bir maddenin su altı araştırmalarının yapılması gibi farklı alanlarda otonom kontrol edilebilen insansız su altı araçları kullanılmaktadır. Otonom kontrollü su altı araçlarının kullanımının geçmişi günümüzden çok eskiye dayanmadığından bu tez çalışmasında öncelikle, otonom su altı araçlarının tanımı, görevleri, kullanım amaçları ve tarihçesi üzerinde durulmuştur. Tanımı verilen otonom su altı araçlarının hangi amaçlar ile kullanıldığından bahsedilmiş ve örnek otonom su altı araçları tanıtılmıştır. Bu tez çalışmasında model olarak kullanılacak su altı aracı Autosub otonom su altı aracı olduğundan, Autosub su altı aracının geometrik özellikleri, görev tanımları ve sahip olduğu alt sistemler ve teknik özellikleri detaylı bir şekilde ayrı bir bölüm olarak anlatılmıştır. Su altında hareket eden araçlar, hava ortamında hareket eden araçlara göre çok daha karmaşık hareket denklemlerine sahip olduklarından, su altı araçlarının tabii oldukları hareket denklemlerinin belirlenmesi amacıyla, statik ve dinamik hidrodinamik katsayılardan oluşan altı serbestlik dereceli hareket denklemleri oluşturulmuştur. Bu hareket denklemleri doğrusal değişim grafiğine sahip birinci dereceden türevlerin yanı sıra, doğrusal olarak değişmeyen birçok ikinci dereceden türeve ve zamanla değişen terimlerin türevlerine sahiptir. Özellikle farklı açısal hızların birbirleriyle kombinasyonlarından oluşan hareketler sonucunda oluşan ikinci dereceden türevlerin hesaplanması ve modellenmesi oldukça zordur. Su altı sistemleri sahip oldukları bu gibi birçok doğrusal olmayan ve akuple terimler sebebi ile modellenmesi zor sistemlerdir. Bu tez çalışmasında hangi seyir koşulları için hidrodinamik analizlerin yapılacağına ve hangi hidrodinamik katsayıların hesaplanacağına altı serbestlik derecesinde oluşturulan hidrodinamik hareket

denklem setleri referans alınarak karar verilmiştir. Autosub gibi su altı araçlarının su altı hareket denklem setlerinde bulunan hidrodinamik katsayılarının belirlenmesi amacıyla kullanılan yöntemler su altı test düzenekleri, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemleri ve ampirik yöntemler olarak üç ana bölüme ayrılmış ve her biri ayrı bölüm olacak şekilde kendi içinde detaylıca incelenmiştir. Su altı test düzeneklerinin her proje için kullanılamamasının ekonomik ve teknik sebeplerinden bahsedilerek, bu projede su altı araçlarının hidrodinamik parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan HAD ve ampirik yöntemlerden bahsedilmiştir. Kullanılan HAD yöntemlerinin güvenilirliğinin belirlenmesi amacıyla DARPA denizaltı ve Autosub otonom su altı aracı'na ait denek taşı çalışmaları icra edilmiştir. Bu çalışmalar sayesinde kullanılan statik ve dinamik HAD hesaplama modellerinin güvenilirlik seviyeleri belirlenmiş ve yeni HAD hesaplama yöntemleri geliştirilmiştir. Geliştirilen HAD yöntemleri kullanılarak, zamandan bağımsız hareket eden Autosub su altı aracının doğrusal veya rotasyonel hareketleri sonucunda üzerinde oluşan hidrodinamik kuvvet ve moment değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler incelendiğinde su altı araçlarının statik hidrodinamik değerlerinin çoğunlukla seyir koşullarındaki değişkenlere göre doğrusal değiştiği gözlemlenmiştir. Aynı şekilde dinamik hidrodinamik analizler sonucunda elde edilen kuvvet ve moment değerlerinin seyir koşullarında ki değişkenlere göre türevlerinin de doğrusal değişim rejimine sahip oldukları sonucuna varılmıştır. Doğrusal değişimin oluştuğu bu hidrodinamik terimler boyutsuzlaştırma parametreleri ile boyutsuzlaştırılarak statik ve dinamik hidrodinamik katsayılar elde edilmiştir. Bu noktada ilgi çekici olan nokta şudur ki, birinci dereceden manevra türevlerini içeren dinamik hidrodinamik katsayılar seyir hızından bağımsızdırlar. Bu sayede herhangi bir hız değeri için bilinen doğrusal manevra katsayıları, farklı hızlar için kullanılabilir ve Autosub su altı aracının seyir dinamiği çeşitli hızlarla da incelenebilir.

