

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DARPA SUBOFF DENİZALTI MODELİNİN
PERVANESİZ VE PERVANELİ OLARAK STATİK DRİFT
DURUMUNDA MANEVRA KUVVETLERİNİN
İNCELENMESİ

Hasan ÖZTÜRK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı
Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Yasemin ARIKAN ÖZDEN

Temmuz, 2023

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DARPA SUBOFF DENİZALTI MODELİNİN PERVANESİZ VE
PERVANELİ OLARAK STATİK DRİFT DURUMUNDA
MANEVRA KUVVETLERİNİN İNCELENMESİ**

Hasan ÖZTÜRK tarafından hazırlanan tez çalışması 19.07.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğretim Üyesi Yasemin ARIKAN ÖZDEN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Fahri ÇELİK, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ömer Kemal KINACI, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Dr. Öğretim Üyesi Yasemin ARIKAN ÖZDEN sorumluluğunda tarafımda hazırlanan “Darpa Suboff Denizaltı Modelinin Pervanesiz ve Pervaneli Olarak Statik Drift Durumunda Manevra Kuvvetlerinin İncelenmesi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Hasan ÖZTÜRK

İmza



Bu çalışma, herhangi bir çalışma projesi ile desteklenmemiştir.



Kıymetli ailelerime

ve

biricik eşime

TEŞEKKÜR

İnsanlık boyunca yapılan savaşların temelinde özgür olmak vardır. Bu özgürlüğü sağlayabilmek adına tam bağımsız olma çalışmaları her devirde var olmuştur. Kendi çıkarları doğrultusunda karar alabilmek, ambargolardan etkilenmemek ve askeri anlamda dışa bağımlılığı azaltabilmek adına yola çıkılan ve Türkiye Cumhuriyeti'nin ulusal bir savaş gemisi programı olarak bilinen MİLGEM ya da tam adıyla Millî Gemi üretme projesi bir dizi görevde kullanılabilecek çok amaçlı korvet ve firkateynler geliştirmeyi hedeflemektedir. Benzer şekilde MİLDEN ya da tam adıyla Millî Denizaltı projesi Türk Deniz Kuvvetleri Komutanlığı ihtiyaçları doğrultusunda millî imkânlarla geliştirilip üretilmesi planlanan denizaltı projesidir.

Askeri projeler, savunma ve stratejik avantaj sağlama gibi değerli amaçlara yönelik olarak yürütülen çalışmalardır. Bu projelerin başarı olabilmesi optimizasyon, inovasyon ve son teknolojilerin kullanımına bağlıdır. Bir ulusta bunların olabilmesi için elbette akademik camianın desteği gerekmektedir. Bu destek teknik zorluklarla başa çıkabilmek, yeni fikirlerin ortaya çıkmasına olanak sağlamak, projelere yeni perspektifler getirebilmek ve mevcut erişilebilir teknolojinin verimli bir şekilde kullanılabilmesi için oldukça önemlidir.

Bu gelişmeler göz önüne alındığı takdirde bu topraklarda doğup vatan sevgisi ile büyüyen ve ülkesi adına güzel hayaller kuran her mühendis gibi, destek olabilmek, katkı sağlamak ve elimizden gelen bilgi birikimini sunabilmek adına denizaltı alanına yoğunlaşabilmek ve ülkemizde bu alana olan ilginin artması niyetiyle bu tez yazılmıştır. Diğer bir gaye ise denizaltılar alanında yapılan akademik çalışmaları zenginleştirmek, benzer çalışmalar yapmayı planlayan arkadaşlara yol gösterebilmek ve fikir sahibi olabilmelerine katkıda bulunmak için gerçekleştirilmiştir.

Tüm bunları yapabilmek için bu çalışmada benden maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, yol gösteren kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi Yasemin ARIKAN ÖZDEN'e ve isimlerini teker teker zikredemeyeceğim Gemi İnşa Fakültesinin değerli akademik personeline teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca yüksek lisans sürecimin bana adeta bir hediyesi olan biricik eşim, hayat yolu arkadaşım Zeynep

Sena Öztürk'e bana verdiği cesaret ve farkındalıktan dolayı ayrıca teşekkür ederim. Bizi her zaman destekleyen, arkamızda duran ve cesaretlendiren aileme ve kayın aileme de şükranlarımı sunarım. Eğitim hayatım boyunca elde olan imkânın sınırını görebilmek için imkânsız gibi gözüken şeylerin denenmesi gerektiğini bana aşıl原因, örnek aldığım, daima yapıcı olan ve en önemlisi adeta benim gözümün açılmasını sağlayan büyüklerime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hasan ÖZTÜRK



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	v
SİMGE LİSTESİ	ix
KISALTMA LİSTESİ	xi
ŞEKİL LİSTESİ	xiii
TABLO LİSTESİ	xv
ÖZET	xvi
ABSTRACT	xviii
1 GİRİŞ	20
1.1 Literatür Taraması.....	20
1.2 Tezin Amacı.....	34
1.3 Hipotez.....	34
2 MANEVRA MATEMATİKSEL MODELİ	36
2.1 Gemi Manevra Modelleri.....	36
2.2 Denizaltılarda Manevra tahmin yöntemleri	45
3 KULLANILAN GEOMETRİ MODELLERİ	51
3.1 DARPA Suboff Modelinin Geometrik Özellikleri	51
3.2 INSEAN E1619 Pervane Geometrisinin özellikleri.....	53
3.3 INSEAN E1619 ile Sevk Edilen DARPA Suboff AFF3 ve AFF-8 Denizaltı Modelleri.....	54
4 KULLANILAN SAYISAL YÖNTEMLER	56
4.1 Kullanılan Sayısal Yöntemler	56
4.2 Sonlu Hacimler Yöntemi	57
4.3 RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) Denklemleri	59
4.4 Kullanılan Çözücü Yöntemi.....	60
4.5 Kullanılan Çözüm Ayrıklaştırması Yöntemi	61
4.6 Çözüm Ağı Oluşturma Yöntemi	62
5 DARPA DENİZALTI MODELLERİNİN HAD İLE İNCELENMESİ	64
5.1 Geometrilerin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği İle Analizlerinin Yapılması	64
5.2 Ağdan Bağımsızlık Çalışması (Mesh Independency).....	67
5.3 Ağdan Bağımsızlık Çalışması Sonuçları.....	72
5.4 AFF-3 Konfigürasyonu için Büyük Açılarda HAD ile Statik Sürüklenme Durumunda Oluşan Kuvvetlerin ve Momentlerin İncelenmesi	76

5.5 DARPA Suboff AFF-8 Konfigürasyonunun HAD Analizleri ile Statik Sürüklenme Sırasında Karşılaştığı Kuvvetlerin ve Momentlerin İncelenmesi	80
6 KENDİNDEN TAHRİKLİ PERVANELİ DARPA SUBOFF DENİZALTI KONFIGÜRASYONLARININ STATİK SÜRÜKLENME DURUMUNUN HAD İLE İNCELENMESİ	86
6.1 INSEAN E1619 Pervanesi ile HAD Analizleri Yöntemi	86
6.2 Kendinden tahrikli AFF-3 Konfigürasyonu	88
6.3 Kendinden tahrikli AFF-8 Konfigürasyonu	93
6.4 Pervaneli ve Pervanesiz Tüm Sonuçların Kıyası	98
7 SONUÇ VE ÖNERİLER	102
KAYNAKÇA	105
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	109

SİMGE LİSTESİ

u	Akışkan Hız Terimi
q	Baş kış vurma (açısal) hızını
L	Boy
u^+	Boyutsuz Hız Terimi
N'	Boyutsuzlaştırılmış N savrulma momenti(z eksenine etrafında oluşan)
X'	Boyutsuzlaştırılmış X yönü kuvvetleri
Y'	Boyutsuzlaştırılmış Y yönü kuvvetleri
L_{CB}	Centre of buoyancy (aft of nose)
ω	Dalıp çıkma hızını
$\omega \cdot$	Dalıp çıkma ivmelenmesini
V	Denizaltı Hızı (gemiye gelen akışan hızı)
D^*	Denizaltı Silindirik Çapı
t^*	Değişken Yüklü Sevk Deneyi Yöntemine Göre İtme Azalması
∇	Deplasman Hacmi
$\partial \rho$	Diferansiyel Yoğunluk Terimi
∂t	Diferansiyel Zaman Terimi
∇P	Diferansiyel Basınç Terimi
∇V	Diferansiyel Hız Terimi
δ	Dümen açısını
Fr	Froude Sayısı
I_x	Geminin X eksenine göre atalet momentini
I_y	Geminin Y eksenine göre atalet momentini
I_z	Geminin savrulma (Z) eksenine göre atalet momentini
B	Genişlik
ρS	Gerçek Ölçek Su Yoğunluğu
m	Hareket eden kütleyi (denizaltı deplasmanı + ek su kütlesini)
$\nabla(\rho VV)$	Hareket Terimi
u	İleri öteleme hızını (surge)
$\dot{u}$	İleri öteleme ivmelenmesini
S	Islak Yüzey Alanı
t	İtme Azalması
κ	Karman Sabiti

ν	Kinematik Viskoziteyi
ρg_{xyz}	Kütle Terimi
L_{BP}	Length between perpendiculars
L_{OA}	Length overall
S_M	Model Ölçek Islak Yüzey Alanı
R_{MAX}	Maximum hull radius
ρM	Model Ölçek Su Yoğunluğu
Re_M	Model Ölçek Reynolds Sayısı
R_{TM}	Model Ölçeğinin Toplam Direnci
λ	Ölçek Faktörü
D^{**}	Pervane Çapı
T	Pervane İtmesi
Z	Pervane Kanat Sayısı
$\tau P/D$	Pervane Hatve Çapının Pervane Kanadına Oranı
ρu_{ij}	Reynold Gerilme Terimi
r	Savrulma (açısal) hızını
y	Sınır Tabadaki Mesafe
y^+	Sınır Tabakadaki Boyutsuz Mesafe
β	Sürüklenme Açısı
ω	Teğetsel Gerilme Terimi
$\nabla(\mu \nabla V)$	Viskoz Terimi
p	Yalpa (Açısal) Hızını
v	Yanal öteleme hızını (sway)
$\dot{v}$	Yanal öteleme ivmelenmesini
ρ	Yoğunluk
S_{WA}	Wetted surface area (Islak yüzey alanı)
t^{**}	Zaman

KISALTMA LİSTESİ

CFD	Computational Fluid Dynamics
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DDES	Delayed Detached-Eddy Simulation
DES	Detached-Eddy Simulation
DNS	Direct Numerical Simulation
DoF	Degree of Freedom
DSTO	Defence Science and Technology Organisation Australia
DTMB	David Taylor Model Basin
DTRC	David Taylor Research Centre
DTC	Duisburg Test Case Containership
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
IB	Immersed Boundary
INSEAN	İtalyan Ship Model Basin
IMO	International Maritime Organization
ITTC	International Towing Tank Conference
ITU	İstanbul Teknik Üniversitesi
KCS	Kriso Container Ship
KVLCC	Kriso Very Large Crude Carrier
LES	Large Eddy Simulation
MARIN	Maritime Research Institute Netherlands
MC	Manevra Komitesi
MİLDEN	Milli Denizaltı
MİLGEM	Milli Gemi
MMG	Mathematical Model Group
MRF	Moving Reference Frame
PMM	Planar Motion Mechanism
PRESTO	Pressure Staggering Option
QUICK	Quadratic Upwind Interpolation Scheme
RANS	Reynold Average Navier Stokes
RPM	Revolution Per Minute
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations
SNAME	Society of Naval Architects and Marine Engineers

SST	Shear Stress Transport
STP	Submarine Technology Program



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Abdülhamid denizaltısının Haliç'te denemeleri yapılırken [1]	22
Şekil 1.2 Abdülhamid denizaltısı suya indirilirken [1]	23
Şekil 1.3 Dalmış bir cisim için manevra tahmin yöntemleri [9]	26
Şekil 1.4 Dalmış bir cisme etkiyen kuvvetler [11]	27
Şekil 2.1 Manevrası için sabit (o0-x0y0z0) ve bağlı (o-xyz) eksen takımları[49]	38
Şekil 2.2 Temsili 6 DoF hareketin DARPA etrafında gösterimi	38
Şekil 2.3 Model ve sınır koşullarının gösterimi	46
Şekil 3.1 DARPA Suboff AFF-8 Geometrisi	52
Şekil 3.2 DARPA Suboff AFF-3 Geometrisi	52
Şekil 3.3 INSEAN E1619 Model Pervanesi [27]	53
Şekil 3.4 E1619 Model pervanesinin eklendiği AFF-8 geometrisi	54
Şekil 3.5 E1619 Model pervanesinin eklendiği AFF-3 geometrisi	54
Şekil 3.6 DARPA Suboff Pervane yerleşiminin görünümü [44]	55
Şekil 5.1 Model ve sınır koşullarının gösterimi	68
Şekil 5.2 Analizlerde kullanılan koordinat sistemi ve gelen akımın temsili gösterimi	69
Şekil 5.3 Denizaltı koordinat ekseninin tam konumu	70
Şekil 5.4 Seyrek ağ yoğunluğunda olan geometri	71
Şekil 5.5 Orta ağ yoğunluğunda olan geometri	71
Şekil 5.6 Sık ağ yoğunluğunda olan geometri	71
Şekil 5.7 Soldan sağa ağ yoğunluğu: Seyrek (a), Orta (b) ve Sık (c)	72
Şekil 5.8 AFF-3 konfigürasyonu için farklı ağ yoğunlukları ve deneysel sonuçların boyutsuz X' değerleri ile kıyaslanması	74
Şekil 5.9 AFF-3 konfigürasyonu için farklı ağ yoğunlukları ve deneysel sonuçların boyutsuz Y' değerleri ile kıyaslanması	75
Şekil 5.10 AFF-3 konfigürasyonu için farklı ağ yoğunlukları ve deneysel sonuçların boyutsuz N' değerleri ile kıyaslanması	75
Şekil 5.11 Analizlerde kullanılan AFF-3 konfigürasyonundan küçük açılarda lineer denklemden anlaşılan Yv değeri=0,0113	76
Şekil 5.12 Analizlerde kullanılan AFF-3 konfigürasyonundan küçük açılarda lineer denklemden anlaşılan Nv değeri=0,0107	76
Şekil 5.13 AFF-3 konfigürasyonunun farklı sürüklenme açlarındaki temsili görünümü	77
Şekil 5.14 X eksenini boyunca HAD ve Deney Sonuçları	78

Şekil 5.15 Y eksenı boyunca HAD ve Deney Sonuçları	78
Şekil 5.16 Z eksenı etrafında oluşan momentin HAD ve Deney Sonuçları	79
Şekil 5.17 Denizaltı modeli etrafındaki Hacımsel Ağ yapısı	80
Şekil 5.18 AFF-8 için $0^0 - 18^0$ arası X yönünde oluşan boyutsuz kuvvet değerleri	82
Şekil 5.19 AFF-8 için 0^0-18^0 arasında Y yönünde oluşan boyutsuz kuvvet değerleri	82
Şekil 5.20 AFF-8 için 0^0-18^0 arasında Z eksenı etrafındaki boyutsuz kuvvet değerleri	83
Şekil 5.21 AFF-8 ve AFF-3 için 0^0-20^0 arası X yönünde oluşan boyutsuz kuvvet değerleri	84
Şekil 5.22 AFF-8 ve AFF-3 için 0^0-20^0 arası Y yönünde oluşan boyutsuz kuvvet değerleri	84
Şekil 5.23 AFF-8 ve AFF-3 için 0^0-20^0 arası boyutsuz N moment değerleri	85
Şekil 6.1 Pervanesi bölgesinde oluşan çözüm ağı görünümü	87
Şekil 6.2 Pervanesi bölgesinde oluşan çözüm ağı görünümü	88
Şekil 6.3 550 ve 750 rpm için oluşan keşişim noktası sonucu 645,6375 rpm	89
Şekil 6.4 Pervaneli AFF-3 için denemeler sonucu sevk noktasının belirlenmesi	90
Şekil 6.5 AFF-3 için Pervaneli ve Pervanesiz durumda oluşan Surge (X) kuvvet değerlerinin karşılaştırılması	92
Şekil 6.6 AFF-3 için Pervaneli ve Pervanesiz durumda oluşan Sway (Y) kuvvet değerlerinin karşılaştırılması	92
Şekil 6.7 AFF-3 için Pervaneli ve Pervanesiz durumda oluşan Yaw momntleri	93
Şekil 6.8 Pervaneli AFF-8 modelinin Pointwiseda görünümü	94
Şekil 6.9 Pervaneli AFF-8 modeli için denemeler sonucu sevk noktasının belirlenmesi	95
Şekil 6.10 AFF-8 için pervaneli ve pervanesiz durumda oluşan surge kuvvet değerlerinin karşılaştırılması	96
Şekil 6.11 AFF-8 için pervaneli ve pervanesiz durumda oluşan sway kuvvet değerlerinin karşılaştırılması	97
Şekil 6.12 AFF-8 için pervaneli ve pervanesiz durumda oluşan surge kuvvet değerlerinin karşılaştırılması	97
Şekil 6.13 X doğrultusunda oluşan tüm direnç değerleri	98
Şekil 6.14 Y doğrultusunda oluşan tüm direnç değerleri	99
Şekil 6.15 Z eksenı etrafında oluşan tüm moment değerleri	100
Şekil 6.16 Pervaneli AFF-3 ve AFF-8 modellerinin farklı açılardaki durumunu gösteren basınç katsayıları	101

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 DARPA Suboff AFF-3 ve AFF-8 modellerinin ana boyutları [12].....	52
Tablo 3.2 E1619 Model Pervanesi Ana Boyutları	523
Tablo 5.1 Analizlerde kullanılan koşullar ve değerler tablosu	66
Tablo 5.2 Analizlerde kullanılan koşullar ve değerler tablosu	66
Tablo 5.3 $\beta=0$ derece için farklı ağ yoğunluklarında AFF-3 konfigürasyonunun manevra kuvvetleri ve momentinin sonuçları.....	72
Tablo 5.4 $\beta=2$ derece için farklı ağ yoğunluklarında AFF-3 konfigürasyonunun manevra kuvvetleri ve momentinin sonuçları.....	73
Tablo 5.5 $\beta=4$ derece için farklı ağ yoğunluklarında AFF-3 konfigürasyonunun manevra kuvvetleri ve momentinin sonuçları.....	73
Tablo 5.6 $\beta=6$ derece için farklı ağ yoğunluklarında AFF-3 konfigürasyonunun manevra kuvvetleri ve momentinin sonuçları.....	73
Tablo 5.7 AFF-3 konfigürasyonunun analiz sonuçları	75
Tablo 5.8 AFF-3 HAD sonuçlarının deney sonuçlarından sapma miktarı.....	77
Tablo 5.9 Toxopeus vd. tarafından AFF-8 için yapılan HAD sonuçları [48].....	728
Tablo 5.10 AFF-8 konfigürasyonu için elde edilen kuvvetler ve momentler	79
Tablo 6.1 İlk RPM değeri yaklaşımları.....	86
Tablo 6.2 AFF-3 için RPM değeri yaklaşımları ve sevk noktasının belirlenmesi	87
Tablo 6.3 AFF-3 için pervaneli analizlerden oluşan kuvvet ve moment değerleri.....	88
Tablo 6.4 AFF-8 için RPM değeri yaklaşımları ve sevk noktasının belirlenmesi	91
Tablo 6.5 AFF-8 için pervaneli analizlerden oluşan kuvvet ve moment değerleri.....	93
Tablo 6.6 X yönünde oluşan tüm kuvvet değerleri	95
Tablo 6.7 Y yönünde oluşan tüm kuvvet değerleri	96
Tablo 6.8 Z ekseninde oluşan tüm moment değerleri.....	97

Darpa Denizaltı Modelinin Farklı Konfigürasyonlarının Pervaneli ve Pervanesiz Olarak Değişik Açılarda Statik Drift Durumunda Manevra Kuvvetlerinin İncelenmesi

Hasan ÖZTÜRK

Gemi İnşaattı ve Gemi Makineleri Mühendisliğı Anabilim Dalı

Gemi İnşaattı ve Gemi Makineleri Mühendisliğı Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Yasemin ARIKAN ÖZDEN

Bu yüksek lisans tezi kapsamında Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiğı yöntemlerinden yararlanılarak, DARPA Suboff denizaltı modelinin iki farklı konfigürasyonun değişik açılardaki statik sürüklenme durumu altında oluşan manevra kuvvetleri ve momentleri belirlenmeye çalışılmıştır. Denizaltı modelinin iki farklı konfigürasyonu; çıplak gövde ve dört kık dümenden oluşan AFF-3 konfigürasyonu ve çıplak gövde, yelken ve dört kık dümenden oluşan tam ekli konfigürasyon olan AFF-8 konfigürasyonu kullanılmıştır. Başlangıçta her HAD çalışmasında olduğu gibi ağdan bağımsızlık (mesh independence) çalışması yapılmıştır. Üç farklı durum için; sık, orta ve seyrek ağ yoğunluklarında küçük açılarda (0-2-4-6 dereceler) HAD analizleri yapılmıştır. Daha sonra elde edilen sonuçların doğrulanması yapılmış, orta ağ yoğunluğu seçilmiş ve daha geniş açılarda (6⁰ den 20⁰ dereceye kadar) ikişer derece aralıklarla analizlere devam edilmiştir. Elde edilen sonuçların doğruluğı, boyutsuz deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Yapılan HAD analizlerinin sonuçları ve literatürde bulunabilen deneysel verilerin karşılaştırmalarının yapılmasıyla, bu

çalışmada kullanılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemlerinin etkinliğinin ve doğruluğunun yüksek düzeyde iyi bir uyum içerisinde olduğu gösterilmiştir. Daha sonra aynı analizler AFF-8 konfigürasyonu için de yapılmıştır. Bu çalışma, ilk olarak literatürde daha önce herhangi bir deneysel verisi bulunmayan AFF-8 tam takınlı konfigürasyonun manevra kuvvetlerini ve momentlerini belirlemeyi amaçlamıştır. Daha sonra ise çalışmanın diğer kısmını oluşturan statik sürüklenme durumunda kendinden tahrikli modellerin incelenmesine geçilmiştir. Bu sebeple 0^0 den 20^0 dereceye kadar ikişer derece aralıklarla analizleri yapılan AFF-3 ve AFF-8 konfigürasyonlarına, kendilerini sevk edebilmeleri için yedi kanatlı, yüksek çalıklıklı temsili bir denizaltı pervanesi olan INSEAN E1619 pervanesi eklenmiştir. Bu pervanenin eklenmesi ile beraber her iki model içinde sevk noktası belirlenmiştir. Belirlenen sevk noktalarında farklı açılarda kendinden tahrikli olarak statik drift durumunda denizaltı modellerinin maruz kaldığı kuvvet ve moment değerleri elde edilmiş olup tablolar ve grafiklerle sunulmuştur. Bu anlatılanları yapabilmek için, önce Pointwise adı verilen programda ağ oluşturma işlemi yapılmış ve ticari yazılım olan ANSYS Fluent programında hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Literatürde yeteri kadar kıyas yapılabilecek statik sürüklenme sonucu olmayan DARPA Suboff AFF-8 denizaltı modelinin sonuçları ve kendinden tahrikli AFF-3 ile AFF-8 konfigürasyonlarının statik sürüklenme durumunda karşılaştığı kuvvet ve moment değerleri tablolar ve grafikler halinde açıklamaları yapılarak bu yüksek lisans tezi kapsamında sunulmuş ve literatüre kazandırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: DARPA, denizaltı, INSEAN E1619, statik drift, statik sürüklenme, manevra, had, rans

Investigation of Maneuvering Forces of Different DARPA Submarine Model Configurations under Static Drift Conditions with and without Propeller

Hasan ÖZTÜRK

Department of Naval Architecture and Marine Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Yasemin ARIKAN ÖZDEN

Within the scope of this master's thesis, Computational Fluid Dynamics (CFD) methods were employed to investigate the maneuver forces and moments generated by the DARPA Suboff submarine model in two different configurations under static drift conditions at various angles. The present study concentrate on that two similar configurations of DARPA Suboff submarine model. The first configuration also know like AFF-3 and AFF-5 names in the literature has bare hull and located four rudders at back of the model. Another model we made many analzzes on it is being full appended AFF-8 configuration. AFF-8 configuration has bare hull, four back rudders and only sail. Firstly a mesh independence study was conducted, as is customary in any CFD analysis. Computational Fluid Dynamics (CFD) analyses were performed at small angles like 0° - 2° - 4° - 6° and used three different mesh densities: fine, medium, and coarse. Subsequently, the accuracy of the obtained results was verified, the medium mesh density was selected, and analyses were continued at wider angles (from 60 to 200 degrees) with two-degree intervals. The reliability of the obtained results was assessed by comparing them with dimensionless experimental data. Thus, it is seen that there is a good agreement between the results of the computational fluid dynamics

methods used in this study and experimental data can be reachable in the literature.