HAD yöntemleri ile hesaplanan hidrodinamik katsayıların haricinde, su altında ivmeli hareket yapan araçların üzerinde oluşan ek su katsayıları da mevcuttur. Dolayısıyla yapılan tez çalışmasında ek su terimlerinin fiziksel tanımları üzerinde durulmuş ve su altı araçlarının ek su katsayılarının hesaplanması için yeni ampirik yöntemler geliştirilmiştir. Geliştirilen bu ampirik yöntemler araçların geometrik özellikleri ile değişen ancak seyir koşullarından bağımsızdır. Autosub aracının ek su

katsayılarının da hesaplanması ile aracın altı serbestlik dereceli hidrodinamik veri tabanı büyük oranda hazırlanmıştır. Bu tez kapsamında hesaplanamayan hidrodinamik katsayılar, hesaplanmasının HAD analiz yöntemleri veya ampirik yöntemler ile sağlıklı bir şekilde yapılamadığı akuple dinamik hidrodinamik katsayılardır. Sistem dinamiği hesaplamalarına akuple katsayıların da dâhil edilebilmesi için, su altı araçlarının su altı test düzeneklerinde model testlerinin gerçekleştirilmesi sonucunda elde edilen kuvvet ve moment değerlerinin sistem tanılama çalışmaları ile ayrıklaştırılarak akuple hidrodinamik katsayıların hesaplanması gerekmektedir. Geliştirilen HAD analiz yöntemleri ve ampirik yöntemler kullanılarak hesaplanabilen hidrodinamik katsayılar, tez çalışmasında verilen hidrodinamik denklem setlerindeki tüm katsayıları kapsamasa da, aracın stabilite ve performans karakteristiklerinin belirlenebilmesi için yeterli seviyededir. Böylece tez çalışmasında oluşturulan altı serbestlik dereceli hidrodinamik veri tabanı kullanılarak Autosub aracının statik stabilite ve dinamik stabilite hesaplamaları yapılmıştır. Hesaplamalar sonucunda Autosub aracının statik olarak kararsız ancak dinamik olarak kararlı bir yapıda olduğu gözlemlenmiştir. Autosub aracı sahip olduğu geometrik özellikler sebebi ile statik olarak kararsız bir hareket rejimi sergilese de, su altındaki hareketler sonucunda oluşan terimlerin sönümleyici etkileri sayesinde dinamik olarak kararlı bir yapıda seyirlerini gerçekleştirmektedir. Stabilite çalışmaları yapılan bir aracın performans hesaplamaları ile belirli seyir koşulları için dönme yarıçapı hesaplanmıştır. Su altı araçlarının performans hesaplamalarının ve dinamik stabilite hesaplamalarının tam manasıyla yapılabilmesi için, altı serbestlik dereceli hareket denklem setlerini içeren sistem simülasyon ve modelleme çalışmalarının yapılması ve simülasyon ortamında diğer alt sistem parametreleri de analizlere eklenerek çeşitli manevra senaryolarında seyir benzetim analizlerin yapılması gerekmektedir. Ancak yapılan bu performans analizleri sayesinde su altı araçlarının hidrodinamik performans ve manevra kabiliyetleri tam anlamıyla hesaplanabilir. Tasarımı yapılan bu su altı aracının tasarım gereksinimlerinin karşılanabilirliğinin kontrol edilmesi için yukarıda bahsedilen sistem simülasyonu ve modelleme çalışmaları yapılmalıdır. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar, sistem simülasyon ve modelleme çalışmalarının hidrodinamik modülünde kullanılacak hidrodinamik dünyasını oluşturmaktadır. Sistem gereksinimlerinin karşılanabilirliğinin incelendiği simülasyon çalışmaları bu tez kapsamında yapılmamıştır.