Subsequently, the same analyses were conducted for the AFF-8 configuration. Firstly this study aimed to determine the maneuver forces and moments of the fully appended submarine model called AFF-8 which has no available experimental results. The next part of the study focused on the investigation of self-propelled models under static drift conditions. For this purpose, the INSEAN E1619 propeller, a representative submarine propeller with seven blades and high aspect ratio, was added to the AFF-3 and AFF-8 configurations, enabling them to propel themselves. With the addition of this propeller, the thrust point was determined for both models. The force and moment values experienced by the self-propelled submarine models in static drift conditions at different angles were obtained at the determined thrust points and presented in tables and graphs. To accomplish these, mesh generation was performed using a software called Pointwise and CFD simulations were conducted using the software like ANSYS Fluent. The obtained data from DARPA Suboff AFF-8 submarine model, which did not have sufficient static drift comparison in the literature and the force and moment values encountered by the self-propelled AFF-3 and AFF-8 configurations under static drift conditions at various angles were explained in tables and graphs, and presented within the scope of this master's thesis in order to contribute the literature.

Keywords: DARPA, Submarine, INSEAN E1619, Static Drift, Maneuvering, CFD, RANS

1.1 Literatür Taraması

İnsanlar, tarih boyunca kuşlara özenip göklerde uçmak istedikleri ve bu sebeple uçağı icat ettikleri gibi, balıklar gibi denizlerin, okyanusların dibini dolaşmak da istemişlerdir [1]. Ayrıca maviliğin altında yatan o sessiz derinlikteki deniz nimetlerinden yararlanma fikrinin insan hayallerini törpüleyen binlerce yıllık geçmişı bulunmaktadır. Bu isteklerin yanı sıra askeri alanlarda denizaltıların ülke donanmalarına vermiş olduğı cesaret gibi nedenlerle denizaltı gemisini icat etmişlerdir.

Denizaltılar, tanım olarak su yüzeyinin altında ve üstünde seyir yapabilen keşif ve savaş maksatlı deniz araçlarıdır. Denizaltıların askeri, turistik, araştırma amaçlı ve deniz kıyı yapıları gibi farklı alanlarda kullanımları son yıllarda artış göstermektedir. Özellikle donanma kuvvetlerine bağılı olarak caydırıcılık, güç gösterisi, stratejik caydırıcılık, aktif koruma, su altından karaya taarruz, denizaltı harbi, özel kuvvetler operasyonu, hava hedeflerine karşı caydırıcılık ve insansız araç operasyonları gibi oldukça önemli rolleri vardır.

Denizaltıcılığın tarihi Makedonya Kralı Büyük İskender'e kadar uzanmaktadır. Kaynaklarda yazan bilgilere göre Büyük İskender bir tekne yaptırmış ve kendisi bu tekne ile dalış yapmıştır. Ayrıca Leonardo da Vinci de denizaltı gemisine ilgi duyanlardandır. Da Vinci, 1500'ler de pek çok denemeler yapmış, fakat başarılı olamamıştır. 1538'de İspanya'nın Toledo şehrinde bir dalış denemesinden iyi sonuç alındığı belirtilmiştir. 1580'de İngiliz Deniz Subayı William Bourne de aynı sahada çalışan başka bir isim. Tahta üzerine deri kaplamak suretiyle yaptığı botla dalmaya çalışıyor, fakat sonuç başarısız. Debon 1653'te, Denis Pepin de 1689'da icat ettikleri botlarla dalmaya çalışıyorlar, fakat netice değişmiyor. On sekizinci asırda yapılan denemelerde patentler alınıyor, fakat yine sonuç alınamıyor. Kayıtlara göre 1747'de ki bazı denemeler de hayvan derilerinin içine su alınarak dalış yapılıyor, deri torbaların içine doldurulan su boşaltılarak yüzeye çıkılıyor. Bugünkü denizaltıların çalışma esasını teşkil eden bu çalışmayı ise kimin yaptığı bilinmemektedir [1].

Geçmişten günümüze baktığımızda denizaltılar özellikle de deniz savaşlarının meydana geldiği yerlerde çok büyük stratejik öneme sahip olmakla beraber gelişen diğer mühendisliklerin de katkısı ile deniz kenarı olmayan ülkeler içinde önem taşır hale gelmişlerdir. Denizaltıların derinden gidebilmeleri onlara hem görünmezlik sağlayıp hem de serbest su yüzeyinde dalga oluşturmama özelliği verdiğinden dolayı daha düşük dirençlere maruz kalmalarına olanak sağlamaktadır.

Osmanlı Bahriyesinde ilk denizaltı ise Sultan III. Ahmed zamanında düzenlenen sünnet şenliklerinde, tersane mimarı İbrahim Efendi tarafından inşa edilen timsah şeklinde bir sandalın boy göstermesiydi. Yazılanlara göre, sandal tersane koyundan çıkarak tersane bahçesinde Aynalıkavak Kasrı'nın önüne gelerek dalmış, bir müddet sonra padişahın çocuklarıyla oturduğu otağın önünde suyun üzerine çıkmıştır [2].

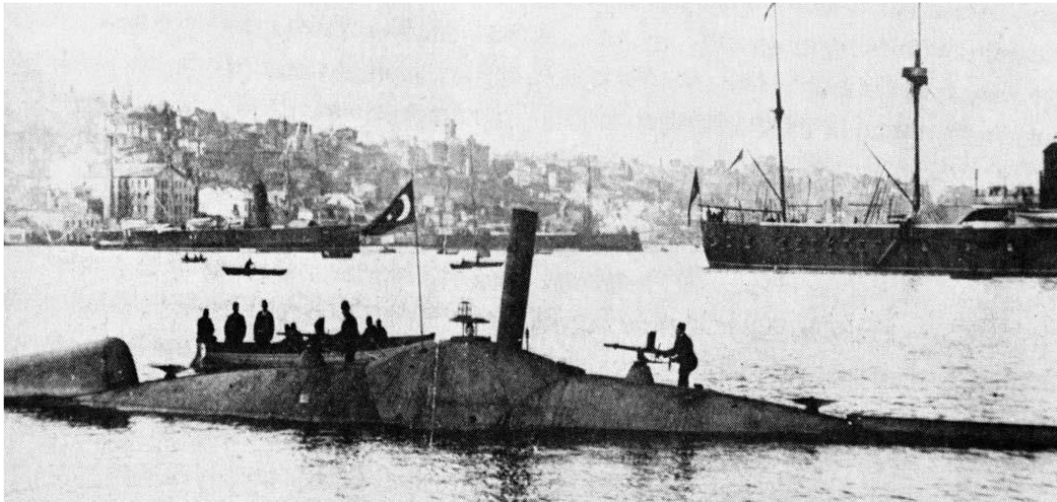
Modern manada ilk denizaltılar; Üçüncü Ahmed Han'ın şenliklerinden yaklaşık yarım asır geçmiştir. Araştırmalar hâlâ devam etmektedir. Amerikalı David Buhnell adlı mucit, kaplumbağa şeklinde bir gemi icat eder. 1801'de "Nautilus" adlı denizaltı gemisi Fransa'da yeterli destek göremez. 1875'te John P. Holland, günümüzdekine en yakın denizaltıyı inşa etmeyi başarır. "Plunger" adını verdiği bu gemi, su üstün de stim (buhar gücü), su altın da batır ya ile hareket edebilmektedir. Nihayet 1878'de İngiliz mühendis George William Garret, elle çalıştırılan 5.30 m. uzunluğun da bir denizaltıyı sualtında yüzdürmeyi başarır. 1885'te İsveçli ağır silah üreticisi Thorten Nordenfelt ve G.W. Garret el ele vererek Stockholm'da ilk ortak gemilerini inşa ederler. Bu denizaltı gemisine, fabrika direktörünün ismine izafeten Nordenfelt-I ismi verilir. Bir baş torpidosu, bir de Nordenfelt topu bulunan denizaltının boyu 24m dir [1].

Osmanlı Bahriyesi, bir silah olarak denizaltı gemisine ilk defa Sultan II. Abdülhamid devrinde sahip olmuştur. Başta İngiltere olmak üzere dönemin denizlerdeki büyük güçlerinin denizaltılara gösterdiği sınırlı ilgiye rağmen Osmanlı Bahriyesi çağın en yüksek teknolojisine sahip iki denizaltıyı Nordenfelt şirketinden ısmarlamıştır [3].

Osmanlı Bahriyesi'nin denizaltı gemisiyle tanışmasından yaklaşık yedi yıl önce, George William Garrett adındaki İngiliz mühendis Resurgam adını verdiği buhar

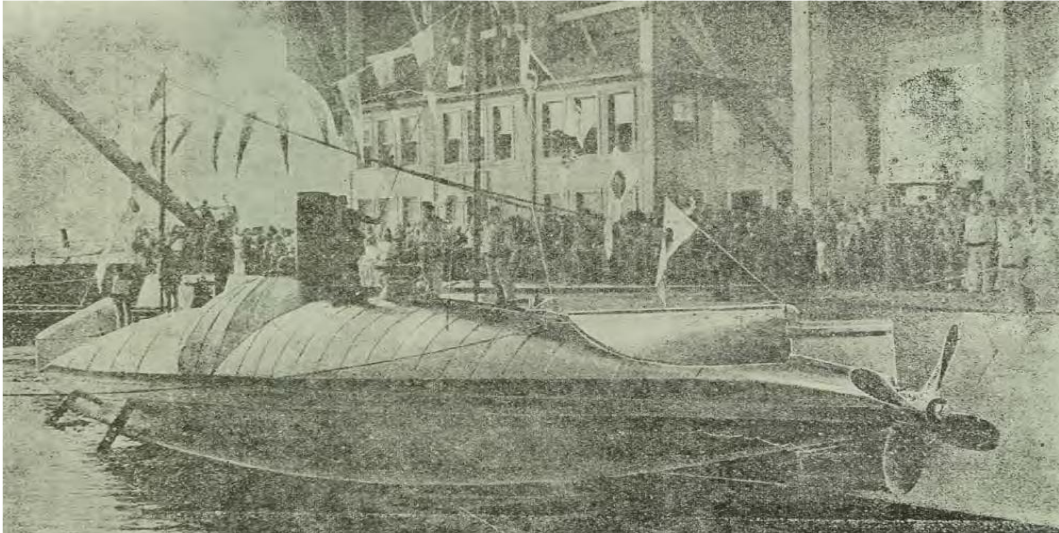
tahrikli makineyle donatılmış denizaltısını tecrübe etmektedir. Dönemin ilk makine tahrikli denizaltısı unvanına sahip olmasına rağmen Portsmouth'dan Birkenhead'e İngiliz Kraliyet Donanması için yapılan gösteri esnasında batmıştır. Başarısızlıkla sonuçlanan denemesinin ardından mali destek arayan Garrett, sonunda İsveçli silah fabrikatörü Thorsten Wilhelm Nordenfelt ile anlaşmıştır. Nordenfelt, denizaltıların ticari potansiyelini fark ederek, 1885 yılında Stockholm'de Garrett'in tasarımı olan Nordenfelt-I denizaltısını inşa ettirmiştir. Kendi ismini verdiği ve buhar gücüyle hareket eden Nordenfelt denizaltıları büyük ticari hedefler gözetilerek seri üretime konulmuştur. Nordenfelt serisi denizaltılardan dört adet üretilmiştir. Bir numaralı Nordenfelt Yunanistan'a, iki ve üç numaralı denizaltılar Osmanlı İmparatorluğu'na teslim edilmiş ve son olarak daha gelişmiş bir tasarım olan Nordenfelt-IV'e Rusya talip olduysa da teslimi esnasında yolda kaza geçirmesi sonucu teslimi hiç gerçekleşmemiştir [4].

Abdülhamid ve Abdülmecid Denizaltılarının Alımı; Tarihte, Osmanlı Bahriyesi, tahtelbahir yani denizaltı gemisini envanterine alan ikinci bahriyedir. 1886 yılında Nordenfelt şirketinden sipariş edilen iki adet denizaltı, Sultan II. Abdülhamid tarafından Hazine-i Hassa'dan ödenmek üzere satın alınarak, "Abdülhamid" ve "Abdülmecid" isimleriyle donanmaya katılmışlardır. Alınan iki denizaltının savunma mı yoksa taarruz maksatlı mı alındığı Türk denizaltıcılık tarihi içerisinde önemli bir tartışma konusudur [5].



Şekil 1.1 Abdülhamid denizaltısının Haliç'te denemeleri yapılırken [1]

“Abdülhamid” ve “Abdülmecid” denizaltılarından başka bahriyeye denizaltı kazandırılmamıştır. Ancak Osmanlı’nın çöküş döneminde baş gösteren sorunlar nedeniyle bu denizaltılarında maalesef kaderlerine terk edildiği kaynaklarda yazmaktadır. Bu iki denizaltıya da sonraki yıllarda gereken önem verilemediğinden Alman mühendisler tarafından yapılan incelemede gövdeleri çürüdüğü için kullanılamaz raporu verildi ve 1910 yılında tamamen hizmet dışı kalmışlardır. Cumhuriyet Dönemi’nin ilk denizaltı alma teşebbüsü ise 1924 yılında gerçekleşti. İlk önce, üç kişilik bir heyet, tetkik gezisi yapmak üzere, Fransa, Hollanda ve İsveç’e gönderildi. Heyet, bu tetkik gezisinde Hollanda’dan denizaltı alınmasına ilişkin bir rapor hazırladı. Bu heyetin raporları doğrultusunda, 1925 yılında Hollanda’ya 519 ton su üstü ve 674 ton su altı tonajında olan iki denizaltı sipariş edildi. Bu siparişler Türkiye’ye getirildi, I. İnönü ve II. İnönü isimleri verilerek 9 Haziran 1928 tarihinde Dolmabahçe’de düzenlenen tören ile Türk donanmasına dahil edildi. Cumhuriyet Dönemi’nin ilk denizaltıları I. İnönü ve II. İnönü, 1948 yılına kadar 20 yıl hizmette kaldı [6].



Şekil 1.2 Abdülmecid denizaltısı suya indirilirken [1]

1929 yılında İtalya ile yapılan anlaşma ile sipariş edilen iki denizaltı gemisinden “SAKARYA” hücum denizaltısı ve “DUMLUPINAR” mayın denizaltısı 1931 tarihinde Dolmabahçe önlerinde yapılan tören ile Donanma’ya katılmış, 1949 yılına kadar hizmette kalmıştır. 1936 yılında İspanya için inşa edilmekte olan

“E1” isimli denizaltı İspanyol iç harbi nedeniyle satışa çıkartılmış ve alınmasına karar verilen denizaltı Türk sancağı çekilerek “GÜR” adı verilmiş ve 1949 yılına kadar hizmette kalmıştır. Aynı yıl Alman Germania Werft Firması’na ikisi Alman Krupp Tersaneleri’nde, ikisi Taşkızak Tersanesi’nde inşa edilmek üzere 4 adet AY sınıfı denizaltı siparişi verilmiştir. Hücum denizaltıları “ATILAY” ve “YILDIRAY” Taşkızak Tersanesi’nde, aynı tonajda olan hücum denizaltısı “SALDIRAY” ve mayın denizaltısı olan “BATIRAY” Almanya’da inşa edilmiştir. 1939 yılında İngiltere’ye REİS sınıfı olarak isimlendirdiğimiz 4 denizaltı siparişi verilmiştir [7].

II. Dünya Savaşı’ndan sonra Truman Doktrini’ne bağlı olarak ABD’den Marshall yardımı kapsamında 1948 yılında 11 gemi ve 4 adet denizaltı alınmıştır ki bunlar yardım programının tamamını oluşturmaktadır [8]. Daha sonra ise 1950 yılında, Marshall Yardımı’ndan iki denizaltı gemisi daha alınmıştır. Bu gemiler “TCG ÇANAKKALE” ve “TCG DÜMLUPINAR” şnorkel sistemine sahip ilk denizaltılarımız olmuşlardır. “TCG DÜMLUPINAR”, bir NATO tatbikatından dönerken 4 Nisan 1953 tarihinde Çanakkale Boğazı Nara Burnu önlerinde İsveç bandıralı Naboland şilebi ile çarpışarak batmıştır [7].

Denizaltıcılığımızda bir diğer aşama, NATO’nun Türkiye’ye Savunma yardımı çerçevesinde, 1975 yılından itibaren Alman yapısı 1000 tonluk AY sınıfı (Type 209) denizaltıları alma kararıyla daha geniş boyutlara ulaşmıştır. AY sınıfı denizaltı gemilerinden çok daha gelişmiş olan ve güdümlü mermi (Sub Harpoon) atabilen 1400 tonluk 4 PREVEZE sınıfı denizaltı 1998 tarihinde donanmaya katılmışlardır [7]. Bu denizaltılara yeni çıkan sistemlerin entegrasyonu, gerekli modernizasyon ve ömür uzatma işlemleri halen yapılmaktadır.

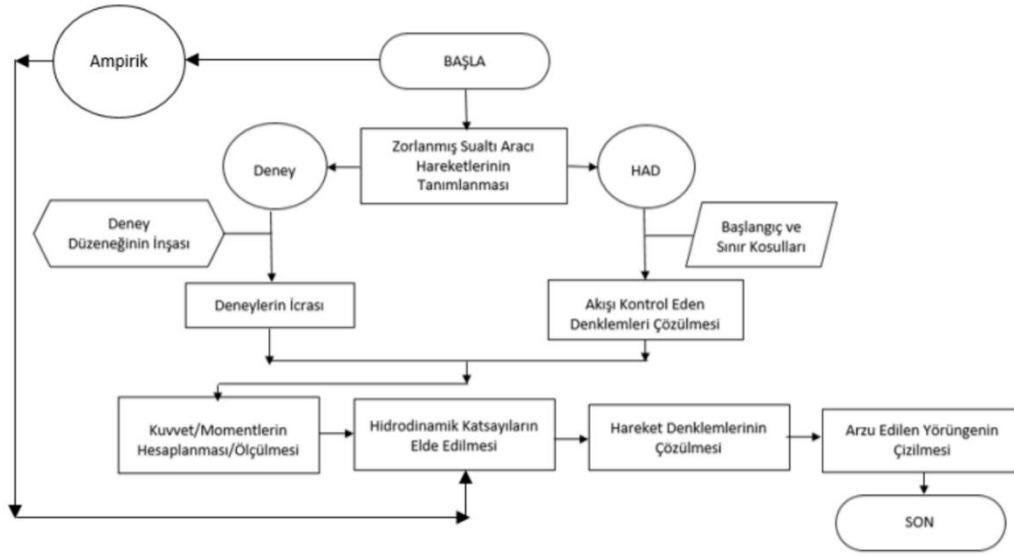
Bir denizaltı görevi ne olursa olsun asgari düzeyde bir manevra yeteneğine sahip olmalıdır. Özellikle askeri alanda operasyon verimini yüksek tutmak ve verilen görevleri başarıyla tamamlamak için ayrı bir önem arz etmektedir. Denizaltılar gizliliklerini koruyabilmek ve çeşitli görevleri icra edebilmek için olabildiğince derinden gitmelidirler. Taze hava gereksinimi ve bataryaların şarj edilmesi gibi sebeplerle şnorkel yapmak zorunda kalabilmektedirler. Bu nedenle denizaltıların derinlerde veya yüzeye yakın olduklarında hareket ve manevra kabiliyetlerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Manevra yeteneğinin iyi olup olmasını belirleyen faktörler vardır. Bunlardan birincisi bir denizaltının ya da geminin belirtilen tarafa kontrol edilebilir durumda rotasını istediği tarafa değiştirebilmesidir. İkincisi ise belirlenen yeni rotada diğer yönlere yönelmeler olmadan yoluna devam edebilmesidir. Deniz araçlarının tasarımında öndizayn kısmında manevra yeteneklerini kestirebilmek adına yapılan çeşitli çalışmalarda genellikle odaklanılan alanlar; aynı rotada ilerleyebilme, dinamik stabilite, rotasyonel yetenekler, başka bir rotaya geçebilme ve durmak gerektiği zaman istenilen mesafede durabilmek gibi parametrelerdir. Manevra kabiliyetini etkileyen çeşitli takıntı bileşenleri mevcuttur. Dönme kabiliyetini etkileyen en önemli bileşen dümenlerdir. Her mühendislik çalışmasında olduğu gibi elbette dümenlerin tasarımı ve optimizasyonu ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Farklı tasarıma sahip dümen geometrileriyle ilgili literatürde kıyaslama çalışmaları bulunmaktadır. Manevra özelliklerinin ön görülebilmesi adına ilk adımda lineer yaklaşımlardan yararlanılır. Manevra karakteristiklerini belirlerken sonraki ileri adımlar (kontrol ve sevk sistemlerinin dahil edilmesi) içinse lineer olmayan yöntemlerin kullanılması gerekir. Çeşitli manevra çalışmalarından kasıt ileri öteleme, yanal öteleme, dalıp çıkma, yalpalama, baş-kıç vurma ve savrulma durumlarıdır. Başlangıçta matematiksel denklemlerde yer alan hidrodinamik manevra katsayıları çeşitli yöntemlerle hesaplanabilmektedir. Bu çeşitli yöntemler; ampirik yöntemler, yarı-ampirik veya istatistiksel verilerden yararlanılarak elde edilen yöntemlerdir. Bu yöntemlerin kullanımı ile birlikte manevra yeteneği için önemli olan değişik tekne-dümen-pervane etkileşimli modeller için dönebilme, rotasını değiştirebilme ve istenilen neticede durabilme özelliklerinin tahmini yapılabilmektedir [9].

Denizaltılarla ilgili yapılmış olan çalışmalara bakarsak; Sabucu (1985) kitabında İnsanlı veya insansız olarak kontrolleri yapılabilen denizaltı araçlarının arama kurtarma faaliyetleri, çeşitli araştırma faaliyetleri, sualtı bakım-onarım faaliyetleri gibi birçok farklı maksatla kullanılabileceğini ve tüm bu faaliyetler gerçekleşirken deniz tabanına yakın bulunmak zorunda olan denizaltıların taban etkisinden kaynaklı denizaltıya etki eden kuvvetlerin ve momentlerin hızlı ve etkili bir şekilde değişeceğini belirtmiştir [10].

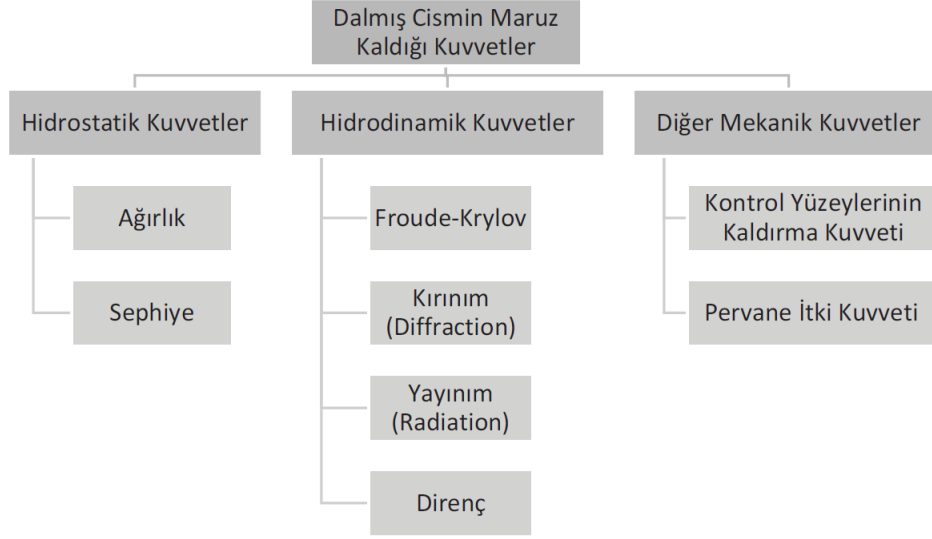
Bu sebepten ötürü farklı maksatlarla kullanılan denizaltıların hidrodinamik özelliklerinin çok iyi olması ve önemli manevra yapması istendiğinde hızlı ve

düzgün bir şekilde kendisini düzeltebilip gereken manevraları yapabiliyor olması beklenir. Sonuç olarak manevra yeteneklerinin daha ilk kısımlarda, dizayn süreci içerisinde düzgün bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Gemilerde nasılsa denizaltılarda da manevra özelliklerinin ilk dizayn safhalarında belirlenmesi şekil-1’de gösterildiği gibi ampirik formüller, HAD analizleri ve deneysel çalışmalar yardımıyla olmaktadır [9].



Şekil 1.3 Dalmış bir cisim için manevra tahmin yöntemleri [9]

Denizaltı gibi dalmış bir cisme etki eden hidrostatik ve hidrodinamik kuvvetler vardır. Denizaltının manevra karakteristiklerinin nasıl etkilendiği denizaltıya etkiyen kuvvetlerdeki değişimin analizi ile anlamak mümkündür. Saout (2003) yazmış olduğu tezinde dalmış bir cisme etkiyen kuvvetleri şekil-2’de olduğu gibi sınıflandırmıştır [11].



Şekil 1.4 Dalmış bir cisme etkiyen kuvvetler [11]

Denizaltılar her ne kadar gemilere çok benzese de manevra konusunda bazı farklılıklar söz konusudur. Bu farklılıkların başında, suüstü gemilerindeki gibi sadece yatay düzlemde değil batmalarından kaynaklı dikey düzlemde de manevra yapabilmeleri gerektiğinden dolayı başta tarafta ve kıç tarafta yatay ve düşey olmak üzere kanatlara (finlere) sahiptirler. Dikey düzlemde oluşan hareketlerin matematiksel denklemlere dahil edilmesiyle çözümü yapılması gereken denklem sayısı artmış olur [9]. Yapılan araştırmalarda genellikle kullanılan test (benchmark) gemi modelleri (KCS, KVLCC, DTMB, HTC, DTC, S-175, ESSO OSAKA, WIGLEY, DELFT372) ve denizaltı geometrisi modeli olarak (DARPA SUBOFF, BB2 JOUBERT, DRDC STR ve DTMB 5484) modelleri kullanılmaktadır. Sıklıkla aynı modellerin kullanılma nedenleri ise, literatürde validasyon ve verifikasyon yapılabilecek verilere ulaşılabilmesi ve oluşturuldukları araştırma merkezlerince gerekli optimizasyonlarla akıma uyumlu (streamlined) formlar haline geliştirilmiş olmalarıdır.

Denizaltılar genellikle askeri amaçlar için tasarlandıklarından dolayı çoğu durumda geometrileri araştırmacıların kullanımına kapalıdır. Bu sorunu çözmek amacıyla, dünya çapında birçok kuruluş ve enstitü, araştırmacılara incelenecek su altı araçlarının standart geometrik özelliklerini ana hatlarıyla yansıtan jenerik geometriler sağlayarak, bu geometrilerin temelinde şekillenen ve sonuçların karşılaştırılabileceği bir literatür oluşturmayı hedeflemiştir. Aynı zamanda,

araştırma sonuçlarını doğrudan gerçek denizaltı geometrilerinde kullanmayı amaçlamışlardır.

1980'li yıllarda DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) tarafından desteklenen denizaltı teknolojisini geliştirme amaçlı araştırma ve geliştirme çalışmalarına destek verilmiştir. Darpa Suboff projesi dahilinde, farklı konfigürasyonlarda eklentili ve eklentisiz gövde ve takıntıların formu, matematiksel formülasyonlarla tanımlanabilen bir denizaltı modeli dizayn edilmiş ve Groves v.d tarafından geometrik özellikleri paylaşılmıştır [12]. Huang ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, DARPA Suboff denizaltı modelinin deney testlerinde kullanılan deneysel test düzeneğinin dizaynı ve kullanılan gerekli deneysel ekipmanları sunulmuştur [13].

Destek kapsamında üretilen ve DARPA Suboff ismiyle adlandırılan, simetrik gövdesi olan denizaltı modeli hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılım paketlerinin doğrulanması amacıyla değişik konfigürasyonlar için direnç testleri model test havuzunda, basınç ve iz ölçümleri ise rüzgar tüneline gerçekleştirilmiştir. DARPA Suboff denizaltı modelinin farklı farklı konfigürasyonlarının direnç ölçüm testleri Liu ve Huang tarafından Reynolds sayısı $Re=12 \times 10^6$ olacak şekilde yapılmış ve sunulmuştur. Liu ve Huang (1998) tarafından sunulan çalışma, Darpa Suboff denizaltısının farklı konfigürasyonlarından kaynaklanan çeşitli takıntıların iz karakteristiklerini, statik basınç dağılımlarını, sınır tabaka hız profillerini, basınç ve sürtünme ölçümleriyle elde edilen verileri içermektedir [14].

Ayrıca denizaltılarla da ilgili yapılacak olan çalışmalarda ITTC-manevra komitesi tarafından DARPA Suboff denizaltısının takıntısız formu olan AFF-1 konfigürasyonu ve tam takıntılı konfigürasyon olan AFF-8 geometrisinin kullanılması önerilmiştir [15].

Bu yüksek lisans tezi kapsamında literatürde hem deneysel hem de sayısal verileri yayınlanmış ve halen üzerinde sıklıkla çalışmalar yapılan jenerik denizaltı geometrisi olarak bilinen DARPA Suboff denizaltısı ve INSEAN E1619 jenerik pervanesi seçilmiştir.

Submarine Hydrodynamics isimli kitapta denizaltı pervanesi tasarlamakla ilgili, uçak pervaneleri için bazı mevcut verilerin olduğu (örneğin bakınız: Ribner 1943)

lakin bunun modern denizaltı pervanelerine ne kadar uygulanabilir olduğunun açık olmadığı belirtilmiştir. Böylece, daha doğru veriler bilinmedikçe, manevra çalışmalarındaki pervane etkisini tahmin etmek mümkün olmayabilir [16]. Bu tez kapsamında yedi kanatlı INSEAN E1619 jenerik denizaltı pervanesi seçilmiş olup ilerleyen kısımlarda daha detaylı ele alınacaktır.

Gerek pervane gerekse denizaltı ve bileşenlerinin tasarımında optimum değerlere ulaşabilmek için hem sayısal hem de deneysel tahmin yöntemlerinden etkin bir şekilde yararlanmak gerekir. Pervaneler üzerinde yapılan HAD çalışmaları da son zamanlarda yaygınlaşmıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri yöntemleri, pervanelerin karakteristiklerinin incelenmesinin yanında kavitasyon testleri ve akustik analizler için de kullanılabilir. Bu yöntemler, pervane performansının ve etkinliğinin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olur. Ancak, HAD analizi yöntemlerindeki gelişmelere karşın, maalesef sonuçlarda gözüken hata oranları halen model testi deneylerinin önemini korumaktadır [17]. Bu durumun başlıca nedenleri karmaşıklık ve belirsizlik (denizaltı pervanelerinin hidrodinamik etkileşimleri oldukça karmaşık olabilir ve tam olarak modellenmesi zor olabilir), gerçek dünya koşullarının dikkate alınması (örneğin dalga etkileri, suyun tuzluluk derecesi ve sıcaklık değişimleri), malzeme ve üretim farklılıklarının modele tam yansıtılamaması olarak sayılabilir. Model deneyleri, gerçek dünya koşullarında pervanelerin performansını daha doğru bir şekilde değerlendirmek ve hata oranlarını azaltmak için önemli bir araç olarak kullanılmaktadır. Ancak, HAD yöntemleri teknolojik olarak geliştikçe ve daha fazla veri toplandıkça, bu yöntemlerin doğruluğu ve uygulanabilirliği artabilir.

INSEAN model deney havuzunun tasarlayıp paylaştığı "E1619" pervanesi olarak bilinen çalıklığı fazla olan ve yedi kanata sahip olan temsili bir denizaltı pervanesi modelidir. Di Fellice vd. (2009), bu pervaneye ait olan iz ve açık su karakteristiklerini, deney yaparak ve sayısal tahmin türlerini kullanarak hesaplamışlardır [18]. Çalışmalarında akışkanın sahip olduğu hızları, Lazer Doppler Hız Ölçer (Laser Doppler Velocimetry - LDV) kullanarak ölçmüşler ve açık kaynak yazılımında Large Eddy Simulation (LES) yöntemini kullanarak iki farklı çözüm ağı yoğunluğunda hesaplamaları gerçekleştirmişlerdir. Üç adet farklı ilerleme hızı için pervane gerisinde oluşan iz üç farklı düşey düzlem üzerinde hesaplanmıştır. Ayrıca oluşan düzensizliklerin, daha az kanat sayısına sahip bir

pervaneye kıyasla pervane diskine daha yakın bölgede oluştuğuna değinilmiştir. LES tahmin yöntemleri ve yapılan ölçümlerin sonuçlarının iz, itme, tork değerlerinin uyumlu olduğu görülmüştür. Pervaneye ilgili sonuçlarının tamamının, deneylere nazaran %5 farkla elde edilebileceğine değinilmiştir.

Kırıkbaş vd (2021), sualtı araçlarının manevra karakteristiklerinin incelenmesi adlı çalışmalarının birinci kısmında sualtı araçlarının manevra analizlerinde kullanılan yaklaşımların sınıflandırılması ve jenerik (benchmark) geometriler ile standart manevraların incelemesini yapmışlardır. Aynı çalışmanın ikinci kısımda ise sualtı aracının akışkan sınırlarına yakınlığından dolayı oluşabilecek sapmaları kapsamlı bir literatür taraması ile ele almışlardır [19], [20].

HAD analizi yöntemiyle ve ampiriksel denklemler yardımıyla birbirinden farklı olan iki farklı model formunda insansız denizaltının yanal hızına bağlı olarak bazı manevra türevlerini ($Y_v, Y_{vvv}, N_v, N_{vvv}$) belirlemişlerdir. Atak açıları az olduğunda sınır tabakada herhangi bir ayrılma söz konusu değildir. Bu yüzden lineer manevra türevlerine ulaşılabilceği viskoz olmayan sayısal hesaplamalarla da mümkün olduğu gösterilmiştir. Denizaltılarla ilgili olan deneysel çalışmaların azlığından dolayı kendi sonuçlarını benzer geometrilerin sonuçları ile mukayese etmişlerdir [21]. Sukas vd, genliği fazla olan araçlar için yüksek Fr sayılarında statik ağ örgüsünün (rigid mesh) yeterli olmadığını, bu yüzden dinamik ağ örgüsü (overset mesh) kullanılması gerektiğini, dinamik ağ örgüsü kullanıldığında sonuçların deneysel sonuçlarla çok daha uyumlu olduğunu ifade etmişlerdir. Denizaltılar için akışkan içerisinde yüksek genlikli dalgalar yapmasından kaynaklı dinamik ağ örgüsü dediğimiz overset mesh kullanılmasının çok daha iyi olduğunu ifade etmişlerdir [9].

Yapılan başka bir denizaltılarla ilgili çalışmada ise bir denizaltının yükselirken veya batarken dönme kabiliyeti analiz edilmeye çalışılmıştır. HAD yöntemi kullanılarak yapılan çalışmada referans model olarak jenerik Joubert BB2 denizaltısı seçilmiştir. Bu çalışmada amaç dikey ekseninde yükselirken ve dalarken dönme kabiliyetini analiz etmektir. Bunun için öncelikle kendinden tahrikli altı hidrokinamik hareketin tam dönme ve spiral dönmede dahil edilerek simülasyonu yapılmıştır. Yapılan sayısal çalışmalarla deney sonuçlarının tutarlılığı belirtilmiştir. Kendinden tahrikli testlerin HAD ile çok daha uygun maliyetle

yapılabileceğini ve pahalı olan kendinden tahrikli testlerin yerini alabileceğini belirtmişlerdir [22].

Literatüre bakıldığı takdirde denizaltıların manevra performansları belirlenmeye çalışılırken sıklıkla, DARPA Suboff denizaltı modelinin değişik konfigürasyon modellerinin kullanıldığı ve manevra türevlerinin yanı sıra dip etkisi ve serbest su yüzeyi etkisinin hesaba katıldığı hidrodinamik kuvvetler ve momentler üzerindeki etkisinin incelendiği görülmektedir. Etkiyen sürtünme kuvvetinden kaynaklı değişik türbülans modellerinin kullanılması sonucu oluşan etkiler de araştırılan diğer konular arasındadır [9].

Atik (2021), yapmış olduğu çalışmada DARPA denizaltı modelinde uygun çözüm ağını ve türbülans modelini statik sürükleme test simülasyonları gerçekleştirerek belirlemiştir. Sonuçlar literatürde bulunan sürükleme test sonuçları ile desteklenmiştir. Tüm modellerin analizlerinde küçük kayma açılarındaki birbirlerine yakın sonuç verdiğini, kayma açısının değeri büyüdükçe modeller arasında küçük farklılıklar görüldüğünü belirtmiştir. En yakın sonucun SST $k-\omega$ türbülans modeli ile elde edildiğini, 8° kayma açısından sonra tüm modeller ile deneysel veriler arasında yaklaşık %10 kadar farklılık bulunduğunu belirtmiştir [23].

Çeşitli ülkelerin farklı kurumlarından katılımlarla oluşturulan ve denizaltı hidrodinamik çalışma grubu olarak adlandırılan ekibin üyelerinin beraber yapmış olduğu hesaplamalı akışkanlar dinamiğine dayanan çalışmada RANS denklemleri kullanılarak denizaltı etrafındaki akış ve hidrodinamik kuvvet ve momentler zamandan bağımsız taşınım hareketi (steady drift motion) için belirlemeye çalışmışlardır. Farklı milletlerden katılan araştırmacılar kendi yazdıkları paket programlarla farklı türbülans modellerinde ve çözüm ağlarında analizlerini DARPA Suboff için gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen analiz sonuçları deneysel veriler ile kıyaslanarak doğrulamaları gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak çalışmalarında türbülans modelinin seçiminin önemine değinmişlerdir [24].

Sezen vd. (2018), E1619 pervanesi ile DARPA Suboff denizaltısının direnç ve kendinden tahrik analizlerini hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemini kullanarak yapmışlardır. Sayısal çalışmalarında pervane gövde etkileşimini dikkate alarak yapmışlar. Bunun için ilk olarak pervane bir aktüatör diski olarak

modellenip deneysel çalışmalarla karşılaştırıldıktan sonra pervanenin kendisini dönen bir bölge olarak gövdenin arkasına modellemişlerdir [25].

Chase ve Carrica (2013), yapmış oldukları çalışmada genel DARPA formunun takıntı bileşenleri ve E1619 model pervanesi ile sevk performansını model ölçeğinde ve pervane performans analizinde incelemişlerdir [26]. Denizaltı modelini doğrusal hareket ve sancak dönüşü durumlarında incelemişlerdir. Doğrulama yapabilmek adına dört farklı mesh yoğunluğunda ve üç zaman adımı boyunca aynı ilerleme katsayısı kullanılarak yapılmıştır. İz üzerindeki hızlarla deney çalışmalarının sonuçları kıyaslanmış ve sonuçların birbirleriyle uyum içinde olduğu sunulmuştur.

Arıkan zden (2017) yapmış olduğu doktora tezinde DARPA Suboff jenerik denizaltı model geometrisini kullanarak kı formunun sayısal ve deneysel olarak incelemesini yapmıştır. Ayrıca kı daralması ile boy ve genişlik oranının sevk sistemi üzerine etkilerini sayısal yöntemler kullanarak araştırmışlardır. Deney testleri altında Türkiye’de ilk defa bir denizaltı modeli sevk deneyleri gerçekleştirilmiştir. DARPA Suboff denizaltı geometrisi modeline Italian Ship Model Basin (INSEAN) kurumunca dizayn edilen E1619 pervanesi eklenerek sayısal yöntemlerle sevk karakteristikleri bulunan pervaneli modelin sonuçlarının doğrulanmasını yapabilmek için deney yaparak literatüre sunmuşlardır. alışmalarında denizaltı modellerini test edebilmek için ürettikleri test sistemiyle pervaneli DARPA Suboff AFF-8 konfigürasyonunun farklı hızlar için direnç-sevk analizlerini İTÜ model deneyi havuzunda yapmışlar ve sonuçlarını açık literatüre sunmuşlardır. Sonuçlar var olan çalışmalarla kıyaslanmış ve iyi bir uyum olduğu gözükmüştür. Kendinden tahrikli analizler yapabilmek adına E1619 pervanesinin sevk noktası tayin edilmiş ve deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Boy ve genişlik oranları değişik olan başka denizaltı geometrileri türetilerek onların kendi kendini sevk edebildiği noktalar belirlenmiş sevk özellikleri tahmin edilmiştir. Sonuç olaraksa boy/genişlik oranı arttıkça denizaltıya ait olan itme azalma katsayısı ile beraber tekne veriminin azalmaya meyilli olduğu gözlemlenmiştir [27].

Başka bir çalışmada ise akademik araştırmalarda yoğunlukla üzerinde çalışılan DARPA Suboff eklentisiz formuna ait hidrodinamik özellikler (direnç, sevk, iz gibi) hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak iki farklı hız için incelenmiştir. Sevk noktasının belirlenmesi için bilimsel çalışmalarda sıklıkla kullanılan DTMB4119 model pervanesi ve aktüatör disk teorisi seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar deneye dayalı olarak incelenmiş ve sevk performansı tayin edilmeye çalışılmıştır [28].

Özden vd (2021), manevra testlerinde kullanabilmek için İstanbul Teknik Üniversitesi'nde tasarlanan ve geliştirilen kompakt bir düzlemsel hareket mekanizması tabanlı gemi modeli manevra test sistemini anlatmışlardır. İTÜ-PMM öncelikle sabit sürüklenme ve dümen sapmalı eğik çekme gibi statik testler dahil olmak üzere standart sabit manevra testlerini ve bir takım dinamik testleri gerçekleştirmek için tasarlanmıştır. Sistemin ana bileşenlerinden olan servo motorlar bağımsız olarak kontrol edilebildiği için standart testlerin dışında testlerinde yapılabileceğine değinmişlerdir. Kurulan sistemi kalibre etmek ve doğrulamak için SIMMAN 2008 benchmark model (DTMB 5415) kullanılmıştır [29].

Özden (2021) yapmış olduğu doktora tezinde İTÜ Gölü'nde veya benzeri çevre koşullarında çalışacak şekilde tasarlanan (free-running manoeuvring system) serbest manevra sistemini, SIMMAN (2008) ve SIMMAN (2014) konferanslarında test edilen bir yüzey muharebe modeli üzerine monte ettiler. İki tip çalışma moduna sahip olan sistem; biri uzaktan kumandalı diğeri ise otonom modda olacak şekilde tasarlandı. Ölçülen zig-zag ve dönüş dairesi grafikleri, büyük test tesisleri tarafından elde edilenlerle karşılaştırılmış ve diğerlerinin sonuçlarıyla uyumları çok tatmin edici bulunmuştur [30].

Sukas vd. manevra ile ilgili yapmış oldukları çalışmanın ikinci makalesinde IMO'nun önerdiği gemi manevra yetenekleri kriterlerine dayanarak yapılması gerekli olan dönme, zigzag ve durma gibi standart olan manevra testlerine değinmişlerdir. Bu manevra testlerinin hangi durumlarda nasıl gerçekleştirildiği, çıkan sonuçların ne şekilde yorumlanması gerektiğine dair bilgiler sunulmuştur. Bir geminin dönebilme yeteneği ve doğrusal rotada ilerleyebilme stabilitesinin varlığına (sırasıyla K ve T) indeksler kullanarak ne şekilde karar verilebileceğini anlatmışlardır [31].

Kahramanoğlu (2023) çalışmasında, tamamen eklentili DARPA Suboff denizaltı formu için üç farklı ölçekte ölçek etkisini incelemiştir. Bu amaçla, öncelikle DARPA Suboff model ölçeği için pure sway (saf sürüklenme Y eksenini boyunca) ve pure yaw (saf yalpa Z eksenini etrafında) testleri sayısal olarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal sonuçlar doğrulandıktan sonra, çalışma çeşitli modelleri yeniden üretmiş ve karşılaştırmıştır. Karşılaştırma, pure yaw analizlerinden elde edilen sürüklenme kuvvetlerinin (sway forces) ölçek değişikliklerine karşı önemli bir duyarlılık gösterdiğini, ancak pure sway analizlerinden elde edilen sürüklenme kuvvetlerinin (sway forces) daha az duyarlı olduğunu ortaya koymuştur. Sonuçlar ayrıca ne pure sway ne de pure yaw analizlerinin yaw momenti değerlerinde ölçek değişikliklerine karşı önemli bir duyarlılık göstermediğini göstermiştir [32].

1.2 Tezin Amacı

Deniz araçlarının manevra kabiliyetlerinin değerlendirilmesi Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) tarafından belirlenen manevra standartlarının karşılanıp karşılanamamasına bağlıdır. Bir deniz aracı tasarlanıp inşa süreci bittikten sonra ancak manevra testlerine katılabilmektedir. Bu durum bir nevi problem teşkil etmektedir. Bu yüzden henüz tasarım aşamasında iken manevra kabiliyetinin iyi derecede tahmin edilmesi gerekmektedir.

Bu yüksek lisans tezinde amacımız bilimsel çalışmalar da sıklıkla kullanılan ve kullanılması tavsiye edilen jenerik DARPA Suboff denizaltı modeli üzerinde statik drift durumunda manevra katsayılarının elde edilmeye çalışılmasıdır. Elde edilen bu katsayıların matematiksel modelde yerine koyularak denizaltı modelinin manevra kabiliyeti tahmin edilmeye çalışılmıştır.

1.3 Hipotez

Ön dizayn aşamasında herhangi bir deniz aracının manevra kabiliyetinin güvenilir bir şekilde tahmin edilebilmesi önem arz etmektedir. Manevra performansı belirlemek için bilindiği üzere bir takım model deneyleri yapılır. Son yıllarda sürekli artan hesaplama gücü ve bilgisayar kapasiteleri ile birlikte HAD (hesaplamalı akışkanlar dinamiği) uygulamaları kullanılarak manevra kabiliyetleri hakkında fikir sahibi olunmaya başlanılmıştır. Bir gemi henüz tasarım aşamasında

iken gerekli HAD analizleri ile ya da manevra-model testleri ile kuvvet ve moment değerleri elde edilebilir. Bu elden edilen değerlerden yola çıkılarak bazı manevra katsayıları bulunur. Bu katsayılar da matematiksel modelde yerine konulduktan sonra manevra tahminleri elde edilmeye başlanır.

Literatürde manevra ile ilgili çalışmalara baktığımızda sıklıkla karşılaştığımız daha önceden önerilmiş olan iki yöntem mevcuttur. İlk model Abkowitz(1964), gemiyi bir bütün olarak ele alarak tekne üzerine etkiyen kuvvetlerin ve momentin bulunduğu hareket denklemlerini çözülmesine dayalı olan, hidrostatik kuvvetlerin ve momentin üçüncü dereceden Taylor serisine açılmasına dayanan Abkowitz'in önermiş olduğu matematiksel modeldir. Diğer bir model ise kuvvetlerin ve momentlerin etkilerinin pervaneye, dümene ve tekneye olan etkilerini ayrı ayrı değerlendiren MMG (Matematiksel Modelleme Grubu) modelidir. Bu modellere ilerleyen kısımda daha detaylı değinilecektir.

Manevra üzerine yapılan çalışmaların az olması ve denizaltılarla ilgili çalışmaların son yıllarda artış göstermesi bu konunun seçilmesindeki temel motivasyon kaynağı olmuştur. Farklı açılarda statik drift durumunda x ve y eksenindeki kuvvetler ile z eksenini etrafında oluşan savrulmadan kaynaklı N momenti elde edilmeye çalışılmıştır. DARPA Suboff'un literatürde var olan HAD ve deneysel sonuçlarının ulaşılabilir olması böylece elde edilen değerlerin doğrulanmasının yapılabilecek olması diğer bir motivasyon kaynağıdır.

2.1 Gemi Manevra Modelleri

Genel anlamda manevra hareketi geminin üç serbestlik derecesi için düşünülebilir. Gemini yatay düzlem hareketleri olarak da bilinen bu hareketler, ileri öteleme, yanal öteleme ve savrulma hareketlerinden meydana gelmektedir [33]. Statik sürüklenme durumunda bu çalışmada bu üç hareket incelenmiştir. Referans olarak kullanılacak olan DARPA Suboff denizaltı modelinin manevra türevleri deneysel olarak yapılmış olan çalışmalarından elde edilmiştir.

Gemi manevraları ile ilgili kurulacak olan matematiksel modelden önce eksen takımlarının doğru bir şekilde belirlenmesi gerekir. Manevra ile ilgili çalışmalarda manevra yapan gemi için sabit ($o_0-x_0y_0z_0$) ve bağlı ($o-xyz$) eksen takımları olmak üzere iki farklı koordinat sistemi tanımlanmıştır. Sabit eksen takımının orijini genellikle manevra hareketinin başladığı nokta kabul edilirken bağlı eksen takımının orijini geminin ortası (midship) ya da ağırlık merkezi (LCG) olarak kabul edilir [9]. Yasukawa ve Yoshimura yapmış oldukları çalışmalarında, bağlı eksen takımının orijininin yüklenme durumuna bağlı olarak ağırlık merkezinin yerinin değişebileceğini belirtmişler ve bu yüzden gemi ortasında alınmasının daha uygun olacağını ifade etmişlerdir [34].