11.2 Tez Kapsamında Yapılan Çalışmaların Hidrodinamik Dünyasında Katkıları

Günümüzde insan faktörünün yerini otonom kontrol sistemleri aldığından gerek havada, gerek karada, gerekse su altında insansız hareket eden araçların yoğunluğu giderek artmaktadır. Bu tez çalışmasında su altında hareket eden bir otonom su altı aracı üzerinde çalışılmıştır. Su altında hareket eden denizaltı veya otonom su altı araçları gibi araçların otopilot sistemlerinin, güdüm ve navigasyon sistemlerinin tasarlanabilmesi için tüm hidrodinamik etkilerin belirlenmesi, ayrıştırılması, hesaplanması ve tasarıma dâhil edilmesi gerekmektedir. Ancak su altında hareket eden araçların seyir dinamiği, havada hareket eden araçların seyir dinamiğine göre oldukça farklılık göstermektedir. Suyun sahip olduğu yoğunluğun havanın yoğunluğunun yaklaşık bin katı olması ve suyun viskoz özelliklerinin havaya göre çok daha baskın olması sebebi ile havada ihmal edilebilen özellikler, su altında ihmal edilememekte ve seyir dinamiğini fazlasıyla etkilemektedir. Bu ayırt edici özelliklerin başında, tezde verilen hidrodinamik denklem setlerinden de görülebileceği üzere ek su terimleri ve akuple hidrodinamik terimler gelmektedir. Bu terimler sahip oldukları değerler neticesiyle sistem dinamiğini oldukça etkilemekte, dolayısıyla ihmal edilemeyecek seviyelerdedir. Bu kapsamda tasarım gereksinimlerini karşılayabilecek bir su altı aracı tasarlayabilmek için statik hidrodinamik katsayılardan, doğrusal olmayan dinamik hidrodinamik katsayılara kadar tüm hidrodinamik katsayıları içeren hareket denklemlerinin belirlenmesi ve tasarımı yapılan aracın hidrodinamik karakteristiğinin ortaya çıkartılması gerekmektedir. Hidrodinamik karakteristiğinin ortaya çıkartılması için ise aracın sahip olduğu tüm statik ve dinamik hidrodinamik katsayıların hesaplanması gerekmektedir.

Su altı araçlarının tasarım aşamasındaki önemi aşikâr olan hidrodinamik katsayıların hesaplanması süreci bu tez çalışmasında Autosub aracı için gerçekleştirilmiştir.

Statik ve dinamik hidrodinamik katsayıların hesaplanması için en güvenilir yöntem su altı test düzeneklerinin kullanılması olsa da, imkan yetersizliklerinden ötürü bu tez çalışmasında hidrodinamik katsayıların hesaplanması için yeni geliştirilen hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemleri ve ampirik yöntemler kullanılmıştır. Geliştirilen yöntemler kullanılarak Autosub otonom su altı aracının

statik ve dinamik hidrodinamik katsayıları hesaplanmış, altı serbestlik derecesinde hidrodinamik veri tabanı üretilmiş ve üretilen veri tabanı üzerinden aracın stabilite ve performans hesaplamaları yapılmıştır. Bu sayede aracın otopilot ve güdüm kontrol tasarımları için gerekli hidrodinamik verileri üretilmiş olur.

Üretilen hidrodinamik verilerin yüksek doğruluk ile hesaplandığından emin olmak ve hesaplanan hidrodinamik katsayıların güvenilirlik seviyelerini belirlemek amacıyla tezde geliştirilen hesaplama yöntemlerinin doğrulama çalışmaları yapılmıştır. Bu kapsamda deneysel verileri mevcut olan DARPA denizaltı modelinin ve Autosub su altı aracının HAD ortamında analizleri yapılmış ve sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırılarak yeni geliştirilen analiz modelleri doğrulanmıştır. Doğrulanan analiz modelleri kullanılarak Autosub aracının altı serbestlik dereceli hidrodinamik veri tabanı üretilmiştir. Ancak bu veri tabanı akuple hidrodinamik katsayıları içermemektedir. Akuple hidrodinamik katsayıların hesaplanabilmesi için dünyada düzlemsel hareket mekanizması, döner kol mekanizması ve konileme hareket mekanizması gibi su altı test yöntemleri kullanılmaktadır. Ancak bu tez çalışması kapsamında sadece döner kol mekanizması için dinamik HAD analiz modeli geliştirildiğinden diğer su altı test yöntemleri ile hesaplanan akuple hidrodinamik katsayılar bu tezde hesaplanamamıştır. Çünkü doğrulanamayan bir analiz modeli ile hesaplanan değerlerin güvenilirlik seviyesi bilinemeyeceğinden, doğrulanmayan analiz modelleri ile yapılan HAD analizlerinin gerçekçi tasarımlar için kullanılabileceği söylenemez.