Denizaltının yatay hareketlerini açıklayan matematiksel model incelendiğinde, denklemden bulunan hız ve ivme manevra katsayılarının (türevlerinin) elde edilmesi elzemdir. Bu katsayıları elde etmenin farklı yöntemleri mevcuttur. Kahramanoğlu ve Çakıcı'nın çalışmalarında belirttiği bu yöntemler [35];

- 1-) Manevra deneyi ile (PMM yaw, PMM sway, rotating arm, statik drift test)
- 2-) Çoklu regresyon analizi ile (Benzer gemilerin/denizaltıların deney sonuçlarından yararlanarak)
- 3-) HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) ile (Genelde sonlu hacimler yöntemi kullanılarak)

Manevra türevlerinin elde edilebilmesinde kullanılan bu yöntemlerden manevra deneyleri maliyetli olması ve fazla zaman aldığından dolayı kavram dizayn adımında tercih edilmez. Onun yerine çoklu regresyon analizi dediğimiz benzer geometrilere (mevcutsa eğer) yola çıkılarak yapılan analizler tercih edilebilir. Bilgisayar teknolojisinde yaşanan gelişmelerle birlikte HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) kullanımı yaygınlaşmış ve manevra türevlerinin hesabı da mümkün olmuştur.

2.1.1 Hareket Denklemlerinin türetilmesi

Önceki çalışmaları incelediğimiz takdirde geleneksel olan formlar üzerinde yapılan çalışmaların genelde 3DOF (3 serbestlik dereceli) olduğunu görmekteyiz. En matematiksel temel olan ve kullanımı en çok tercih edilen modelin sadece yatay düzlem hareketlerinin hesaba katıldığı yani ileri öteleme, yanıl öteleme ve savrulma hareketlerinin incelendiği model olduğu görülmektedir.

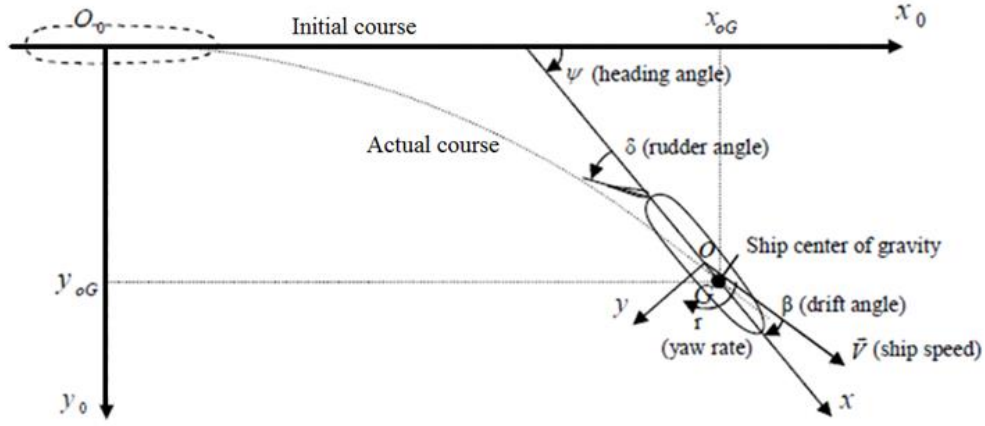
Sabitlenmiş koordinat sisteminde geminin karşılaştığı x_0 yönündeki kuvvet X_0 , y_0 yönündeki kuvvet Y_0 ve savrulmadan dolayı z_0 eksenini etrafında oluşan moment N ile temsil edilirse, Newton'un ikinci hareket kanununa göre aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$X_0 = m\ddot{x}_G \quad (2.1)$$

$$Y_0 = m\ddot{y}_G \quad (2.2)$$

$$N = I_z \dot{r} \quad (2.3)$$

Verilen bağıntılarda $\ddot{x}_G$, x_0 doğrultusundaki ivme; $\ddot{y}_G$, y_0 doğrultusundaki ivme ve $\dot{r}(\psi)$ ise z doğrultusundaki açısal ivmeyi temsil etmektedir. Burada x_G ve y_G geminin ağırlık merkezinin koordinatını ve ψ (heading angle) ise gemi koordinat sistemiyle sabitlenmiş koordinat sisteminin yaptığı açı, yani savrulma açısıdır. “ m ” kütleyi yani geminin deplasman ağırlığını, I_z ise z eksenini etrafında geminin ağırlık merkezinin konumundan alınan atalet momentini göstermektedir.



Şekil 2.1 Gemi manevrası için sabit ($O_0-x_0y_0z_0$) ve bağlı ($O-xyz$) eksen takımları [49]

Her eksen için öteleme hızları ve ivmeleri aşağıda verilmiştir:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x} = u \rightarrow \text{surge velocity} \\ \dot{y} = v \rightarrow \text{sway velocity} \\ \dot{z} = w \rightarrow \text{heave velocity} \end{array} \right\} \xrightarrow{\frac{d}{dt}} \left\{ \begin{array}{l} \ddot{x} = \dot{u} \rightarrow \text{surge acceleration} \\ \ddot{y} = \dot{v} \rightarrow \text{sway acceleration} \\ \ddot{z} = \dot{w} \rightarrow \text{heave acceleration} \end{array} \right\}$$

Her eksen için dönme hızları ve ivmeleri aşağıda verilmiştir:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\phi} = p \rightarrow \text{roll rate} \\ \dot{\theta} = q \rightarrow \text{pitch rate} \\ \dot{\psi} = r \rightarrow \text{yaw rate} \end{array} \right\} \xrightarrow{\frac{d}{dt}} \left\{ \begin{array}{l} \ddot{\phi} = \dot{p} \rightarrow \text{roll acceleration} \\ \ddot{\theta} = \dot{q} \rightarrow \text{pitch acceleration} \\ \ddot{\psi} = \dot{r} \rightarrow \text{yaw acceleration} \end{array} \right\}$$



Şekil 2.2 Temsili olarak 6 serbest derecesinin DARPA etrafında gösterimi

Denizaltılar için gemilerden farklı olarak Z eksenindeki yani düşey yöndeki serbestlik derecelerinin de hesaplamalara dahil edilip altı serbestlik derecesinin (6 DOF) tamamında hareket denklemlerinin türetilmesi gereklidir [20]. Literatürde paylaşılmış olan deneysel verilerden istifade edilmesi için kurulan hareket denklemlerinin bünye eksen takımında ifade edilmesi gerekmektedir. Seri rotasyon ile elde edilen hareket denklemleri altı serbestlik dereceleri (6 DOF) için bünye eksen takımında aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$m\left[\dot{u} - vr + \omega q - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})\right] = X \quad (2.4)$$

$$m\left[\dot{v} - \omega p + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})\right] = Y \quad (2.5)$$

$$m\left[\dot{\omega} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})\right] = Z \quad (2.6)$$

$$I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} + m\left[y_G(\dot{\omega} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - \omega p + ur)\right] = K \quad (2.7)$$

$$I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (qp - \dot{r})I_{yz} + m\left[z_G(\dot{u} - vr + \omega q) - x_G(\dot{\omega} - uq + vp)\right] = M \quad (2.8)$$

$$I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{zx} + m\left[x_G(\dot{v} - \omega p + ur) - y_G(\dot{u} - vr + \omega q)\right] = N \quad (2.9)$$

Burada verilen ilk üç denklem ötelenme hareketlerini temsil eder; X, Y ve Z sırasıyla ileri öteleme (surge), yanıl öteleme (sway) ve dikey dalıp-çıkma (heave). K, M ve N ise teknenin sırasıyla yalpa (roll), baş-kıç vurma (pitch) ve savrulma (yaw) hareketi esnasında karşılaştıkları açılal momentleri temsil etmektedir. Denklemlerde geçen (x_G, y_G, z_G) koordinatları tekne ağırlık merkezini vermektedir. Diğer parametreler ise aşağıda verilmiştir.

m : Hareket eden kütle (denizaltı deplasmanı + ek su kütesini),

I_x : Geminin X eksenine göre atalet momentini,

I_y : Geminin Y eksenine göre atalet momentini,

I_z : Geminin savrulma (Z) eksenine göre atalet momentini,

u : İleri öteleme hızını,

$\dot{u}$: İleri öteleme ivmelenmesini,

v : Yanal öteleme hızını,

$\dot{v}$: Yanal öteleme ivmelenmesini,

ω : Dalıp çıkma hızını,

$\dot{\omega}$: Dalıp çıkma ivmelenmesini,

p : yalpa (açısal) hızını,

q : Baş kış vurma (açısal) hızını,

r : Savrulma (açısal) hızını,

2.1.1.1 Lineer Hareket Denklemlerinin Elde Edilmesi

Orijinin iki koordinat sistemi içinde farklı noktalarda olmasından dolayı sabitlenmiş koordinat sistemindeki kuvvetler dönüşüm matrisi kullanılarak gemiye bağlı koordinat sistemine döndürülürse aşağıda verilen denklem takımı elde edilir:

$$m(\dot{u} - vr - x_G r^2) = X \quad (2.10)$$

$$m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) = Y \quad (2.11)$$

$$I_z \dot{r} + mx_G (\dot{v} + ur) = N \quad (2.12)$$

Denizaltıya/gemiye X ve Y yönlerinden gelen X ve Y kuvvetleri ile Z ekseninde oluşan N momenti Taylor serisine açılıp, sadece lineer olan terimler alınarak denklemler tekrardan düzenlendiği takdirde aşağıdaki denklem takımı elde edilmiş olur.

$$-Xu(u - U) + (m - Xu)\dot{u} = 0 \quad (2.13)$$

$$-vYv + \dot{v}(m - Y\dot{v}) - r(Yr - mU) - \dot{r}(Yr - mx_G) = 0 \quad (2.14)$$

$$-vNv - \dot{v}(N\dot{v} - mx_G) - r(Nr - mx_GU) - \dot{r}(Nr - I_Z) = 0 \quad (2.15)$$

Bu denklem takımında verilen alt indisler kuvvet ya da momentin (X, Y, N) bağlı koordinat sistemindeki hız ve ivmelere ($u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}$) göre olan değişimini yani kısmi türevi olduğunu belirtmektedir. Verilen bu denklem deniz taşıtının yalnızca çıplak gövdesi üzerindeki hidrodinamik kuvvetleri belirten lineer bir hareket denklemidir. Yani pervane ve dümen gibi eklentilerin tesiri ile dalga, rüzgar ve akıntı gibi çevre kaynaklı dış faktörler bu denklem sisteminde bulunmamaktadır. Yukarıdaki denklem 2.13 geminin yalnızca ileri öteleme hareketini modeller yani başka bir deyişle manevra probleminden ziyade bir direnç problemidir. Aynı denklem takımında bulunan denklem 2.14 ve 2.15’de ise yatay hız ve açısal hız birbiri içerisine geçmiştir. Gemi manevra performansını elde etmek için bu iki denklemin beraber çözümlenmesi gerekmektedir. Önerilen boyutsuzlaştırma yöntemleri kullanılarak elde edilen verilerin kullanımıyla boyutsuzlaştırma yapılır. X, Y ve Z eksenindeki elde edilen direnç kuvvetleri ve X, Y ve Z ekseninde oluşan momentler (sırasıyla K, M, N) (SNAME 1950)’nin önerdiği gibi aşağıda verilen denklemler kullanılarak boyutsuz değerlere getirilir [36].

$$X', Y', Z' = \frac{X, Y, Z}{\frac{1}{2}\rho V_0^2 L_{PP}^2} \quad (2.16)$$

$$K', M', N' = \frac{K, M, N}{\frac{1}{2} \rho V_0^2 L_{PP}^3} \quad (2.17)$$

Boyutsuz ifadelelerin de kullanımıyla lineer hareket denklemleri boyutsuzlaştırılırsa;

$$-v'Yv' + \dot{v}'(m' - Y\dot{v}') - r'(Yr' - m') - \dot{r}'(Y\dot{r}' - m'x_G') = 0 \quad (2.18)$$

$$-v'Nv' - \dot{v}'(N\dot{v}' - m'x_G') - r'(Nr' - m'x_G') - \dot{r}'(N\dot{r}' - I_Z') = 0 \quad (2.19)$$

Denklem 2.18 ve 2.19 da bulunan manevra türevleri daha önceden sayısal veya deneysel yöntemler yardımıyla belirlenmişse burada bilinmeyen parametreler zamana göre değişen boyutsuz yanal ötelenme hızı (v') ve açısal hızdır (r'). İvme terimleri ise ($\dot{v}', \dot{r}'$) bilinmeyen değişkenlerin türevlerini ifade ettiği için denklem 2.18 ve 2.19 bir diferansiyel denklem sistemi halini alır. Bu diferansiyel denklemi oluşturan lineer hareket denklemleri gemi ve/veya denizaltının yalnızca takıntısız hali için geçerlidir. Oysaki belli bir forma sahip olan gemi ve/veya denizaltının rota kabiliyetini yerine getirebilmesi için dümen olması gereken elzem bir takıntıdır [9]. Dümen kaynaklı kuvvetlerin doğrusal hareket denklemlerine eklenebilmesi için denklem takımında eşitliklerin sağ taraflarına sırasıyla $Y_\delta \delta_R$ ve $N_\delta \delta_R$ terimleri eklenir.

$$-v'Yv' + \dot{v}'(m' - Y\dot{v}') - r'(Yr' - m') - \dot{r}'(Y\dot{r}' - m'x_G') = Y_\delta \delta_R \quad (2.20)$$

$$-v'Nv' - \dot{v}'(N\dot{v}' - m'x_G') - r'(Nr' - m'x_G') - \dot{r}'(N\dot{r}' - I_Z') = N_\delta \delta_R \quad (2.21)$$

Denklem 2.20 ve 2.21 de bulunan $Y_{\delta}\delta_R$ ve $N_{\delta}\delta_R$ terimleri lineerleştirilmiş terimlerdir. Bu nedenle denklem 2.20 ve 2.21’de yazan denklemlerle geminin/denizaltının sadece küçük dümen açılarındaki manevra yeteneğinin incelenebileceği dikkate alınmalıdır. Verilen denklem silsilesi iki vektörün eşitliği şeklinde yazılıp manevra hareketinin 3-DoF denklemleri yeniden düzenlenirse matris sistemi elde edilir ve çözüme gidilir.

2.1.1.2 Lineer olmayan hareket denklemlerinin elde edilmesi

Lineer olmayan denklemleri için denklem 2.10, 2.11 ve 2.12’de X ve Y kuvvetleri ile N momentini Taylor serisine açılarak yalnızca birinci dereceden türevler alınmış ve daha yüksek dereceden türevler ihmal edilerek denklem 2.13, 2.14 ve 2.15 elde edilmiştir. Taylor serisine açılan X , Y ve N ’nin daha yüksek mertebedeki türevleri de denklem 2.10, 2.11 ve 2.12 numaralı denklemlerin sol tarafına dahil edilirse lineer olmayan hareket denklemleri elde edilmiş olur. Bilindiği üzere Taylor serisinin istenilen dereceye kadar açılımı yapılabilir. Böylece lineer olmayan hareket denklemleri için ne kadar fazla duyarlılık talep edilirse Taylor serisi açılımında da o kadar ilerlenmesi gerekmektedir. Denizaltı hareketleri ise çoğunlukla serbestlik dereceleri arasında kuvvetli bağların olduğu lineer olmayan hareketlerdir.

Misal olarak iki değişkene bağlı $f(x,y)$ fonksiyonunun (a,b) noktası etrafındabirinci dereceden Taylor serisine göre açılımı denklem 2.22 de verilmiştir.

$$f(x, y) = f(a,b) + (x-a)f_x(a,b) + (y-b)f_y(a,b) \quad (2.22)$$

Aynı fonksiyonun yine aynı noktada daha yüksek dereceden olan açılımları aşağıda olduğu gibidir.

$$f(x,y) = f(a,b) + (x-a)f_x(a,b) + (y-b)f_y(a,b) + \frac{1}{2!} \{ [x-a]^2 f_{xx}(a,b) + 2(x-a)(y-b)f_{xy}(a,b) + [y-b]^2 f_{yy}(a,b) \} + \frac{1}{6} (...) + R3 \quad (2.23)$$

Racine ve Peterson (2005) yapmış oldukları çalışmada CDF tabanlı olarak katamaran bir denizaltının manevra simülasyonunu yapmışlardır. Ayrıca seri

açılımında sonsuz sayıda terimden ikinci dereceden büyük dereceli olan terimleri ihmal etmişlerdir [37].

Hareket denklemleri kısmını toparlayacak olursak geminin/denizaltının 3 serbestlik dereceli (3DoF) hareketinde (İleri Öteleme, Yanal Öteleme ve Savrulma) Abkowitz (1964) tarafından önerilen denklemlerin yeniden düzenlenmesiyle denklem 2.24 ve denklem 2.25 elde edilmiş olur [38].

$$[M]_{3 \times 3} [\ddot{x}]_{3 \times 1} = [f]_{3 \times 1} \quad (2.24)$$

$$\begin{bmatrix} (m - X_{\ddot{u}}) & 0 & (-mY_G - X_{\ddot{r}}) \\ 0 & (m - Y_{\ddot{v}}) & (mX_G - Y_{\ddot{r}}) \\ (-mY_G - N_{\ddot{u}}) & (mX_G - N_{\ddot{v}}) & (I_{zz} - N_{\ddot{r}}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{v} \\ \ddot{r} \end{bmatrix} = [f]_{3 \times 1} \quad (2.25)$$

Sağ tarafta bulunan kısım (denklem 2.26-2.28) etkiyen kuvvet ve momentleri verir. Burada yer alan f_1 , f_2 ve f_3 terimleri hidrodinamik türevleri yani u ve v hızları gibi bağımsız değişkenlere göre karşılık gelen türevlerin ve momentlerin değişimini göstermektedir. Örneğin $Y_{\dot{v}}$, $\dot{v}$ ivmesine göre Y kuvvetinin değişim oranıdır. $Y_{\dot{v}}$ daha somut olarak düşünersek gövde formu yanal yönde ivmelendiğinde oluşan ve her zaman ivmelenen tarafın aksi yönünde olan reaksiyon kuvvetidir. Hıza bağlı türevler sönüm terimleri olarak adlandırılırken, ivmeye bağlı türevler ek kütle terimleri olarak tanımlanır. Sönümleme terimleri tek bağımlı kinematik parametrelili doğrusal türevler (Y_v , N_v) ve birden fazla kinematik parametrelili doğrusal olmayan türevler (Y_{vvv} , N_{vvv} , X_{vr}) olmak üzere ikiye ayrılır.

Aşağıda verilen denklem takımında bulunan “th” indisinin bulunduğu terimler geminin donatıldığı sevk ünitesine bağlı olarak itme kuvvetlerini ya da momentlerini ifade eder. Çevresel etkiler de environment kelimesinin kısaltılması olarak “env” indeksleri ile hareket denklemlerine dahil edilir. Hızların teknenin kütlesi ile çarpımı merkezkaç terimleri olarak adlandırılır ve 6-DoF'daki genel

hareket denklemlerinden gelir. Ayrıca manevra çalışmalarında kullanılan manevra katsayıları ile manevra türevleri aynı anlama gelmektedir.

$$f_1(u, v, r) = X_0 + X_{th} + X_{env} + X_{vr}vr + \dots$$

$$\frac{1}{2!}(X_{vv}v^2 + X_{rr}r^2) + \frac{1}{4!}(X_{vvvv}) + m(vr + x_G r^2) \quad (2.26)$$

$$f_2(u, v, r) = Y_0 + Y_{th} + Y_{env} + Y_vv + Y_r r + \dots$$

$$\frac{1}{2!}(Y_{vr}v^2r + Y_{vrr}vr^2) + \frac{1}{3!}(Y_{vvv}v^3 + Y_{rrr}r^3) + m(-ur + y_G r^2) \quad (2.27)$$

$$f_4(u, v, r) = N_0 + N_{th} + N_{env} + N_vv + N_r r + \dots$$

$$\frac{1}{2!}(N_{vvr}v^2r + N_{vrr}vr^2) + \frac{1}{3!}(N_{vvv}v^3 + N_{rrr}r^3) + m(-x_G ur - y_G vr) \quad (2.28)$$

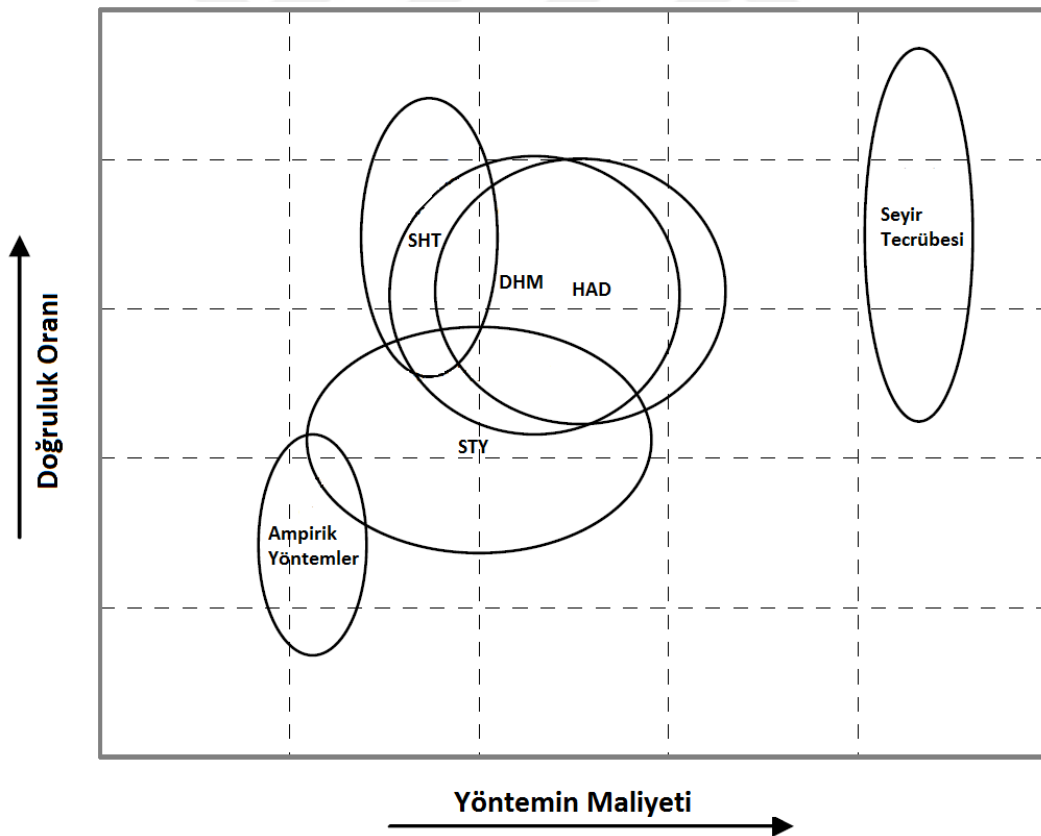
2.2 Denizaltılarda Manevra tahmin yöntemleri

Bir denizaltının doğru bir şekilde yol alıp gidebilmesi için rotadan sapmaması gerekir. Bunun için yardımcı ekipman olan yatay ve düşey dümenler kullanılır. Özellikle uzun mesafe giden denizaltılarda rota tutma kabiliyetinin yüksek hassasiyette olması ve dinamik stabiliteye sahip olması beklenir. Çünkü denizaltılar veya yüzen diğer deniz araçları rotalarından ayrıldıkça daha fazla dirençle karşılaşır. Bu durum yakıt sarfiyatının artması ve denizaltıların suyun altında kalabilme süresinin azalmasına doğal olarak da gizli kalma süresinin azalmasına neden olmaktadır. Bu istenmeyen durumun olmaması ve enerji verimliliğinin artması için dümen alanının yeterince büyük olması, dümen konumunun ve formunun optimum olması, kış formunun narin olması gerekmektedir.

Manevra türevleri diğer ismiyle hidrodinamik katsayılar bir gemi ya da denizaltının manevra kabiliyetini tahmin edebilmek için bilinmesi gereken değişkenlerdir. Bu bilinmeyen değişkenleri tahmin edebilmek için birbirinden farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar ilerleyen başlıklarda sıralanacaktır. Hidrodinamik değerler geminin/denizaltının formuna ve ilerleme hızına bağlı

olarak değişkenlik göstermektedir. Bu yüzden genellikle manevra katsayıları gemilerin ya da denizaltıların servis hızları neyse o hızlarda, sayısal ya da deneysel çalışmalar yapılarak belirlendiği şeklinde bazı çalışmalar belirtilmiştir [9].

SIMMAN 2008 çalıştayında manevra kabiliyetlerinin ölçülmesi için önerilen yolların uygulanması sırasındaki oluşun maliyete göre ulaşılan doğruluk oranları tahmin edilmeye çalışılmıştır. Aşağıdaki şekilde görünen doğruluk miktarları elbette kesinlik bildirmemekle beraber farklı çalışma enstitülerinin belirli bir yöntem ve gemi modeline göre elde ettikleri deneyimlerinden yola çıkılarak oluşturulmuştur [39].