Görüldüğü gibi su altı araçlarının hidrodinamik karakteristiklerinin belirlenmesi, su altı dünyasının sahip olduğu özgün özellikler sebebi ile çok önemli ve bir o kadar da zordur. Su altı araçlarının hidrodinamik karakteristiklerinin belirlenmesi için en güvenilir yöntemler su altı test yöntemleri olsa da, bu test düzenekleri imkan yetersizliklerinden ötürü her su altı aracının tasarımı için kullanılamamaktadır. Su altı test düzeneklerinin kullanılmadığı durumlarda alternatif hesaplama yöntemlerine başvurulmakta ve hidrodinamik tasarımlar alternatif hesaplama yöntemlerinden hesaplanan veriler ile yapılmaktadır. Alternatif hesaplama yöntemlerinin geliştirilmesi amacıyla ve bu tez çalışmasında Autosub aracının statik ve dinamik hidrodinamik katsayılarının hesaplanması için yeni HAD analiz yöntemleri ve ampirik yöntemler geliştirilmiştir. Geliştirilen bu hesaplama yöntemleri, test düzenekleri ile yapılan tasarımlar kadar güvenilir olmasa da test imkânlarının

olmadığı durumlarda tercih edilebilir yöntemlerdir. Bu kapsamda yapılan test çalışmasında da Autosub aracının hidrodinamik karakteristiği su altı test imkanları kullanılmadan, hesaplamalı ve ampirik yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Bu tez çalışmasında kullanılan statik ve dinamik HAD hesaplama yöntemleri su altı araçları için tasarlandığından ve su altı dünyası için özgünleştiğinden Autosub aracının haricindeki farklı su altı araçları için de güvenilir bir şekilde kullanılabilecektir. Özetle bu tez kapsamında, su altı araçlarının sahip oldukları statik ve dinamik birçok hidrodinamik katsayının hesaplanmasında ve hidrodinamik karakteristiğinin belirlenmesinde kullanılabilecek yeni analiz modelleri geliştirilmiş ve hidrodinamik dünyasına sunulmuştur. Daha detaylı hidrodinamik karakteristik analizleri için mutlaka su altı test düzeneklerinin kullanılması gerekmektedir.

11.3 Sonsöz

Bir uçak mühendisi olarak yaptığım bu lisansüstü tez çalışmasında hidrodinamik dünyasının inceliklerini, zorluklarını, havacılık ile aralarında olan farkları ve güzel yanlarını inceleme fırsatım oldu. Hidrodinamik konusunda yaptığım çalışmalar sonucunda edindiğin izlenimleri bu tez kapsamında paylaşma imkânı buldum. Bu kapsamda yapılan tez çalışmasında öncelikle su altında hareket eden araçlar için kullanılması gereken hidrodinamik denklem setleri tanıtıldı. Hidrodinamik hareket denklemi setlerinin havacılıkta kullanılan hareket denklemi setleri ile aralarında hareket serbestlik dereceleri bakımından benzer tarafları olsa da, su altı için olan hareket denklemlerinin daha karmaşık olduğunu ve birçok ikinci dereceden çapraz türevleri içerdiğini gördüm ve bu konuyu tez çalışmamda anlattım. Bir su altı aracının istenilen tasarım ihtiyaçlarına karşılık verebildiğinin bilgisayara ortamında incelenmesi için sistem benzetim ve modelleme çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Sistem dinamiği simülasyonlarının yapılabilmesi için ise hidrodinamik denklem setinde bulunan hidrodinamik katsayıların hesaplanması gerekmektedir. Dolayısıyla tez çalışmasında statik ve dinamik hidrodinamik katsayıları hesaplamak için kullanılabilecek yöntemlerden bahsedilmiştir. Bu projede hesaplamalı akışkanlar dinamiği analiz yöntemleri ve ampirik yöntemler kullanarak hidrodinamik hareket denklem setinde bulunan katsayıların çoğu hesaplanmaya çalışılmıştır. Bu kapsamda kullanılan hesaplama modellerinin güvenilirlik seviyelerini göstermek için, denek taşı dokümanlarını kullanarak analiz modeli