Şekil 2.3 Çeşitli manevra tahmin yollarının manevra performansı üzerindeki doğruluk payları (ITTC-2008)

2.2.1 Ampirik ve Yarı Ampirik Yöntemler

Ampirik ya da yarı ampirik yollar manevra çalışmalarında genelde en erken safha olan ön dizayn aşamasında fikir sahibi olunabilmesi amacıyla kullanılan yöntemlerdir. Bu yöntemler, genellikle gemi tasarımının ön dizayn aşamasında deneysel ve tecrübe verilerine bağlı olarak kullanılırlar. Bu yöntemler, ana boyutları ve tekne formu özellikleri gibi faktörlere bağlı olarak tanımlanırlar. Ancak, yarı-ampirik olanlar yalnızca dönme manevraları yada doğrusal rotasyon kapasitesi gibi yüzeysel bilgiler sağlar ve bu nedenle hassasiyetleri sınırlıdır. Bu tür ifadeler kullanılırken, yöntemin sınırları içinde kalınması son derece önemlidir, aksi takdirde yanlış sonuçlar ortaya çıkabilir [9]. Bu yöntemler tahmine dayalı olup dizaynın başlangıç kısmında hidrodinamik özellikleri tahmin etmek için kullanılır [40]. Bu yöntemlerin avantajları olduğu gibi dezavantajları da vardır. Kullanımlarının hızlı ve maliyetlerin çok düşük olması, farklı formlar için sıklıkla ve rahatça tekrarlanabiliyor olması ampirik yöntemlerin avantajlarından. Dezavantajlarından bahsetmek gerekirse: sonuç değerlerinin kesinliği regresyon sınırlarıyla sınırlıdır. Bu yolda genelde manevra performansı için oldukça önemli olan tekne kabuğunun geometrisi dikkate alınmaz. Diğer bir sorun ise ampirik yöntemler kullanılırken deniz durumunun dalgalı mı yada sığ mı olduğuna dair bir fark söz konusu değildir, tamamı durgun su ve derin su koşulları içindir. Bazı araştırmacılar farklı ampirik yöntemler oluşturup çalışmalarında denemektedirler. Örneğin Yasukawa ve Yoshimura yapmış oldukları çalışmada manevra problemine yalpa etkisini de ekleyip üç değişik gemi formu modelinin (yük gemisi, araba gemisi ve yolcu gemisi) doğrusal rota stabilitelerinin belirlenmesi için farklı bir ampirik formül önermişlerdir [41]. Yine başka bir çalışmada ise Zelazny, küçük dümen açılarında ($\delta < 3^\circ$) gemi arkasındaki dümene etki eden kuvvetleri ve momentleri tahmin edebilmek adına 129 adet gemiye ait dümen alanı, gemi boyu, su çekimi gibi verileri kullanarak farklı bir ampirik yöntem geliştirmiştir. Bu yaklaşımın diğer ampirik formüllerde olduğu gibi ön tasarım aşamasında tanker, kuru yük ve konteyner gibi gemilerde küçük dümen açıları için kullanılabileceğini ifade etmiştir [42].

Manevra çalışmalarında yaygın olarak kullanılan hidrodinamik katsayıların hesaplanmasına yönelik yöntemleri açıklayan literatürün büyük bir kısmı standart

uçak tasarımlarına uygulanabilen yöntemlere dayanmaktadır. Uçakların ve su altı araçlarının temel formları üzerinde önemli farklılıkların olması nedeniyle bazı problemlerle karşılaşılmasıdır. Uçaklarda bulunan büyük kanat yapısının oluşturmuş olduğu lift(kaldırma) kuvvetinin büyüklüğü, denizaltılarda başta ve kıçlarda bulunan kontrol yüzeylerinde oluşan kaldırma kuvvetinden çok daha fazladır. Ancak denizaltıların gövdesinin de lift kuvveti oluşturması ise uçak gövdesindeki oluşan durumun tam tersidir. Diğer bir problem ise hava araçlarının su altı araçlarından farklı olarak silindirik forma sahip olmalarıdır [43]. Hesaplama maliyetlerinin düşük ve yapılan ampirik hesapların sonuçlarının doğruluğunun kabul edilebilir olduğu sürece, dizayn sürecinin ilk aşamalarında mühendislik öngörüsüne sahip olabilmek ve olası formları tefekkür edebilmek için kullanılabilir.

2.2.2 DeneySEL Yöntemler

Serbest hareketli yöntemler için ayrı bir konu başlığı açmayarak bu bölümde ilerleyeceğiz. Submarine Hydrodynamics isimli kitapta serbest hareketli (free running) testlerin kontrollü bir ortamda nispeten daha düşük maliyetle yapılabileceği ifade edilmiştir. Manevra özelliklerini anlamanın yanında farklı kontrol stratejilerini araştırmak, sayısal modellerin doğrulanması ve sistem tanılama tekniklerinin uygulanması için veri sağlamak olduğuna değinilmiştir. Normalde serbest çalışan denizaltı modellerine kontrol komutları göndermek genellikle mümkün olmadığından, en azından yarı otonom olması gerektiği ve birçok ülkenin bu çalışmaları yaptığı belirtilmiştir [16]. ITTC Manevra Komitesine göre manevra yeteneklerinin ölçülmesinde serbest hareketli testler (Free Running Tests) en gerçekçi yöntem olarak değeriendirilmektedir [39].

Düzlemsel hareket mekanizması (DHM) yani PMM (Planar Motion Mechanism) testleriyle manevra türevleri tahmin edilmeye çalışılır. Manevra katsayılarını elde edebilmek için statik drift testi, statik dümen testi, salt yanal öteleme testi, salt savrulma veya savrulma-sürüklenme testi gibi farklı testler yapılarak elde edilir. Bu yöntemle çekilen modele ait drift açısı, savrulma hızı, yan ötelenme ivmesi, savrulma ivmesi ve dümen açısı gibi değişkenlerin testleri yapılabilmektedir. Böylece farklı durumlar için kuvvet ve moment değerlerine ulaşılabilir. Elde

edilen kuvvet ve momentlerden de hareket denklemlerinde kullanılacak hidrodinamik katsayılar elde edilebilmektedir.

2.2.3 Hesaplamalı Yöntemler

Akışkan sözcüğü lügatte akış özellikleri gözlenebilen sıvı ya da gazlar için kullanılmaktadır. Sıvılar için hidrodinamik, gazlar için aerodinamik isim, akışkanlar dinamiğini ifade eder. Teorik olarak, akışkanın dinamiklerini, hareket halindeki akışkan davranışını ve çevre ile etkileşimlerini deneysel ve sayısal olarak inceler.

Yapılan bir tasarımla ilgili olası senaryoları öngörebilmek ve mühendislik gereği optimum çıktıya erişebilmek için birtakım testlerin yapılması gerekmektedir. Fiziksel olarak prototip üretmek ve fiziki olarak testler yapmak zaman ve maliyet açısından değerlendirdiğinde alternatif yollar üretmeye sevk etmektedir. Ampirik yöntemlerin kullanımında ise genelde manevra performansı için oldukça önemli olan tekne formu geometrisinin özellikleri değerlendirilmez. Denizaltıların tasarımında ve optimizasyonunda kullanılan diğer bir yöntem ise HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yöntemleridir.

HAD yöntemi, denizcilik endüstrisinde; dalgalı ve sakin su durumu için su altında veya üstünde bulunan yüzer platformların davranışlarının ve performansının öngörülmesi, direnç ve sevk analizleri yaparak tahrik sisteminin ve gövde tasarımının belirlenmesinde kullanılmaktadır. HAD, araştırmacıların ve mühendislerin sanal bir laboratuvarında sayısal simülasyonlar yapmalarını sağlayan hesaplamalı bir teknolojidir. Denizaltıların ve gemilerin hidrodinamik davranışlarını ve manevra yeteneklerini tahmin etmek için kullanılırlar. Tasarlanan denizaltının kontrol edilebilme kabiliyetlerini artırmak, manevra performansını değerlendirmek ve operasyonel gereksinimlere uygunluğunu belirlemek amacıyla kullanılırlar. HAD programları akışkan akışını tanımlayan denklemleri çözmek için sayısal yöntemler ve algoritmalar kullanır.

HAD yöntemleri, denizaltı hareket halindeyken bile su altındaki davranışını simüle etmek ve denizaltının yüzeyinde ve etrafında oluşan akışkan akışını ve buna bağlı olarak oluşan kuvvetleri ve momentleri hesaplamak için matematiksel denklemleri çözer. Bu sayede denizaltının hidrodinamik performansı, direnci,

dönüş kabiliyeti ve dalga etkileri tahmin edilebilir. HAD yöntemleri ile, denizaltının farklı manevraları simüle edilerek, yönelme, yanal hareket, derinlik kontrolü gibi manevra kabiliyeti hakkında fikir sahibi olunabilir. Denizaltılarda HAD yöntemlerinin kullanılması, gemi tasarım sürecinde önemli bir rol oynar. Bu yöntemler, denizaltıların hidrodinamik performansını, manevra kabiliyetini ve operasyonel gereksinimlerini değerlendirmek için mühendislerin ve tasarımcıların elinde güçlü bir araçtır.

Denizaltıların dalga etkilerine maruz kalması, manevra kabiliyetini etkileyebilir bu yüzden dalgalı durumlar içinde, denizaltının dalga direncini, sürüklenmeyi ve dalgalara karşı stabilitesini değerlendirebilmek amacıyla da HAD kullanılabilir. HAD yöntemleri, denizaltının manevra performansını optimize etmek için kullanılır. Simülasyonlar ve hesaplamalar, denizaltının tahrik sisteminin tasarımını, kontrol yüzeylerinin konumunu ve büyüklüğünü, pil/batarya gücünü ve diğer parametreleri optimize etmek için kullanılabilir. Böylece denizaltı için, manevra sırasında ortaya çıkabilecek performans kısıtlamaları ve belirli bir manevrayı gerçekleştirme yeteneğini hakkında önceden fikir sahibi olunarak, belirli bir manevrayı en verimli ve etkili şekilde gerçekleştirebilmek için gerekli önlemler alınır.

KULLANILAN GEOMETRİ MODELLERİ

Tez çalışması kapsamında bu bölümde kullanılan DARPA Suboff denizaltı modeli geometrisi, jenerik denizaltılar için model pervanesi olan INSEAN E1619 pervane geometrisini ve pervaneli model denizaltı geometrisi tanıtılmaktadır. Denizaltı geometrisi, E1619 pervane modeli ve E1619 pervanesinin takıldığı denizaltı modelinin özellikleri ve boyutları aşağıda ayrı ayrı başlıklar altında verilmektedir.

3.1 DARPA Suboff Modelinin Geometrik Özellikleri

Jenerik bir nükleer saldırı sınıfı denizaltı (SSN) formunun geliştirilmesi amacıyla 1980'li yıllardan sonra başlatılan DARPA Suboff projesinin takıntısız ve farklı takıntılı kombinasyonlarının birçok hesaplamalı ve deneysel analizlerine ait olan veriler literatürde sunulmuştur. Mühendisler ve araştırmacılar tarafından rahatlıkla ulaşılabilir. Denizaltılarla ilgili yapılan çalışmaların sonuçlarının kıyaslanabileceği bir forum oluşturmayı hedeflemişler ve başarmışlardır.

DARPA Suboff projesi kapsamında aynı geometriye sahip iki model geliştirilmiş ve testleri tamamlanmıştır. Bu modellerden birincisi çekme tankında test edilen DTRC 5470 olarak bilinen model geometrisi, diğeri ise rüzgar tüneline test edilmiş olan DTRC 5471 olarak tanınan denizaltı modeli geometrisidir. Modeller birbirlerinden sensör yerleşiminden ve test edildikleri akışkandan kaynaklı olarak farklıdır.

(Groves et al., 1989) tarafından verilen matematiksel ifadelerle dayanarak ekstenel simetrik bir gövde, yelken ve diğerk eklenen takıntı geometrileri oluşturulmuş ve oluşan farklı konfigürasyonların analizleri tamamlanmıştır [12].

Tablo 3.1 DARPA Suboff AFF-3 ve AFF-8 modellerinin ana boyutları [12]

	Sembol	AFF-3 Değerleri	AFF-8 Değerleri
Length overall	L_{OA}	4,356	4,356
Length between perpendiculars	L_{BP}	4,261	4,261
Maximum hull radius	R_{MAX}	0,254	0,254
Centre of buoyancy (aft of nose)	LCB	0,4625 L_{OA}	0,4621 L_{OA}
Volume of displacement	∇	0,701	0,718
Wetted surface area	S_{WA}	6,188	6,338

Temsili diğer ismiyle jenerik denizaltı modeli geometrisi DARPA Suboff modelinin baş tarafı 1.016m, orta tarafı 2.229m ve kış taraf 1.111m olacak şekilde toplam boyu 4.356m'dir. En fazla 0.508m çap ölçüsüne sahip olan silindir geometrisi şeklindeki bölümlerden meydana gelmiştir. AFF-8 modelinde baş tarafa yakın, baş ve orta kısım arasında bir yelken mevcuttur. X şekilde olmayan artı işaretine benzeyen dümen yerleşimi mevcuttur [12]. Liu ve Huang tarafından DARPA Suboff denizaltı modelinin AFF-8 konfigürasyonunun direnç deneyleri $Re=12 \times 10^6$ için yapılmış ve açık literatüre sunulmuştur.



Şekil 3.1 DARPA Suboff AFF-8 Geometrisi

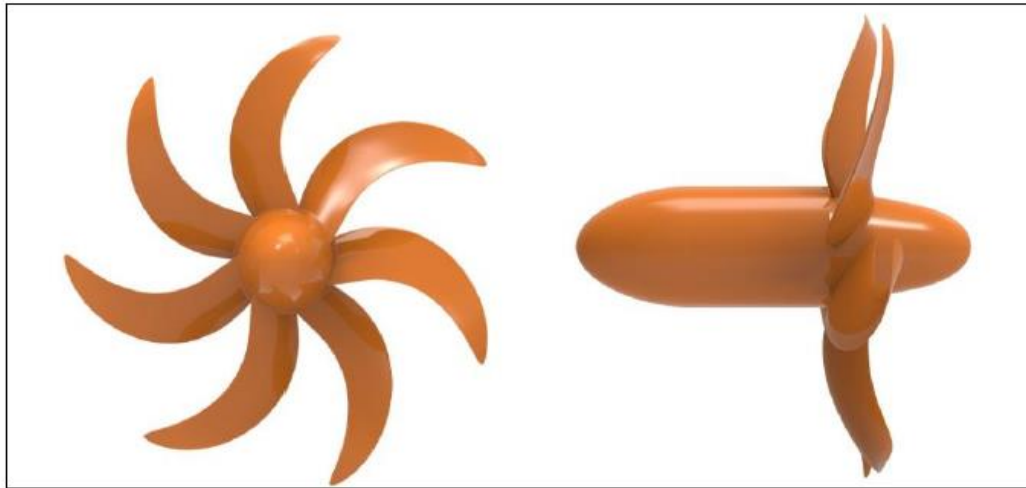
AFF-3 konfigürasyonunun AFF8 konfigürasyonundan ayrılmasının nedeni yelken kısmının bulunmamasıdır. Diğer özellikler bütünüyle aynıdır.



Şekil 3.2 DARPA Suboff AFF-3 Geometrisi

3.2 INSEAN E1619 Pervane Geometrisinin özellikleri

E1619 pervanesi, çalıklığı fazla olan, yedi adet kanadı bulunan bir temsili (jenerik) denizaltı pervanesidir. Pervanenin açık su karakteristiklerini belirleyebilmek için gerekli deneyler INSEAN deney havuzunda gerçekleştirilmiştir. Sirkülasyon tankında LDV (Laser Doppler Velocimetry) yöntemi kullanılarak iz ölçümleri yapılmıştır. Literatürde gerçekleştirilen deneyler sırasında kullanılan pervanenin, tek parça olarak alüminyum malzemesinden üretildiği ve dış yüzeyi siyah anot kaplama ile kaplandığı anlaşılmaktadır. Böylece lazer yansımalarının azaltılması amaçlanmıştır [18]. Pervanenin ana boyutları Çizelge 3.2'de belirtilmiştir



Şekil 3.3 INSEAN E1619 Model Pervanesi [27]

Tablo 3.2 E1619 Pervanesi Ana Boyutları

Pervane Kanat Sayısı	7
Çap (mm)	485
Göbek Çap Oranı	0.226
0.7R'de Hatve	1,15
0.75R'de Kord Uzunluğu (mm)	68.6

3.3 INSEAN E1619 ile Sevk Edilen DARPA Suboff AFF3 ve AFF-8 Denizaltı Modelleri

INSEAN (Italian Ship Model Basin) tarafınca dizayn edilen E1619 model pervanesi, analizleri ilk etapta 0 dereceden 20 dereceye kadar ikişer derece aralıklarla yapılarak tamamlanan DARPA Suboff AFF3 ve AFF8 Denizaltı modellerine eklenip, öncelikle 0 derecede itme ve direncin kesiştiği yer olan sevk noktasının (self propulsion point) bulunup o RPM değerinde pervaneli olarak aynı analizlerin 0 dereceden 20 dereceye kadar her iki konfigürasyon için de ikişer derece aralıklarla statik sürüklenme analizlerinin tekrarı yapılmıştır. Aşağıda verilen görsellerde INSEAN E1619 pervanesi ile donatılmış DARPA Suboff AFF8 ve DARPA Suboff AFF3 konfigürasyonlarının görselleri görülmektedir.



Şekil 3.4 E1619 Model Pervanesinin eklendiği AFF-8 geometrisi

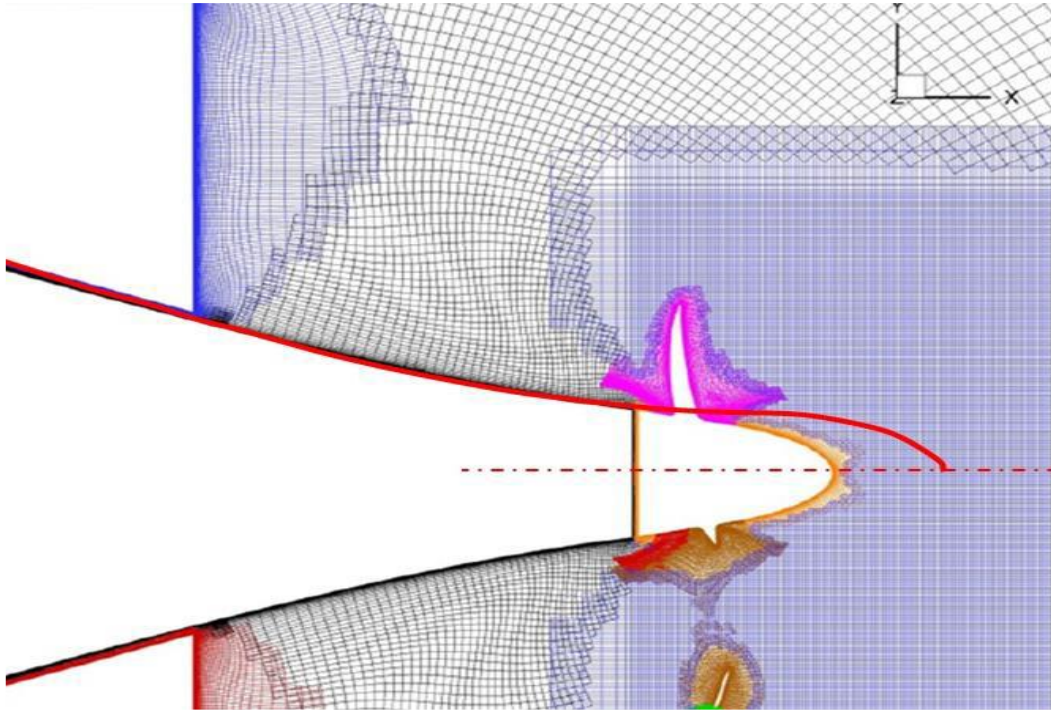


Şekil 3.5 E1619 Model Pervanesinin eklendiği AFF-3 geometrisi

Bu kısımda INSEAN tarafından tasarlanan akustik özellikleri de dikkate alındığı için yedi kanatlı olan, çalıklı pervane uyarlanarak yani pervane çapı 0.262 m yapılarak kullanılmaktadır. Literatüre bakıldığında E1619 pervanesi ile sevk

edilen modellerin boylarında bir miktar kısaltmalar meydana geldiği fark edilmektedir [44].

Aşağıda verilen görselde kırmızı renkli çizgiyle gösterilen kısım denizaltının asıl boyunu (kısaltmadan önceki) göstermektedir. Bu durumun nedeni ise pervane göbek çapının geometri ile tam olarak örtüşmesinin istenmesindendir. Bu tez kapsamında da HAD analizleri için E1619 pervanesi ile sevk analizleri yapılan DARPA Suboff denizaltısı modelinin boyu literatürdeki çalışmalara uyacak şekilde yapılmıştır.



Şekil 3.6 DARPA Suboff pervane yerleşiminin görünüm [44]

KULLANILAN SAYISAL YÖNTEMLER

4.1 Kullanılan Sayısal Yöntemler

Bu başlıkta INSEANE1619 pervanesi kullanılarak itme hareketi sağlanan denizaltıya ait akış analizlerinde kullanılan çözüm yöntemleri açıklanmıştır. Akışkanlar mekaniğinde, akışkan hareketini tahmin edebilmek ve hesaplayabilmek için bir dizi yöntem geliştirilmiştir. 20. Yüzyılın ikinci yarısından itibaren sürekli gelişmekte olan bilgisayar teknolojisiyle bilgisayar kullanımı oldukça yaygınlaştı. Böylece analitik olarak imkânsız gibi olan akışkanlar dinamiği problemleri sayısal olarak çözülebilir hale geldi. Akışkanlar mekaniğinde var olan denklemlerin sanal ortamda çözülebilmesi ile Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) olarak adlandırılan yeni bir çalışma alanı ortaya çıktı.

Cisimlerin etrafındaki akışı tahmin edebilmek ve optimum tasarım yapabilmek için geçmiş yıllarda yapılan sayısal tahmin yöntemlerinin başında potansiyel akış kabulünün yapıldığı bilinmektedir. Bu yaklaşımda akımın daimî, sıkıştırılamaz, döngü ve viskozitesi olmadan olduğu varsayılmıştır. Başka bir teori ise kanat eleman teorisidir. Kanat eleman teorisi bağlamında, geometri iki boyutlu kesitler şeklinde temsil edilmekte ve bu kesitler entegre edilmesiyle üç boyutlu geometriye yönelik sonuçlara varılmaktadır. Bu yöntemin artısı viskoz özelliklerin dahil edilebiliyor olmasıdır. Dezavantajı ise bu yöntemde geometriler üç boyutlu bir şekilde temsil edilememişlerdir. Daha sonraları ise panel yöntemi geliştirilmiştir. Panel yönteminde yüzey bütün bir şekilde potansiyel akış unsurlarıyla paneller şeklinde temsil edilir. Üç boyutlu olan bu yöntemde türetilen denklem sistemleri elemanlara ait olan kuvveti bulmak için çözülür. Tüm bu yöntemler, potansiyel tabanlı yani viskos olmayan ve çevrintisiz akışkan kabulü yaparak çözüme ulaşmaktadır. Pervane gibi dönel cisimlerin analizlerinde önemli olan akışın döngüsel özelliklerinin yakalanmasıdır. Dönel cisimlerin analizinde değerli hale gelen çözüm ağsız vorteks yöntemler çevrintili durumu hesaplayabilmek için panel yöntem üzerinden çözüm yapan panel yöntemlerle birleştirilerek verimli sonuçlara ulaşılabilir. Geometrilerin yalnızca

yüzeylerinin temsil edildiği bu yolların ortak adına sınır elemanları yöntemi denilmektedir. Bu yöntemlerle beraber hesap yükleri büyük ölçüde azaltılmıştır.

Bu yöntemlerin ortak özelliği hesap yükü olarak büyük avantajlar vererek karmaşık akış alanlarının özellikleri sınırlı düzeyde tahmin edilebilmektedir. Geçmişten günümüze sürekli olarak gelişen bilgisayar teknolojisiyle beraber sayısal yöntemler akış alanlarını hesaplamada birçok yöntem sunmaktadır. Günümüzde akışkan hareketlerini hesaplamanın üç farklı yöntemi vardır: Sonlu elemanlar, sonlu farklar ve sonlu hacimler. En çok tercih edilen yöntem genelde sonlu hacimler yöntemidir. Bu yüksek lisans tezi kapsamında akışkan hareketlerini hesaplayabilmek için sonlu hacimler yöntemi kullanılmıştır.

4.2 Sonlu Hacimler Yöntemi

Eski zamanlarda, akışkanlarla ilgili yapılan çalışmalarda, akışkanların sıkıştırılamaz, çevrintisiz ve viskoz olmayan olduğu kabul edilerek potansiyel akış yöntemiyle çözümler aranmıştır. Daha sonraki zamanlarda, potansiyel akış yöntemine dayalı kanat elemanı yöntemi geliştirilerek iki boyutlu geometrilerin hesaplanması mümkün hale gelmiştir. Zamanla, üç boyutlu hesaplamalara imkân veren panel yöntemi ortaya çıkmıştır. Bu yöntemde, geometri kaynaklar, kuyular ve dipoller gibi üç boyutlu şekilde tanımlanarak potansiyel tabanlı hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Tüm bu yöntemler, potansiyel tabanlı olduğu için viskoz olmayan ve çevrintisiz bir akışkan varsayımıyla sonuçlara ulaşılmaktadır.