doğrulama çalışmaları yapılmış ve sonunda su altı araçlarının statik ve bazı dinamik hidrodinamik katsayılarını hesaplamak için kullanılan hesaplama modellerini doğrulanmıştır. Havacılıkta akuple terimlerin olmaması sebebi ile aerodinamik veri tabanlarının üretilmesi için ampirik yöntemler daha yoğunlukla kullanılabilirken, hidrodinamik konusunda ampirik yöntemler yetersiz kalmaktadır. Dolayısıyla doğrulaması yapılan HAD hesaplama modelleri kullanılarak Autosub otonom su altı aracının altı serbestlik dereceli hidrodinamik veri tabanını üretilmiştir. Üretilen altı serbestlik dereceli hidrodinamik veri tabanından faydalanılarak Autosub su altı aracının stabilite ve performans karakteristiğini incelenmiştir. Yaptığım bu tez kapsamında su altı dünyasında hareket eden bir cismin dinamiğinin havada hareket eden bir cismin dinamiğine göre ne gibi farklılıkların olduğunu görme fırsatım oldu. Hava ve su altı araçları hareket ettikleri serbestlik dereceleri bakımından benzer olsalar da, içinde hareket ettikleri ortam koşulları sebebi ile oldukça farklı dinamik özelliklere sahip olmaktadırlar. Tezimde su altı araçları için daha karmaşık olan bu dinamik özellikleri hesaplamaya ve anlatmaya çalıştım. Su altı dünyasının yüksek dereceli dinamik özellikleri içinde hareket eden su altı araçlarının hidrodinamik özelliklerinin belirlenebilmesi için, bu projede doğrulaması yapılmış olan hesaplama yöntemlerinin alternatif su altı araçları için de kullanılabileceğini belirtir ve bu konuda geçmişten günümüze çalışarak hidrodinamik konusunu belirli bir olgunluğa kavuşturmuş olan bilim insanlarını saygıyla selamlarım.

KAYNAKLAR

[1] **Vijay, S.** (t.y.). Autonomous Underwater Vehicles, Department of Mechanical Engineering, P.E.S.C.E., MANDYA.

[2] **Benanzer, T., W.** (2008). System Design of Undersea Vehicles with Multiple Sources of Uncertainty, Wright State University.

[3] **Blidberg, D., R.** (t.y.). The Development of Autonomous underwater Vehicles; A Brief Summary, Autonomous Undersea Systems Institute, Lee New Hampshire, USA.

[4] **Doherty, S., M**. (2011). Cross body Thruster Control and Modeling of a Body of Revolution Autonomous Underwater Vehicle, Naval Postgraduate School, Monterey, California.

[5] **Küçük, K**. (2007). Modeling and Motion Simulation of an Underwater Vehicle, Mechanical Engineering Department, Middle East Technical University, Turkey.

[6] **Gonzalez, L. A.** (2004). Design, Modeling and Control of an Autonomous Underwater Vehicles, Bachelor of Engineering Thesis, School of Electrical, Electronic and Computer Engineering, The University of Western Australia.

[7] **Evans, J. and Nahon, M.** (2004). Dynamics modeling and performance evaluation of an autonomous underwater vehicle, Oceans Engineering, Department of Mechanical Engineering, McGill University, Canada.

[8] **Perrault, D., Bose, N., Young, S.O. and Williams, C. D.** (2003). Sensitivity of AUV Added Mass Coefficients to Variations in Hull and Control Plane Geometry, Ocean Engineering, Canada.

[9] **Kim, K. and Choi, H., S.** (2006). Analysis on the controlled nonlinear motion of a test bed AUV-SNUUV I, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Republic of Korea.

[10] **Jun, B. H., Park, J. Y., Lee, F. Y., Lee, P. M., Lee, C. M., Kim, K., Lim, Y. Y. and Oh, J. H.** (2009). Development of the AUV ISIMI and a free running test in an Ocean Engineering Basin, Ocean Engineering Research Department, Republic of Korea.

[11] **Stokey, R. P. and Roup, A.** (t.y.). Development of the REMUS 600 Autonomous Underwater Vehicle, Woods Hole Oceanographic Institution and Vehicle Control Technology.

[12] **Prestero, T.** (1994). Verification of Six Degree of Freedom Simulation Model for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle, Master of Science in Ocean Engineering and Master of Science in Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology.