Akışkanın dönüşlü (çevrintili) durumunu hesaplamak için, panel yöntemi üzerine kurulu vortex yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemle beraber, çevrintili akışkanlar için panel üzerinden hesaplamalar yapılabilmesi mümkün kılınmıştır.

Günümüzde, ileri düzey bilgisayar teknolojisi ve matematik bilgisi sayesinde akışkanların hareketleri son derece hassas bir şekilde hesaplanabilmektedir. Akışkan mekaniği alanında sonlu elemanlar, sonlu farklar ve sonlu hacimler gibi yöntemler geniş ölçüde kullanılmaktadır. Bu yöntemler, akışkanların hareketlerini hesaplamak için tercih edilen etkili araçlardır. Özellikle sonlu hacimler yöntemi,

akışkanların davranışlarını analiz etmek için öncelikli bir seçenektir. Bu çalışmada da sonlu hacimler yöntemi başarıyla kullanılmıştır.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği denklemleri genel anlamda fiziksel kanunların matematiksel olarak tasavvur edilmesine ve denklemlerde kullanılan değerlerin oluşturduğu sonuçlarıyla beraber fiziki olanak tefekkür edebilmeye olanak tanır. Genel olarak HAD denklemleri temel denklemleri Kütlenin korunumu, Newton'un ikinci kanunu yani momentumdaki değişimin akışkana etkiyen toplam kuvvete eşitliği ve termodinamiğin birinci kanunu yani enerjideki değişimin akışkana verilen toplam ısı ve işe eşitliği şeklinde sıralanabilir.

4.2.1 Kütlenin Korunumu

Kütlenin korunumu denklemi, birim kontrol hacmindeki akışkan kütlesinin korunumu yani sürekliliğini ifade eder. Sonsuz bir kontrol hacmi için kütlenin korunmasına süreklilik denklemi denir, çünkü hız ve yoğunluk, sürekli fonksiyonlardır.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V}) = 0 \quad (4.1)$$

Bu denklemde ρ yoğunluğu, t zamanı V hız vektörünü ifade etmektedir. Bu denklem zamana bağlı (kararsız akışkan) ya da zamandan bağımsız (kararlı akışkan) şekilde çözülebilmektedir. Bu çalışmada yapılan tüm analizler zamandan bağımsız olarak yani kararlı akış kabul edilerek yapılmıştır.

4.2.2 Momentumun Korunumu Kabulü

Newton'un birinci hareket yasasına göre, bir cisim üzerindeki net kuvvet sıfır olduğunda cisim hareket durumunu korur. Eğer cisim hareket etmiyorsa durmaya devam eder, hareket ediyorsa ise sabit hızlı hareketine devam eder.

Newton'un ikinci hareket yasasına göre ise, cisme etki eden net kuvvet, cismin kütlesinin ve ivmesinin çarpımına eşittir. Matematiksel olarak ifade edilirse:

$F_{net} = m \cdot a$ denklemi yazılır. Buradan hareketle momentumun korunumu, yani hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılır: $F_{net} = dp/dt$ denklemi yazılır. Burada F_{net} , cisime etki eden net kuvveti; dp/dt , momentumun zamanla değişim hızını ifade eder.

Buradan hareketle momentumun korunumu yani hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılır:

$$\nabla(\vec{\mu}\nabla\vec{V}) - \nabla P + \rho g_{xyz} = \frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V}\vec{V}) \quad (4.2)$$

Burada ∇P basınç terimini, ρg_{xyz} kütle terimini, $\nabla(\vec{\mu}\nabla\vec{V})$ viskoz terimini ve $\nabla(\rho \vec{V}\vec{V})$ hareket terimini ifade etmektedir. Bu denklem akışkanlar mekaniğinde oldukça önemli bir yere sahip olan Navier-Stokes denklemi olarak bilinir.

Momentumun korunumu denkleminin tüm bileşenleri ile aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\begin{aligned} p \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= S_{M_x} - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zx})}{\partial z} \\ p \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= S_{M_y} - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zy})}{\partial z} \\ p \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= S_{M_z} - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial(\tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zz})}{\partial z} \end{aligned} \quad (4.3)$$

4.3 RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) Denklemleri

Momentumun korunumundan elde edilen Navier-Stokes denkleminin çözülebilmesi için çeşitli yöntemler uygulanmıştır. Bu yöntemlerden biri olan RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) yaklaşımında, hız terimi zaman ortalamalı çözümlere sayısal bir yöntem uygulanır. Bu sayede, zaman ve uzay boyutlarında ortalamalar alınarak ortalamalı denklemler elde edilir. Navier-Stokes denklemi, zaman ortalamalı yaklaşımla aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$-\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \overline{\rho u_i u_j} \right)}{\partial x_j} = \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (4.4)$$

Bu denklemde bulunan $\overline{\rho u_i u_j}$ terimi Reynold gerilmesini temsil eder. Bu denklemi çözebilmek için önce bu gerilmenin çözülmesi gerekmektedir. Bu gerilmeyi çözebilmek adına farklı öneriler mevcuttur. Bunlar gerilme tensörüne ait olan altın adet terim için çözüm yapan Reynolds stress modeli ve Reynolds gerilmelerini ortalama hız gradyanları ile bağ kurarak çözen Boussinesq modelidir. RSM modelinin dezavantajı hesaplarda büyük bir ağırlığa sebep olmaktadır. Boussinesq önerisi Spalart-Allmaras, k-ε ve k-ω gibi farklı türbülans modelleriyle beraber kullanılmaktadır. Denklem sistemini kapatabilmek adına türbülans modellerinden birisi seçilmek zorundadır [27]. RANS yaklaşımı, genel taşınım denklemlerinin ortalamalarının alınmasına ve toplam akış özelliklerinin (hız ve basınç), ortalama ve değişken değerlerin toplamı olarak gösterilmesine dayanır. RANS yaklaşımı, zaman ortalama denklemlerin çözülmesiyle akışın istatistiksel davranışını tanımlamak için kullanılır ve genellikle türbülanslı akışlarda tercih edilir. Bu yaklaşım, türbülansın etkisini ortalama olarak ele alırken, büyük ölçekli akış yapılarını doğru bir şekilde modellemek için daha küçük ölçekli türbülans yapısını parametrize eden ek modeller gerektirir. Günümüzde Gemi hidrodinamiği ile ilgili çalışmalarda viskoz türbülanslı akışların pratik hesaplamaları için yoğun olarak tercih edilen türbülans modelleri k - ε ve k - ω dur. Bu yüksek lisans tezi kapsamında türbülanslı akışlarda uygun olmasından dolayı, k-ω'den geliştirilmiş olan k-ω SST modeli kullanılmıştır.

RANS yöntemleri, günümüzde deniz CFD'sinde viskoz türbülanslı akışların pratik hesaplamaları için kullanılan yöntemlerdir. RANS yaklaşımı, genel taşınım denklemlerinin ortalamalarının alınmasına ve toplam akış özelliklerinin (hız ve basınç), ortalama ve değişken değerlerin toplamı olarak gösterilmesine dayanır

4.4 Kullanılan Çözücü Yöntemi

Bu yüksek lisans bitime tezinde çözücü olarak ANSYS FLUENT kullanılmıştır. ANSYS FLUENT isimli ticari yazılımında momentumun korunumundan elde

edilen Navier-Stokes denklemini çözebilmek adına basınç ve yoğunluk tabanlı olan iki tane çözüm yöntemi mevcuttur.

Basınca dayalı çözüm metodunda, birincil değişkenler momentum ve basınç düzeltilmesidir. Bu değişkenler, süreklilik denkleminin yeniden oluşturulmasıyla elde edilmektedir. Yoğunluğa dayalı çözüm yönteminde süreklilik, momentum ve enerjiyi temsil eden denklemler vektör formunda çözümlenirler. Durum denklemleri kullanılarak basınç değerlerine ulaşılır.

Basınç tabanlı çözücü yöntemde, yoğunluk tabanlı çözücü yönteminden farklı olarak basınç birinci değişken olarak alınır. Basınç tabanlı çözücü metodunun, düşük hızlardan yüksek hızlara ve sıkıştırılabilir akışkanlardan sıkıştırılamaz akışkanlara kadar geniş yelpazesi olan bir uygulama alanı vardır. Yoğunluğa dayalı çözüm yöntemi yüksek hıza sahip olan sıkıştırılabilen akışlarda kullanılabilmektedir. Yapmış olduğumuz analizlerde de basınca dayalı çözüm metodu kullanılmıştır.

4.5 Kullanılan Çözüm Ayırıklaştırması Yöntemi

ANSYS FLUENT yazılımında, genel skaler taşınım denklemlerinin nümerik olarak çözülmesi için kontrol hacmi tabanlı bir metot mevcuttur. Bu metotta, her kontrol hacmi içinde taşınım denklemleri eklenir. Bu sayede, akışın hızı, basınç, sıcaklık gibi değişkenlerin dağılımı hesaplanır ve akış alanının davranışı analiz edilir. Bu yaklaşımda, akış alanı bölgesi kontrol hacimlerine bölünür ve her bir kontrol hacmi üzerindeki denklemler hesaplanır. Kontrol hacimleri, bir noktanın çevresinde tanımlanan hacimlerdir ve hesaplama noktaları arasında yayılırlar. Taşınım denklemleri, kontrol hacimlerinin içindeki akış özelliklerini tanımlamak için kullanılır.

Momentumun korunumundan gelen akışkanlar mekaniği yönetici denklemleri her bir kontrol hacminde çözülebilmesi için bu denklemlerin basit matematiksel forma getirilmesi işlemine ayırıklaştırma denir. Yapılan ayırıklaştırma ile beraber her bir çözüm değerinin bir sonraki kontrol hacmine aktarılabilmesi sağlanır. Kullanmış olduğumuz ticari yazılım kodu bu işlemi ileri yönlü (upwind) olarak yapmaktadır. Denklemi ise hızlı (quick), birinci derece (first order) ve ikinci derece (second order) olarak çözebilmektedir. Bu çalışmada ileri yönlü (upwind)

birinci derece (first order) ve ikinci derece (second order) çözümler yapılarak analizler tamamlanmıştır.

4.6 Çözüm Ağı Oluşturma Yöntemi

Türbülanslı sınır tabakalarını modellemek için çözüm ağı yoğunluğu ve yüzeylere yakın olan bölgelerdeki çözüm ağı uzaklığının seçilen türbülans modeline uygun olarak seçilmesi son derece önemlidir. Akışkanlar mekaniğindeki sorunları çözmek için, çözüm bölgesi bir kontrol hacmine alınarak küçük hücrelere bölünür. Bu bölgelendirme işlemi sırasında, akışkanın lineerliğinin bozulduğu veya türbülansın meydana geldiği yerlerde akışı daha doğru hesaplamak için uygun hücre büyüklükleri oluşturmak gerekir. Bu bölgeler, akışın hızına bağlı olarak cisim yüzey bölgeleridir. Sınır tabakasının, akışın hızına bağlı olarak uygun hücre büyüklükleriyle örülmesi gerekmektedir. Sınır yüzeyinden başlayacak mesafe bir başka deyimle sınır tabakası aşağıdaki gibi bulunur:

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau}, y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu} \quad (4.4)$$

Verilen denklemde yer alan u_τ sürtünme hızını, y sınırdan olan mesafeyi, ν viskoziteyi ve u akışkan hızını ifade etmektedir. Akışkanın boyutsuz hızını u^+ , sınır tabakadaki boyutsuz mesafesi ise y^+ ile ifade edilmektedir. Sürtünme hızı olan u_τ denklemi:

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (4.5)$$

Sürtünme hızını temsil eden bu denklemde yer alan ρ yoğunluğu, τ_w teğetsel gerilmeyi ifade etmektedir ve denklemi:

$$\tau_w = \frac{1}{2} C_f \rho U_\infty^2 \quad (4.6)$$

Burada C_f yüzey sürtünme katsayısını temsil etmektedir. C_f formülü ise:

$$C_f = 0,0576 Re_d^{-\frac{1}{2}} \quad (4.7)$$

Burada bulunan Re Reynold sayısının kısaltılmış halidir ve Reynold sayısını temsil eder. Yukarıda verilen formülasyonlar kullanıldıktan sonra u değerini bulabilmek için y^+ değerinin akışkan özelliklerine göre uygun olarak seçilip u^+ değerinin hesaplanması gerekmektedir.

Sınır tabaka kendi içinde iç ve dış tabaka olarak ikiye ayrılır. Türbülanslı sınır tabakanın iç bölgesi ise üç adet alt bölgeye ayrılmaktadır. Bunlar viskoz katman, buffer katman ve log-law katman olarak sıralanmaktadır. Girdapların büyüklükleri, duvara olan mesafenin büyüklüğüne göre sınırlandırılır. Akışkanın özelliğine göre uygun olan y^+ değeri seçilir ve bulunduğu aralığa göre sınır tabakanın kalınlığı hesaplanabilir. Viskoz alt tabaka $0 \leq y^+ \leq 5$ konumunda tespit edildiği zaman hız profili aşağıdaki gibidir.

$$u^+ = y^+ \quad (4.8)$$

Viskoz hız profilinin üçüncü tabakaya değiştiği tampon bölgeye ait olan halihazırda bir çözümleme mevcut değildir. $y^+ = 30$ değerinden itibaren iç tabakanın sonuna kadar log-law kısmı (üçüncü tabaka) mevcuttur. Log-law katmanda $30 \leq y^+ \leq 300$ aralığı için u^+ bu bölge için aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B \quad (4.9)$$

Burada κ Karman sabiti olup $0,38 \leq \kappa \leq 0,43$ değerlerinin arasında bulunur ve mühendislik çözümlerinde 0,41 alınması tavsiye edilmektedir. B değeri içinse bazı kaynaklarda genellikle 5.5 değeri, bazı kaynaklarda ise genellikle 5.2 değerinin kullanımı tavsiye edilmiştir.

Üçüncü tabakadan sonra akışkan özelliklerine göre dış tabaka gelmektedir. Türbülanslı sınır tabakalar modellenirken Reynolds değeri baz alınmaktadır. Reynolds değeri az iken türbülanslı sınır tabakanın bütünüyle modellenmesinin mantıklı olmasından dolayı için $y^+ = 1$ olarak alınması önerilmektedir. Reynolds sayısının değeri fazla olduğu zaman üçüncü katman alanında çözümleme yapabilmek mantıklı olduğu için $30 \leq y^+$ değeri makul kabul edilmiştir. Tez kapsamında y^+ değerinin bütün analizlerde 50'den fazla olmasına özen gösterilmiş ve sık sık 50'den fazla olup olmadığı düzenli olarak kontrol edilmiştir.

DARPA DENİZALTI MODELLERİNİN HAD İLE İNCELENMESİ

Bu bölümde DARPA Suboff geometrisinin AFF3 ve AFF8 konfigürasyonlarının pervanesiz olarak farklı açılarda ANSYS FLUENT ticari yazılımında statik sürüklenme durumunda meydana gelen kuvvet ve moment değerlerini anlayabilmek için HAD analizleri yapılmıştır. DARPA Suboff AFF3 konfigürasyonu sadece gövde ve dört adet kık dümenden türetilmiş temsili denizaltı modelidir. Bu temsili modele yani sadece gövde ve kık dümenlere yelken (sail) kısmının da eklenmesiyle beraber meydana gelen yeni model DARPA Suboff AFF8 konfigürasyonu olarak isimlendirilmiştir. Açık literatürde sualtı ile ilgili yapılan çalışmalarda DARPA Suboff modellerinin kullanılması tavsiye edilmektedir. Bunun sebebi çeşitli üniversite ve araştırmacıların bu jenerik modelle ilgili olan bir çok deneysel ve sayısal çalışma yapmış olmasıdır. 2014 yılında düzenlenen 27.ITTC konferansında Manevra Komitesi, araştırmacılara bare hull dediğimiz çıplak gövde (AFF-1) ve tamamen eklenmiş olan tam takınlı konfigürasyonun (AFF-8) kullanılmasını önermektedir [15].

5.1 Geometrilerin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği İle Analizlerinin Yapılması

Yapılan tez çalışmasında Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizlerinin tamamı ticari bir yazılım olan ANSYS FLUENT programının 22.1 versiyonu ile sonlu hacimler yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Mesh atmak için ise Pointwise ismi ile bilinen mesh üretme programı kullanılmıştır. Pointwise programı içine atılan geometrinin yüzeyinde ve o geometrinin etrafındaki sınır tabakaları modelleyebilmek için T-REX elemanlar kullanır. Pointwise programında üretilen iki çeşit mesh türü vardır: Bunlar yapılandırılmış ya da yapısal ve yapılandırılmamış ağ yapılarıdır. T-REX elemanlar kullanılarak yapılandırılmamış çözüm ağlarının anisotropik tetrahedral yapıda kullanılarak yapılandırılmış ağ kalitesinde olması sağlanmaktadır. Yapılan çalışmada boyutsuz uzaklık değeri $y^+ > 50$ olacak şekilde alınmıştır. Sınır tabaka değeri bu şekilde

hesaplanmış olup model yüzeyinden başlayarak çözüm hacminin sınır yüzeyine kadar devam etmektedir. Tetrahedral şekilde yüzeyden başlayarak ilerleyen hücreler belirli bir büyüme oranıyla çözüm hacmine kadar devam etmektedir. Daha sonra pointwise programında gerekli sınır şartları (denizaltının wall olarak tanımlanması gibi) oluşturulduktan sonra geometrinin ANSYS FLUENT formatında olması için export edilmektedir. Literatürü incelediğimiz takdirde genelde HAD analizi çalışmalarında türbülanslı akışlar için uygun olduğu düşünülen $k-\omega$ ve $k-\varepsilon$ modellerinin kullanıldığı görülmektedir. Sayısal olarak çözümler sonlu hacimler yöntemini kullanan ANSYS Fluent 22.1 yazılımı ile yapılmıştır. Analizler zamandan bağımsız olarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal hesaplamalarda E1619 model pervanesi bir Chimera blok içinde modellenerek MRF (Moving Referans Frame) yöntemi kullanılarak pervaneye gereken dönme hareketi verilebilmiştir. Türbülans modeli olaraksa pervane analizlerinde kullanımı yaygın olan SST (Shear Stress Transport) $k-\omega$ türbülans modeli kullanılmıştır. SST $k-\omega$ olarak bilinen türbülans modeli Menter tarafından geliştirilip sunulmuştur [45]. Geliştirilen bu yeni model standart $k-\omega$ türbülans modeli ile benzerlikler göstermektedir. Hem $k-\omega$ dan hem de $k-\varepsilon$ türbülans modellerinin güçlü yönlerinin bir araya getirilerek sunulan SST $k-\omega$ türbülans model sınır tabakada $k-\omega$ formülasyonlarını, serbest akışta ise $k-\varepsilon$ türbülans modelini kullanmakta ve duvar sınır şartları boyunca sönümleme fonksiyonları kullanılmadan uygulanabilmektedir.

HAD analizlerinde çözüm şeması olarak zamana bağlı olmayan (steady state) akışlar için makul olan SIMPLE (Semi Implicit Methods for Pressure Linked Equations) şeması kullanılmıştır. Ayırıklaştırma yöntemi olarak Green-Gauss Nod Based ayırıklaştırması tercih edilmiştir. Ayrıca yapılan analizlerin tamamında 2500 iterasyon 6,5 knot hız için çözdürülmüştür. İlk 1000 iterasyonda momentum denklemleri birinci mertebe olarak, diğer 1500 iterasyon içinse ikinci mertebe ve QUICK olarak çözdürülmüştür. FLUENT’de türbülans yoğunluğu olarak giriş ve çıkış kısmına türbülans yoğunluğu 2 ve viskozite oranı ise 5 olarak girilmiştir. Analizler sırasında girilen koşullar ve değerler aşağıdaki tabloda verilmektedir.

Tablo 5.1 Analizlerde kullanılan koşullar ve değerler tablosu

Toplam 2500 iterasyon	İlk 1000 iterasyon koşulu			
Green-Gauss Nod Based	AFF-3	AFF-8	Pervaneli AFF-3	Pervaneli AFF-8
Basınç ayrıklaştırması	Standart	Standart	Standart	Standart
Momentum denklemleri	Birinci merteye	Birinci merteye	Birinci merteye	Birinci merteye
Türbülans kinetik enerjisi	Birinci merteye	Birinci merteye	Birinci merteye	Birinci merteye
Spesifik yayılma oranı	Birinci merteye	Birinci merteye	Birinci merteye	Birinci merteye
Türbülans Yoğunluğu	2	2	2	2
Türbülans viskozite oranı	5	5	5	5

Tablo 5.2 Analizlerde kullanılan koşullar ve değerler tablosu

Toplam 2500 iterasyon	Sonraki 1500 iterasyon koşulu			
Green-Gauss Nod Based	AFF-3	AFF-8	Pervaneli AFF-3	Pervaneli AFF-8
Basınç ayrıklaştırması	İkinci merteye	İkinci merteye	İkinci merteye	İkinci merteye
Momentum denklemleri	İkinci merteye	İkinci merteye	İkinci merteye	İkinci merteye
Türbülans kinetik enerjisi	QUICK	QUICK	QUICK	QUICK
Spesifik yayılma oranı	QUICK	QUICK	QUICK	QUICK
Türbülans Yoğunluğu	2	2	2	2
Türbülans viskozite oranı	5	5	5	5

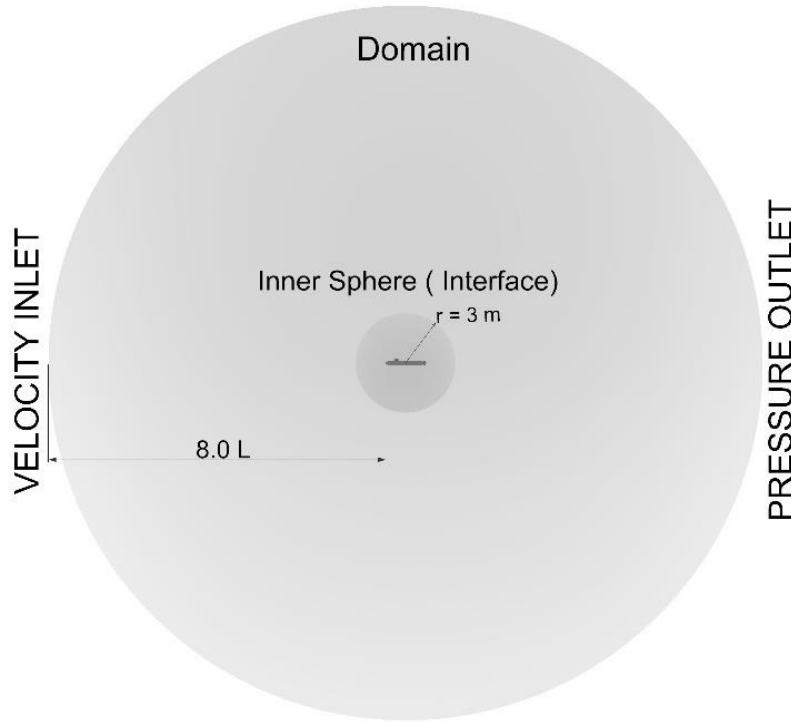
5.2 Ağdan Bağımsızlık Çalışması (Mesh Independency)

Ağ yapısından bağımsızlık çalışması yapılan analizlerin kalitesi için oldukça önemlidir. Daha sık atılmış olan mesh ile daha fazla hücre sayısı elde edilir. Daha fazla hücre sayısı ile yapılan analizin tamamlanması süresi ve maliyeti daha fazla olur. Mühendisliğe uygun olarak optimum işin yapılması için en uygun mesh sıklığının önceden bilinebilmesi ya da tahmin edilebilmesi gerekmektedir. Böylece ilerleyen analizlerde zaman, doğruluk ve maliyet açısından verimli bir çalışma olmuş olacaktır. Bu yüzden ağdan bağımsızlık çalışmasının analizlerin başlangıç kısmında yapılmış olması gerekmektedir. Her HAD analizlerinin yapıldığı çalışmada nasıl ağdan bağımsızlık yapılırsa, bu çalışmada da ilk kısımda ağdan bağımsızlık çalışması yapılmıştır.

Bilindiği gibi hesaplamalı akışkanlar dinamiği kısaca HAD bir aygıtın etrafındaki veya içindeki akışkan akışının bilgisayar ortamında modellenmesidir. Bunun için mevzu yüzeyin ağ yapısına kavuşturulması gerekmektedir. Yapmış olduğumuz analizlerde kullanılan meshleri oluşturmak için Pointwise adında mesh oluşturma programı kullanılmıştır. Geometri bu programa atılarak yüzeye gerekli ağ örülmesine başlanmış olunur. Mesh üretmek demek fiziksel bir tanım aralığını dahada küçük tanım aralıklarına yani elemanlara bölmek demektir. Bu kısımda gayemiz diferansiyel denklemlerin daha kolay çözülmesini sağlamaktır. Bu yüzden sonlu hacimler yöntemi kullanılarak elde edilecek olan sonuçların doğruluğu, kullanılan çözüm ağı içerisindeki elemanların çeşidine ve sayılarına bağlıdır [46]. Çözüm ağından bağımsızlığını kontrol edebilmek için yapılan analizler farklı çözüm ağı yoğunlukları için birçok defa tekrarlanmıştır. Bu çalışmada üç farklı mesh sıklığı kullanılarak sadece gövde ve dümenden oluşan DARPA Suboff AFF-3 konfigürasyonunda denemeler yapılmıştır. Mesh oluşturma işi hem yapılandırılmış hem de yapılandırılmamış ağ teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Denizaltı modeli, kendi uzunluğunun yaklaşık sekiz katı yarıçapa sahip küresel bir hesaplama alanında incelenmiştir. Oluşan toplam hücre sayısı yaklaşık 16x106. T-REX eleman yapısı $y^+ > 50$ olacak şekilde kullanılarak geometri etrafındaki sınır tabakalar modellenmiştir. Denizaltı analizlerinde kullanılan ağ yapısı $\sqrt{2}$ oranında büyültülüp küçültülerek kıyas

yapılabilecek farklı yoğunluk elde edilmiştir. Bunlar seyrek, orta ve sık olmak üç farklı gruba ayrılmıştır. Genellikle ağ bağımsızlığı çalışmalarında yeniden mesh oluşturabilmek için kullanılan büyütme oranının ITTC önerilerine göre $\sqrt{2}$ ile 2 arasında bir değer olması gerektiği, 2 nin çok fazla büyük olmasından dolayı alternatif olarak $\sqrt{2}$ nin kullanılabileceği bildirilmiştir [47].

Ağ yapısını kontrol altında tutabilmek için çalışmada iç ve dış olmak üzere iki adet küresel geometriye sahip domain kullanılmıştır. Dış domain olan küre, yarıçapı denizaltı modelimiz olan DARPA AFF-3 ün boyunun 8 katı büyüklüğündedir. İç domain olan küre ise üç metre yarıçapa sahiptir. Aşağıda verilen görselde sınır koşulları ve model görülmektedir.



Şekil 5.1 Model ve sınır koşullarının gösterimi

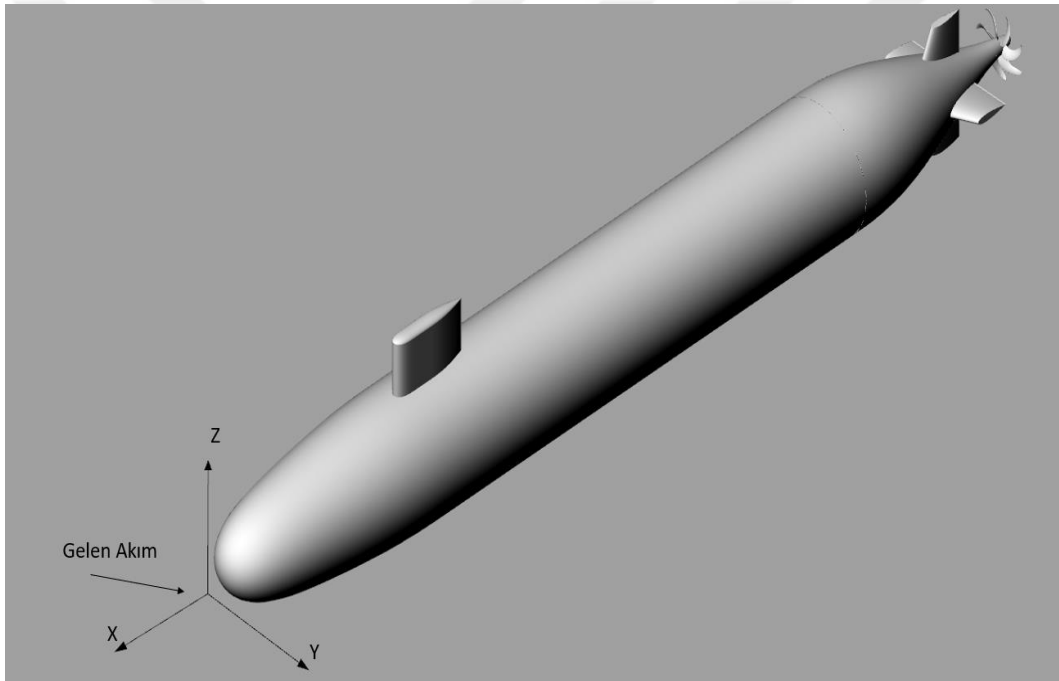
Yukarıdaki görsel 5.1 de gözüktüğü gibi sınır koşulları üç kısımda incelenmiştir:

- Giriş: Akışın gireceği ve ilerleyeceği hız girişi olarak belirlenir. Kürenin ön kısmından denizaltı modeline doğru akım gönderilmiştir. Statik sürüklenme durumu incelendiği için bileşke hız 6,5 knot hıza tekabül edecek şekilde yani

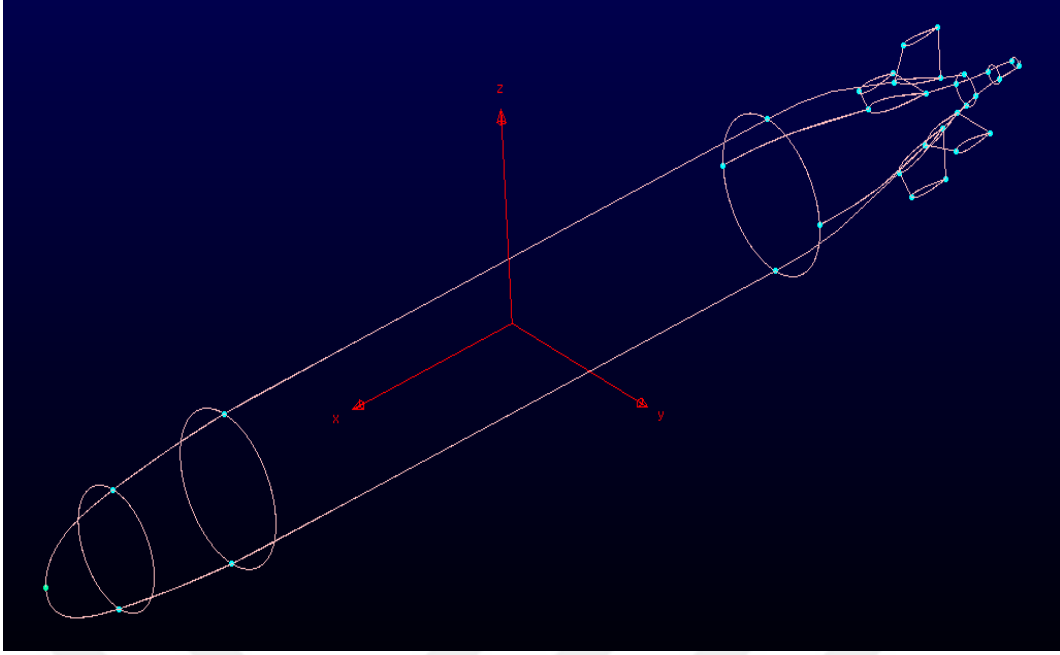
3,3436 m/s olacak şekilde farklı açılar için X ve Y yönlerine gelen hızlar girilmiştir.

- Çıkış (Çıkış): HAD denklemleri gereği hız girişi el ile girilip çıkış kısmı basınç çıkışı olarak belirlenir. Çıkıştaki basınç değerini sıfır kabul ederek enerji korunumu denklemini sağlanmış olur.

- Model (Duvar): DARPA Suboff denizaltı modeli duvar olarak tanımlandığı için akış içinden geçemez ve burada hız ile basınç değişimleri gözlemlenebilir. Dümen kenarları ve ileri aşamalarda analize dahil edilecek olan yelken kısmı ve pervane de duvar olarak tanımlanacaktır.

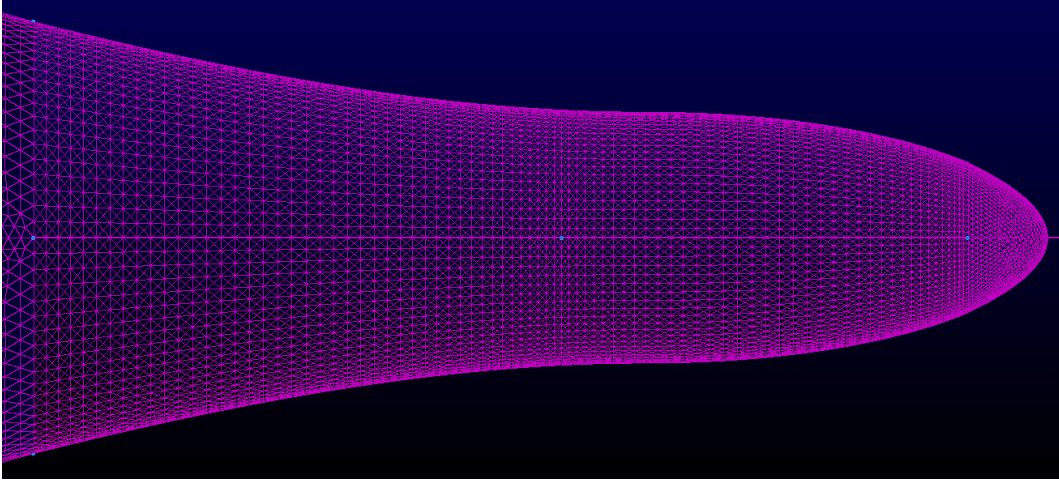


Şekil 5.2 Analizlerde kullanılan koordinat sistemi ve gelen akımın temsili gösterimi

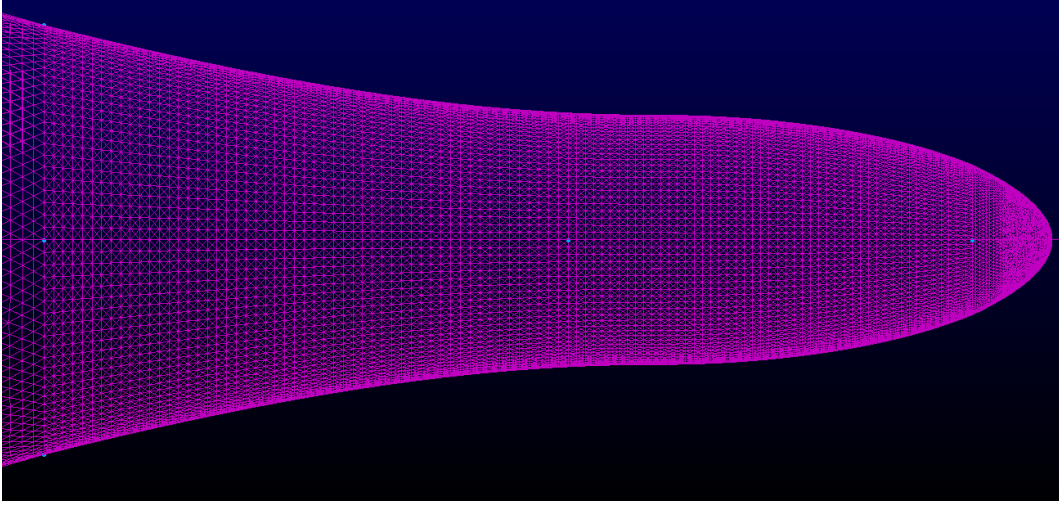


Şekil 5.3 Denizaltı koordinat ekseninin tam konumu

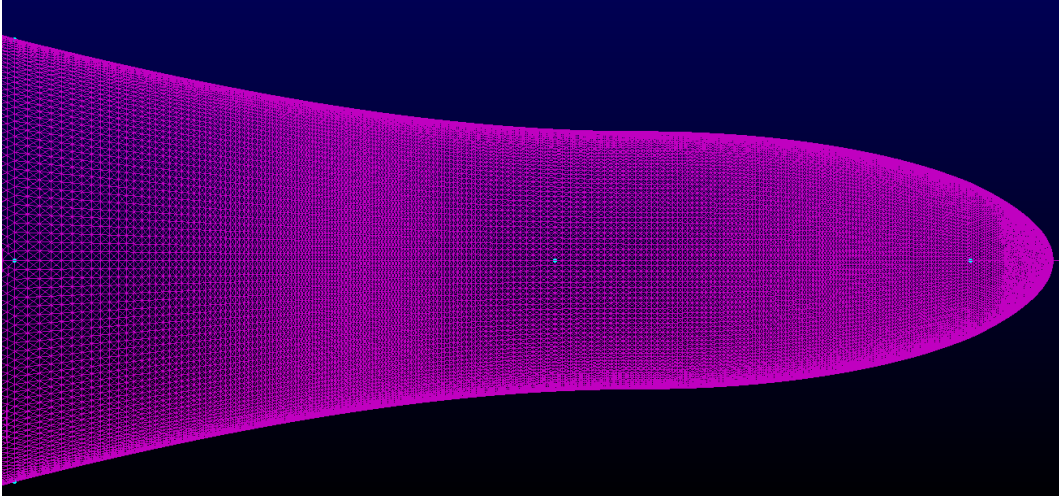
Doğrulamanın ilk bölümünde, ağdan bağımsızlık şartının sağlayabilmek adına sadece küçük açılardaki değişimlere bakılarak yola hangi sıklıkta olan mesh türü ile devam edilmesi gerektiğini anlayabilmek için AFF-3 konfigürasyonunun statik sürüklenme analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler 0 ila 6 derece arasındaki iki derecelik aralıklarla değişen küçük açılar için $V = 3,3436 \text{ m/s}$ model hızında, her mesh sıklığı için tekrar edilmiş ve elde edilen kuvvet ve moment değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen bu değerler var olan değerler ile kıyaslanabilmesi için boyutsuz değerlere dönüştürülmüştür. Yapılan kıyaslamalar sonucunda orta sıklıkta bulunan ağ tipiyle (medium mesh) diğer analizlerin yapılması kararlaştırılmıştır. Aşağıda verilen şekillerde analizlerde kullanılan ağ yoğunluklarını daha iyi anlatabilmek adına denizaltı geometrisinin üç yoğunlukta ağ yapısını gösteren resimler verilmiştir.



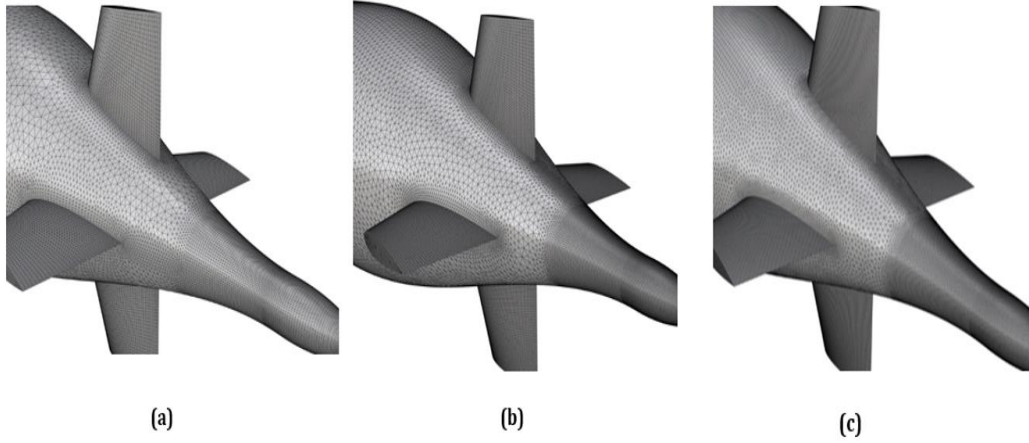
Şekil 5.4 Seyrek ağ yoğunluğunda olan geometri



Şekil 5.5 Orta ağ yoğunluğunda olan geometri



Şekil 5.6 Sık ağ yoğunluğunda olan geometri



Şekil 5.7 Soldan sağa ağ yoğunluğu: Seyrek (a), Orta (b) ve Sık (c)

5.3 Ağdan Bağımsızlık Çalışması Sonuçları

Her üç ağ yoğunluğunda oluşan hücre sayıları ve analiz sonuçları 0-2-4-6 derece açılar için tablolar halinde aşağıda verilmektedir. Tablolarda görülen β sürüklenme açısını (drift angle), X x-yönünde meydana gelen direnç kuvvetini, Y y-yönünde meydana gelen direnç kuvvetini, N z-ekseni etrafında oluşan dönme momentini, X' Y' N' ise sırasıyla X Y N değerlerinin kıyaslama yapabilmek için boyutsuz hale dönüştürüldüğünde oluşan değerlerini göstermektedir.

Tablo 5.3 $\beta=0$ derece için farklı ağ yoğunluklarında AFF-3 konfigürasyonunun manevra kuvvetleri ve momentinin sonuçları

$\beta=0$ derece		HAD Sonuçları			% Hata (Deneyisel verilere bağlı olarak)		
Ağ yoğunluğu	Hücre Sayıları	X (N)	Y(N)	N(Nm)	(X')	(Y')	(N')
Sık	26034561	112,1016	0,0988	0,1154	1,8578	-	-
Orta	16146445	112,3571	0,0664	0,1113	1,6341	-	-
Seyrek	9256715	113,1616	0,3080	0,4964	0,9298	-	-

Tablo 5.4 $\beta=2$ derece için farklı ağ yoğunluklarında AFF-3 konfigürasyonunun manevra kuvvetleri ve momentinin sonuçları

$\beta=2$ derece		HAD Sonuçları			% Hata (Deneyssel verilere bağlı olarak)		
Ağ yoğunluğu	Hücre Sayıları	X (N)	Y(N)	N(Nm)	(X')	(Y')	(N')
Sık	26034561	111,2394	36,2315	164,2729	2,9568	6,7429	-0,1455
Orta	16146445	111,3642	34,9620	164,2448	2,8480	10,0107	-0,1284
Seyrek	9256715	112,0950	34,2674	163,0828	2,2105	11,7984	0,5800

Tablo 5.5 $\beta=4$ derece için farklı ağ yoğunluklarında AFF-3 konfigürasyonunun manevra kuvvetleri ve momentinin sonuçları

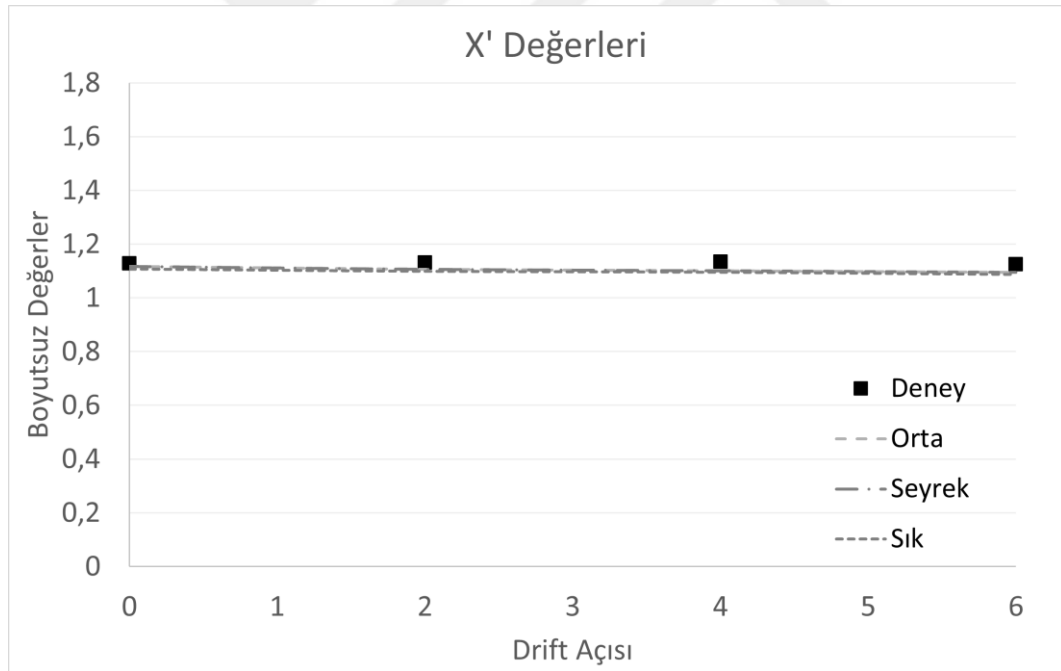
$\beta=4$ derece		HAD Sonuçları			% Hata (Deneyssel verilere bağlı olarak)		
Ağ yoğunluğu	Hücre Sayıları	X (N)	Y(N)	N(Nm)	(X')	(Y')	(N')
Sık	26034561	110,8821	81,6928	322,7482	3,5244	2,8037	5,4054
Orta	16146445	111,0518	80,2730	323,7442	3,3767	4,4930	5,1135
Seyrek	9256715	111,5469	79,0410	321,7783	2,9460	5,9588	5,6897

Tablo 5.6 $\beta=6$ derece için farklı ağ yoğunluklarında AFF-3 konfigürasyonunun manevra kuvvetleri ve momentinin sonuçları

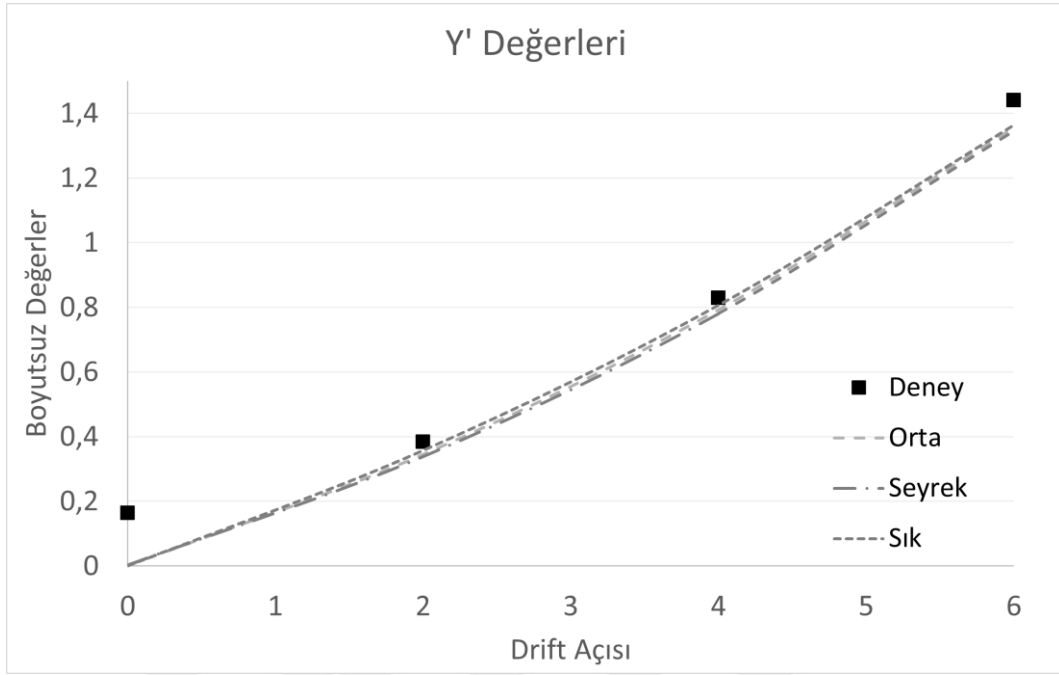
$\beta=6$ derece		HAD Sonuçları			% Hata (Deneyssel verilere bağlı olarak)		
Ağ yoğunluğu	Hücre Sayıları	X (N)	Y(N)	N(Nm)	(X')	(Y')	(N')
Sık	26034561	110,0291	138,0959	464,8401	3,3723	5,3701	2,6802
Orta	16146445	110,2680	137,3063	466,0138	3,1624	5,9112	2,4344
Seyrek	9256715	110,9607	136,2890	464,9756	2,5541	6,6083	2,6518

Yukarıda verilen tablolar görüldüğü üzere, bu çalışmanın ilk doğrulama bölümünü göstermektedir. Görüldüğü gibi, hesaplama sonuçları deneysel sonuçlarla çok iyi bir uyum içindedir. Bu sonuçlar göz önünde bulundurularak, sonraki analizler için (diğer açılar, 20 dereceye kadar ikişer derece aralıklı) kullanılmak üzere orta ağ yoğunluğu seçilmiştir. Gerçekleştirilen tüm sayısal HAD analizleri k- ω SST türbülans modeli kullanılarak yapılmıştır. Böylece uygun ağ yoğunluğu belirlendikten sonra büyük açılarda da ikişer derece aralıklarla olacak şekilde 20 dereceye kadar diğer açıların analizlerine de devam edilmiştir.