[13] **Griffiths, G., Stevenson, P., Webb, A. T., Millard, N. W., McPhail, S. D., Pebody, M. and Perrett, J. R.** (t.y.). Open Ocean Operational Experience with the Autosub-1 Autonomous underwater Vehicles, Oceans Technology Division, Southampton Oceanography Centre, Southampton, UK.

[14] **Millard N. W., McPhaill, S. D., Stevenson, P., Perrett, J. R., Webb, A. and Griffiths, G.** (t.y.). Remote Presence in the Marine Environment with the Autosub-1 Autonomous Underwater Vehicle, Southampton Oceanography Centre, Empress Dock, Southampton.

[15] **Phillips, A., Furlong, M. and Turnock, S. R**. (t.y.). The Use of Computational Fluid Dynamics to Determine the Dynamic Stability of an Autonomous Underwater Vehicles, School of Engineering Sciences, University of Southampton and National Oceanography Centre, Southampton.

[16] **Kimber, N. I. and Scrimshaw, K. H.** (t.y.). Hydrodynamic Testing of a $^{3}/_{4}$ Scale Autosub Model, Defense research Agency, Hampshire, UK.

[17] **Jones, D. A., Clarke, D. B., Brayshaw, I. B., Barillon, J. L. and Anderson, B**. (2002). The Calculation of Hydrodynamic Coefficients for Underwater Vehicles, Maritime Platforms Division Platforms Sciences Laboratory, Australia.

[18] **Yechout, T. R., Morris, S. L., Bossert, D. E. and Hallgren, W. F.** (2003). Introduction to Aircraft Flight Mechanics, AIAA Education Series.

[19] **Gertler, M.** (1950). Resistance Experiments on a Systematic Series of Streamlined Bodies of Revolution For Application to the design of High Speed Submarines, David Taylor Model Basin, Navy Department, Washington D.C.

[20] **Gertler, M. and Hagen, G. R.** (1967). Standard Equations of Motion for Submarine Simulation, Naval Ship Research and Development Center, U.S. Navy.

[21] **Gertler, M.** (1967). The DTMB Planar Motion Mechanism System, Naval Ship research and Development Center, Washington.

[22] **Feldman, J. (**1979). DTNSRDC Revised Standard Submarine Equations of Motion, David W. Taylor Naval Ship research and Development Center, Department of the Navy.

[23] **Johnson, D. C.** (1982). A Coning Motion Apparatus for Hydrodynamic Model Testing in a Non-planar Cross-Flow, B.S., Aerospace Engineering, United States Naval Academy, USA.

[24] **Fossen, T.** (1994). Guidance and Control of Ocean Vehicles, University of Trondheim, Norway.

[25] **Rhee, K. P., Yoon, H. K., Sung, Y. J. , Kim, S. H. and Kang, J. N.** (t.y.). An Experimental Study on Hydrodynamic Coefficients of Submerged Body Using Planar Motion Mechanism and Coning Motion Device, Seoul Nationa University, Korea.

[26] **Etkin, B. and Reid, L. D.** (1994). Dynamics of Flight Stability and Control, Third Edition, John Wiley and Sons Inc., USA.

[27] **Data Sheet** (t.y.). Overview of Model Testing Facilities, Marine Technology Laboratories, Norwegian University of Science and Technology.

[28] **Ege, E.** (2007). Hava Soğutmalı Kondenserin Isıl Analizi ve Tasarımı, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye.

[29] **Bakker, A.** (2002). Applied Computational Fluid Dynamics, Lecture 11, Boundary Layers and Separation, Dartmouth College, USA.

[30] **Whitfield, C. C.** (1999). Steady and Unsteady Force and Moment Data on a DARPA2 Submarine, Master of Science in Aerospace Engineering, Department of Aerospace and Ocean Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.

[31] **Roddy, R. F.** (1990). Investigation of the Stability and Control Characteristics of Several Configurations of the Darpa Suboff Model from Captive Model Experiments, David Taylor Research Center, Ship Hydromechanics Department, United States Navy.

[32] **Gorski, J. J., Roderick, M. C. and Haussling, H. J.** (1990). Computational of Incompressible Flow Around the Darpa Suboff Bodies, Ship Hydromechanics Department Research and Development Report, David Taylor Research Center, United States Navy.

[33] **Groves, N. C., Huang, T. T. and Chang, M. S.** (1989) Geometric Characteristic of Darpa Suboff Models, Ship Hydrodynamics Department, David Taylor Research Center, United States Navy.

[34] **Huang, T., Liu, H. L., Groves, N., Forlini, T., Blanton, J. and Growing, S**. (1994). Measurements of Flows Over an Axisymmetric Body with Various Appendages in a Wind Tunnel: the DARPA Suboff Experimental Program Naval Hydrodynamics, David Taylor Model Basin, Washington, USA.

[35] **Data Sheet** (2012). Ocean Basin and Rotating Arm Test Facilities, QinetiQ Maritime Department, United Kingdom.

[36] **Brennen, C. E.** (1982). A Review of Added Mass and Fluid Inertial Forces. Naval Civil Engineering Laboratory, Department of the Navy, Port Hueneme, California.

[37] **Humphreys, D. E. and Watkinson, K. W.** (1978). Prediction of Acceleration Hydrodynamic Coefficients for Underwater Vehicles From Geometric Parameters, Naval Coastal Systems Laboratory, Panama, Florida.

[38] **Sancı, S.** (2003). Design of a Torpedo: Study of Drag Reduction Using Computational Fluid Dynamics, Graduate Program in Mechanical Engineering, Boğaziçi University.

[39] **White, F. M.** (2004). Akışkanlar Mekaniği, 4. Basım, Literatür Yayıncılık.

[40] **Raymer, D. P.** (2004). Aircraft Design: A Conceptual Approach, AIAA Education Series, Washington, DC.

[41] **Department of Defense,** (1990). Design of Aerodynamically Stabilizes Free Rockets, Military Handbook, Department of Defense, USA.

[42] **Url-1 <***http://www.srcf.ucam.org* >, alındığı tarih: 15.03.2013.

[43] **Url-2 <***http://www.ultra-os.com/torpedo.php*>, alındığı tarih: 18.03.2013.

[44] **Url-3 <***http://www.engr.mun.ca/~cscout/*>, alındığı tarih: 22.03.2013.

[45] **Url-4** <*http://www.km.kongsberg.com*>, alındığı tarih: 28.03.2013.

[46] **Url-5** <*http://www.gateelektronik.com.tr*>, alındığı tarih: 04.04.2013.

[47] **Url-6** <*http://www.noc.soton.ac.uk*>, alındığı tarih: 08.04.2013.

[48] **Url-7 <**http://web.mit.edu/towtank/www/>, alındığı tarih: 13.04.2013.

[49] **Url-8** <*http://www.dantecdynamics.com*>, alındığı tarih: 14.04.2013.

[50] **Url-9 <***http://www.computationalfluiddynamics.com.au*>, alındığı tarih: 16.04.2013.

[51] **Url-10** <*http://www.ansys.com*>, alındığı tarih: 18.04.2013.

EKLER

EK A: Autosub Otonom Su Altı Aracının Hidrodinamik Katsayıları

EK B: Kinematik Bağıntılar

EK A

Yapılan tez çalışmasında, Autosub otonom su altı aracının hidrodinamik veri tabanının HAD yöntemleri ve ampirik yöntemler kullanılarak hazırlanması konusu 9.Bölüm'de detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Anlatıldığı şekilde Autosub su altı aracının statik ve dinamik hidrodinamik katsayıları hesaplanarak ve altı serbestlik dereceli hidrodinamik veri tabanı oluşturulmuştur. Bu kapsamda Bölüm 9.1'de statik hidrodinamik katsayıların hesaplanmasından ve Bölüm 9.2'de ise dinamik hidrodinamik katsayıların hesaplanmasından bahsedilmiştir. Aşağıdaki tablolarda Bölüm 9'da anlatılan Autosub su altı aracının hidrodinamik katsayıları verilmiştir.

Eksenel Kuvvet Katsayıları	
$X_{qq}{}'$	-1,147E-04
$X_{rr}{}'$	-1,147E-04
$X_{\dot{u}}{}'$	-6,120E-04
$X_{uu}{}'$	1,026E-03
$X_{vv}{}'$	-1,217E-05
$X_{ww}{}'$	-1,217E-05
$X_{\delta r \delta r}{}'$	1,969E-06
$X_{\delta e \delta e}{}'$	1,969E-06

Düşey Öteleme Kuvveti Katsayıları	
$Z_{\dot{q}}{}'$	-7,040e-04
$Z_{pp}{}'$	-1,899e-04
$Z_{\dot{w}}{}'$	-2,020e-02
$Z_{q}{}'$	-1,025E-02
$Z_{w}{}'$	-2,985E-02
$Z_{w\|w\|}{}'$	-1,876e-03
$Z_{\|w\|}{}'$	-1,675e-03
$Z_{ww}{}'$	-1,726e-03
$Z_{\delta e}{}'$	-1,103E-02

Sapma Kuvveti Katsayıları	
$Y_{\dot{r}}'$	7,040E-04
$Y_{\dot{p}}'$	5,280E-05
$Y_{p\|p\|}'$	-1,276E-05
$Y_{\dot{v}}'$	-2,020E-02
Y_{r}'	-1,025E-02
Y_{p}'	-4,643E-05
Y_{v}'	-2,985E-02
$Y_{v\|v\|}'$	-1,876E-03
$Y_{\delta r}'$	-1,103E-02

Yunuslama Momenti Katsayıları	
$M_{\dot{q}}'$	-7,370E-04
M_{pp}'	3,422E-05
$M_{q\|q\|}'$	-9,004E-03
$M_{\dot{w}}'$	-2,540E-04
M_{q}'	-4,910E-03
M_{w}'	4,530E-03
$M_{w\|w\|}'$	1,071E-04
$M_{\|w\|}'$	-4,116E-04
M_{ww}'	4,036E-04
$M_{\delta e}'$	-4,608E-03

Yuvarlanma Momenti Katsayıları	
$K_{\dot{p}}'$	-5,200E-06
$K_{\dot{r}}'$	-2,800E-06
$K_{p\|p\|}'$	-1,704E-05
K_{p}'	-3,100E06
K_{v}'	-5,280E-05

Sapma Momenti Katsayıları	
$N_{\dot{r}}'$	-7,370E-04
$N_{\dot{p}}'$	2,801E-06
$N_{r\|r\|}'$	-9,004E-03
$N_{\dot{v}}'$	2,541E-04
N_{p}'	-2,086E-06
N_{r}'	-4,910E03
N_{v}'	4,530E-03
$N_{v\|v\|}'$	-1,071E-04
$N_{\delta r}'$	4,608E-03

EK B: Kinematik Bağıntılar

$$U^2 = u^2 + v^2 + w^2$$

$$\dot{\emptyset} = p + \dot{\varphi}\, sin\theta$$

$$\dot{\theta} = \frac{q - \dot{\varphi} cos\theta\, sin\varphi}{cos\emptyset}$$

$$\dot{\varphi} = \frac{r + \theta\, sin\emptyset}{cos\theta\, cos\emptyset}$$

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Sertaç ARSLAN

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul – 28.03.1986

Adres: Samatya Cad. Kocamustafa Paşa Mahallesi Ergun Apt. No:125/7 Fatih/İstanbul

E-Posta: arslanserta@itu.edu.tr

Lisans: İTÜ Uçak Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans: İTÜ Uçak ve Uzay Mühendisliği Disiplinler Arası Yüksek Lisans Programı

Mesleki Deneyim: 2009 Yılı Eylül ayı itibari ile ROKETSAN A.Ş. bünyesinde Aerodinamik Mühendisi olarak çalışmaktadır.

Yayın Listesi:

- **Arslan, S., Karaca, S ve Kavsaoğlu, M.Ş**. (2009). Design, Flight Mechanics and Performance of a Target Jet Unmanned Aerial Vehicle, 5.Ankara International Aerospace Conference, METU, Ankara, Turkey.
- **Arslan, S., Acar, H ve Kavsaoğlu, M.Ş** (2012). Su altı Araçları için Hidrodinamik Modelleme Yöntemlerinin Geliştirilmesi, IV. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, Hava Harp Okulu, İstanbul, Türkiye.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- **Arslan, S., Acar, H ve Kavsaoğlu, M.Ş** (2013). Development of Hydrodynamic Modeling Techniques for Undwater Vehicles, International Marine and Offshore Engineering Conference 2013, Alexandria, Egypt.
- **Arslan, S., Acar, H ve Kavsaoğlu, M.Ş** (2013). Investigation of Hydrodynamic Characteristics of an AUV by Using a New Developed CFD Analysis Model, 7.Ankara International Aerospace Conference, METU, Ankara, Turkey.