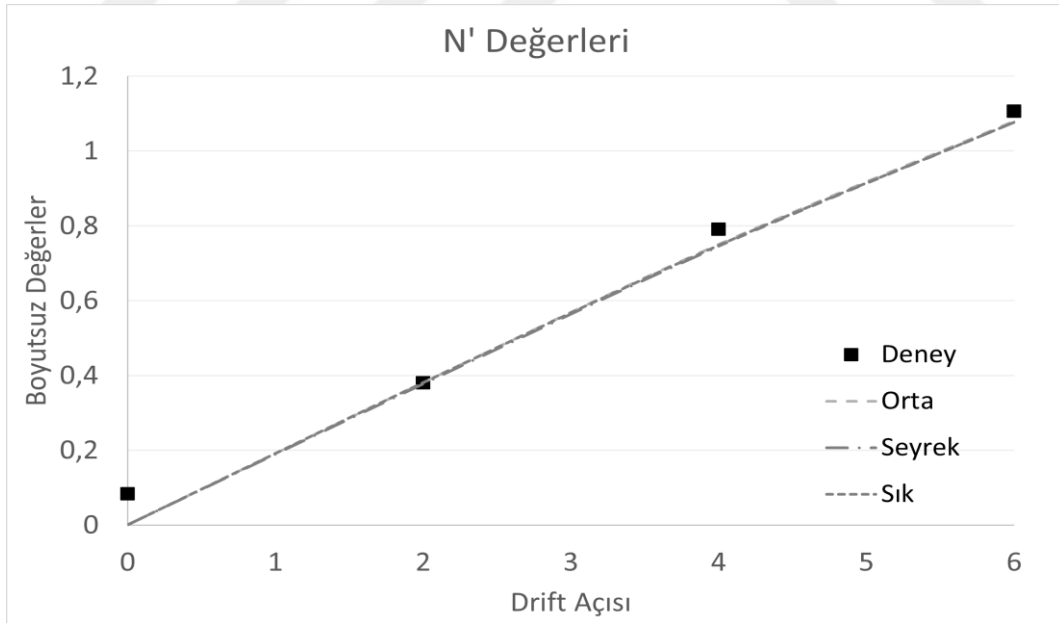
Aşağıdaki verilen grafiklerde ağdan bağımsızlık çalışmasının her ağ yoğunluğu ve literatürde rahatlıkla ulaşılabilen deneysel verilerle kıyası görülmektedir. Grafiklerden de anlaşılabileceği gibi her üç ağ yoğunluğunda yapılan analizler ve deneysel birbiriyle örtüşmektedir. Bu çalışmada bu nedenle medium mesh çeşidi (orta ağ yoğunluğu) seçilmiştir.



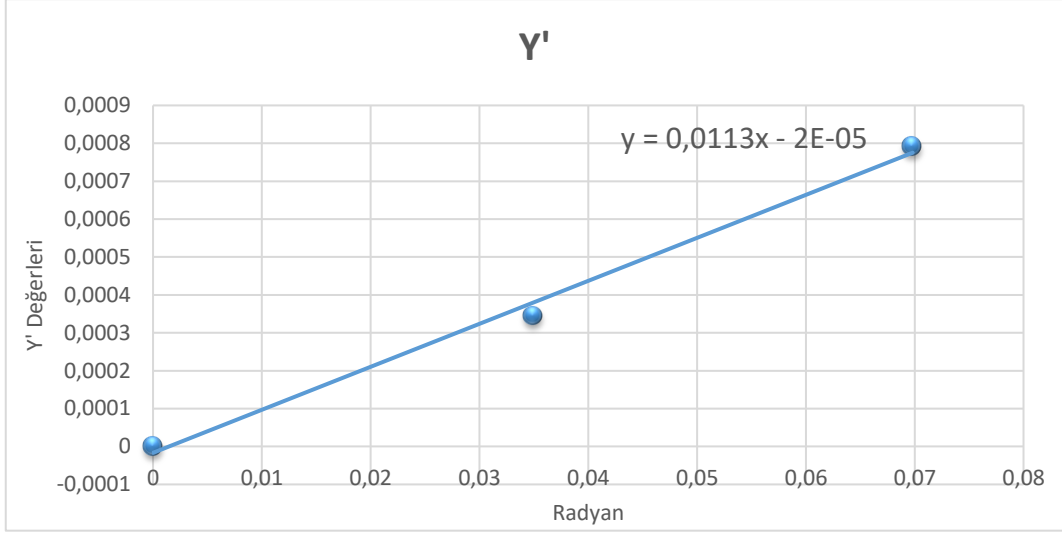
Şekil 5.8 AFF-3 konfigürasyonu için farklı ağ yoğunlukları ve deneysel sonuçların boyutsuz X' değerleri ile kıyaslanması



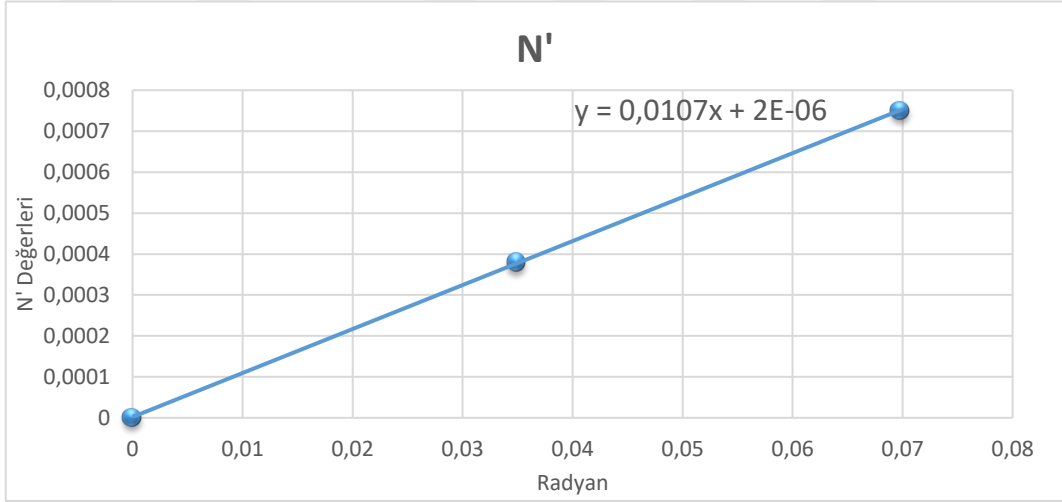
Şekil 5.9 AFF-3 konfigürasyonu için farklı ağ yoğunlukları ve deneysel sonuçların boyutsuz Y' değerleri ile kıyaslanması



Şekil 5.10 AFF-3 konfigürasyonu için farklı ağ yoğunlukları ve deneysel sonuçların boyutsuz N' değerleri ile kıyaslanması



Şekil 5.11 Analizlerde AFF-3 konfigürasyonundan küçük açılarda (0° - 2° - 4°)
lineer denklemden anlaşılan Y_v değeri = 0,0113

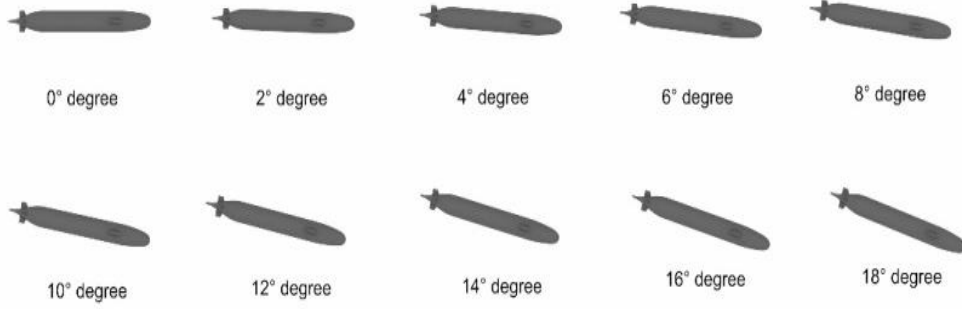


Şekil 5.12 Analizlerde AFF-3 konfigürasyonundan küçük açılarda (0° - 2° - 4°)
lineer denklemden anlaşılan N_v değeri = 0,0107

5.4 AFF-3 Konfigürasyonu için Büyük Açılarda HAD ile Statik Sürüklenme Durumunda Oluşan Kuvvetlerin ve Momentlerin İncelenmesi

Önceki kısımda 0 dereceden 6 dereceye kadar olan statik sürüklenme analizleri yapılmıştı. Orta ağ yoğunluğunun seçilmesiyle beraber 8 derecen 20 dereceye kadar ikişer derece aralıklarla analizler tamamlanmıştır. Elde edilen hidrodinamik kuvvetler ve momentler, SNAME, 1950'nin tavsiyesine uygun olarak denklem 2.16 ve 2.17'ye göre boyutsuz değerlere dönüştürülmüştür. Elde edilen boyutsuz

değerler var olan deney sonuçları ile tablolar halinde kıyaslanmış ve sonuçlar grafikte verilmiştir.

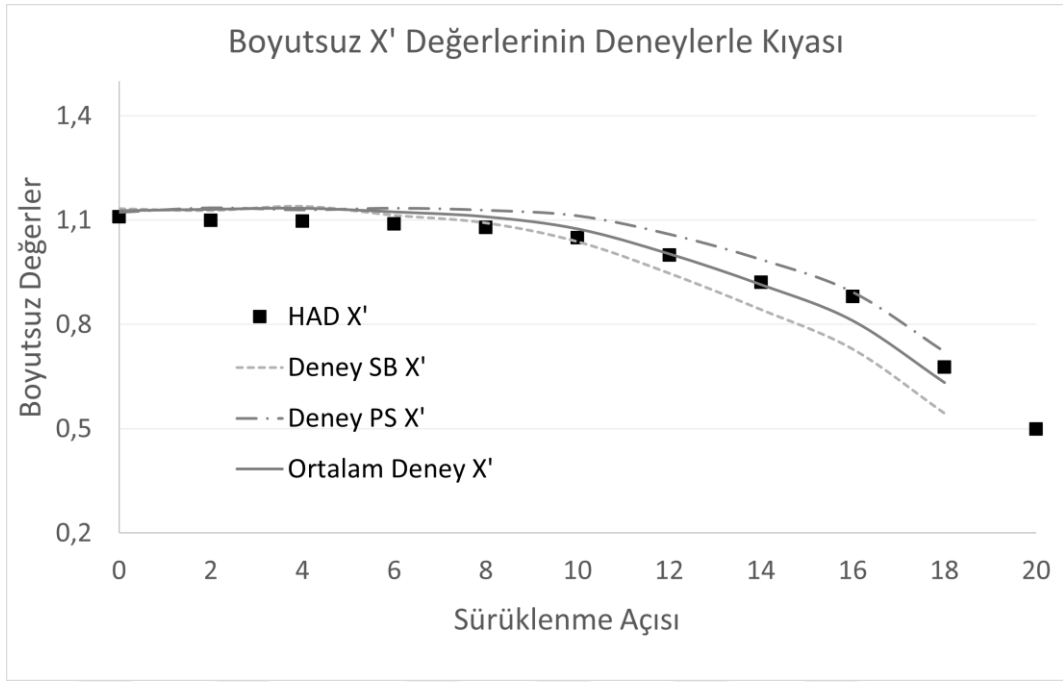


Şekil 5.13 DARPA Denizaltı modelinin farklı sürüklenme açılarındaki konumunun temsili görünümü

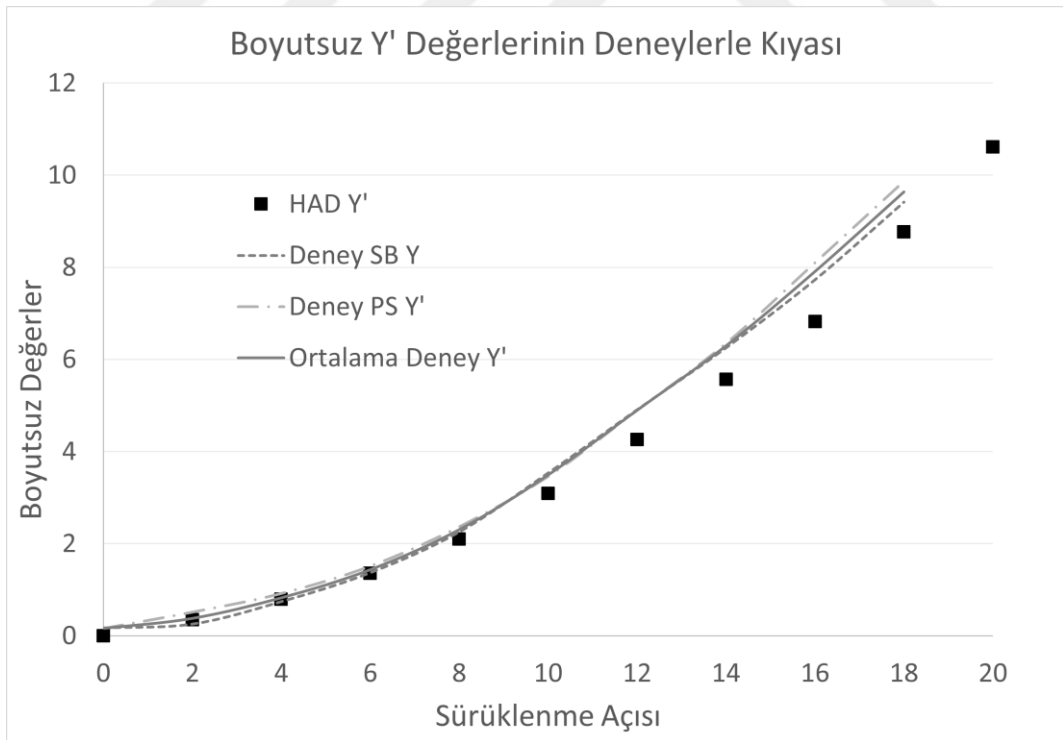
Bu çalışmada yaptığımız HAD analizlerinin tamamlanmasıyla birlikte elde edilen kuvvet ve moment değerleri aşağıdaki tabloda verilmektedir.

Tablo 5.7 AFF-3 konfigürasyonunun analiz sonuçları

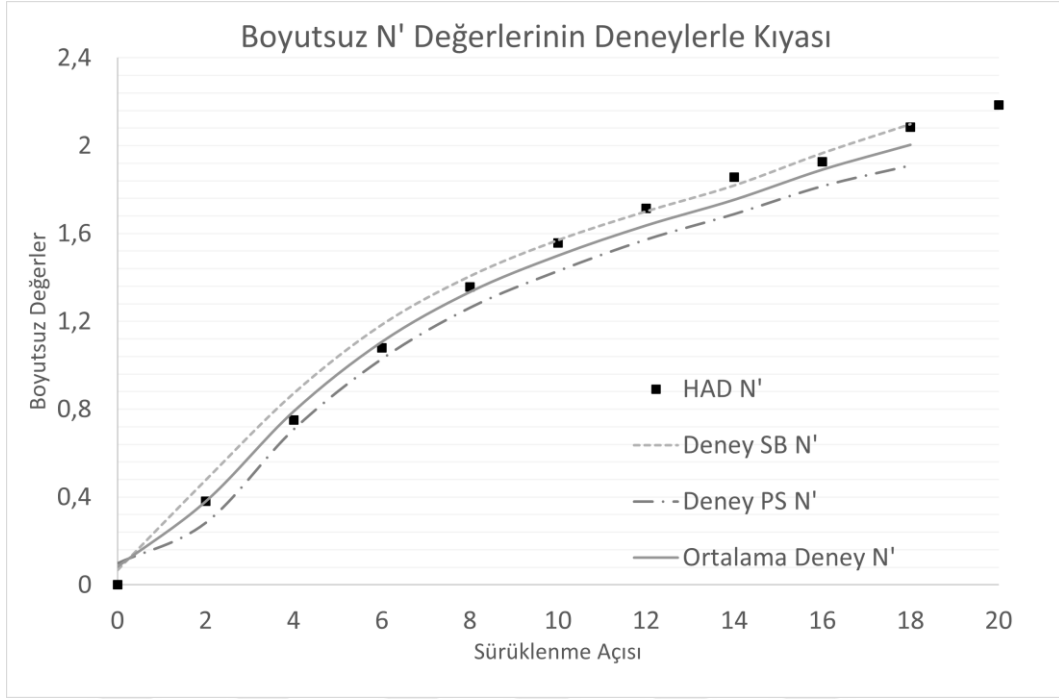
Drift Açısı	X (N)	X' ($\times 10^{-3}$)	Y (N)	Y' ($\times 10^{-3}$)	N (Nm)	N' ($\times 10^{-3}$)
0°	112,3570	-1,1090	-0,0664	-0,000655	0,1113	0,0002578
2°	111,3641	-1,0992	-34,9619	-0,345109	164,2448	0,3804878
4°	111,0517	-1,0961	-80,2729	-0,792373	323,7442	0,7499826
6°	110,2680	-1,0884	-137,3062	-1,355348	466,0138	1,0795630
8°	109,2802	-1,0787	-212,1415	-2,094047	585,3134	1,3559312
10°	106,2250	-1,0485	-312,6999	-3,086657	672,1073	1,5569972
12°	101,2737	-0,9996	-431,0689	-4,255077	740,1920	1,7147214
14°	93,2992	-0,9209	-564,1457	-5,568676	801,4047	1,8565262
16°	89,12992	-0,8798	-691,3075	-6,823889	831,3774	1,9259606
18°	68,5620	-0,6767	-887,8658	-8,764114	899,7069	2,0842521
20°	50,51286	-0,49861	-1075,1145	-10,61244	943,30174	2,18524



Şekil 5.14 X eksenı boyunca HAD ve Deney sonuçları



Şekil 5.15 Y eksenı boyunca HAD ve Deney sonuçları



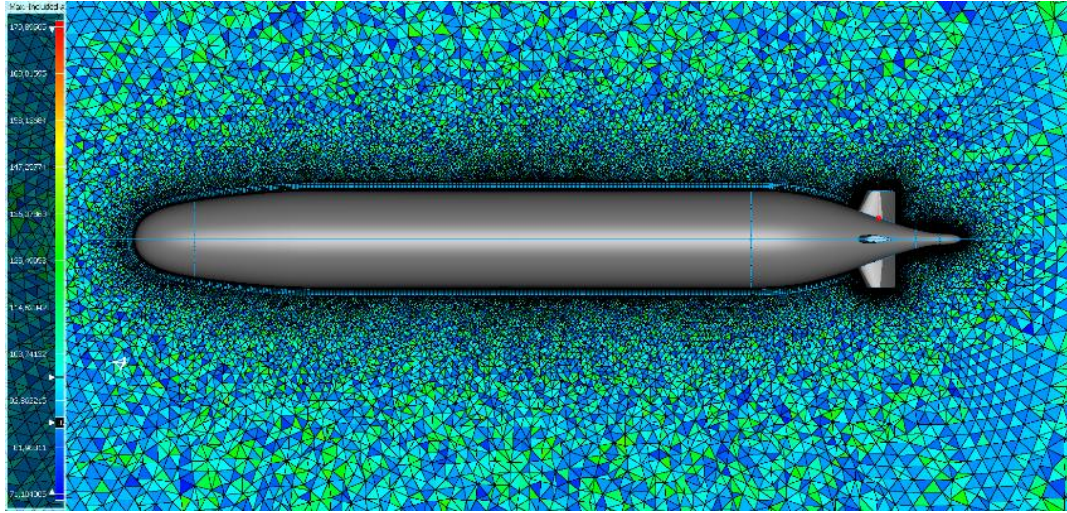
Şekil 5.16 Z eksenli etrafında oluşam moment N' için HAD ve Deney sonuçları

Yukarıda verilen grafiklerden anlaşıldığı üzere elde edilen verilerin deney yapılarak elde edilen verilerle tutarlı olduğu görülmektedir. Literatürde AFF-3 konfigürasyonunun deney sonuçları hem iskele tarafı hem de sancak tarafı için ayrı ayrı yapılmış biçimde bulunabilmektedir. Bu çalışmada daha net kıyaslama yapabilmek için hem iskele-sancak kısmının boyutsuz sonuçları hem de iskele-sancak kısmının boyutsuz sonuçlarının ortalaması kullanılmıştır. Verilen grafiklerde “Exp Ave” (experimental average) olarak kısaltılan kısım ortalama deney sonuçlarını temsil etmektedir. Exp SB sancak kısmının deneysel sonuçlarını, Exp-PS ise port side yani iskele kısmına ait olan deney sonuçlarını ifade etmektedir. 20 dereceye ait herhangi bir deney çalışması olmadığı için 20 derecenin sadece HAD analizi sonuçları paylaşılmıştır.

Deneysel sonuçlar, sancak (SB) ve iskele (PS) olmak üzere her iki taraftan gelen akış için verilmiştir. Bu iki deneysel sonuç, deneylerin belirsizliği olarak yorumlanabilir. HAD analizlerinin sonuçlarının iki deneysel sonuca da yakın olduğu görülmektedir. HAD analizlerinden elde edilen değerleri ve deneysel sonuçları karşılaştırdığımızda sapma oranları aşağıda verilen Tablo 4'teki gibi olmaktadır. 20 derece için deney sonucu olmadığından dolayı sapma verisi eklenmemiştir.

Tablo 5.8 AFF-3 HAD sonuçlarının deney sonuçlarından sapma miktarı

Drift Açısı	% Sapma (X')	% Sapma (Y')	% Sapma (N')
0°	1,6340	-	-
2°	2,8480	10,0106	-0,1283
4°	3,376	4,4929	5,1135
6°	3,1623	5,9112	2,4344
8°	2,8194	9,3486	-1,6821
10°	2,4607	11,7467	-3,8690
12°	0,3317	13,1882	-4,8118
14°	-0,7170	11,6153	-5,9056
16°	-8,5436	13,7744	-1,9026
18°	-7,0001	9,1000	-4,0565



Şekil 5.17 Denizaltı modeli etrafındaki Hacimsel Ağ yapısı

5.5 DARPA Suboff AFF-8 Konfigürasyonunun HAD Analizleri ile Statik Sürüklenme Sırasında Karşılaştığı Kuvvetlerin ve Momentlerin İncelenmesi

AFF-3 konfigürasyonu için yapılan çalışmaların ardından, aynı mesh yapısı ve sınır koşulları kullanılarak AFF-8 konfigürasyonu için analizler yapılmıştır. HAD

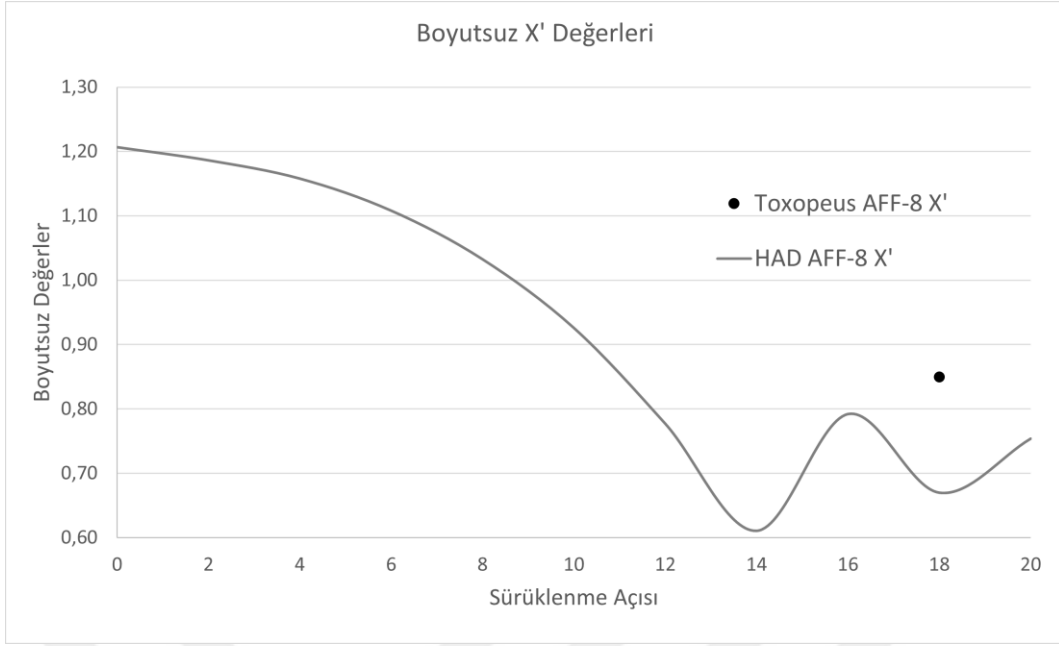
analizleri yapılarak elde edilen sonuçları kıyaslayabileceğimiz herhangi bir deney sonucu literatürde mevcut değildir. Literatür taraması yapıldığında karşımıza DARPA Suboff AFF-8 Konfigürasyonu için sadece 0 derece (yani direnç problemi) ve 18 derece için statik sürüklenme analizlerinin yapıldığı ve sonuçlarının paylaşıldığı Toxopeus ve arkadaşlarının çalışması çıkmaktadır. Çalışmalarında iki viskoz akış çözümü kullanarak ve 0° ve 18° sürüklenme açıları için DARPA Suboff AFF-1 konfigürasyonunun ve DARPA Suboff AFF-8 konfigürasyonunun manevra kuvvetlerini ve momentlerini belirlemeye çalışmışlardır [48]. Onların yapmış oldukları çalışmanın sonuçları, bizim yapmış olduğumuz HAD analizlerinin sonuçları ile iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür. AFF-8 için yapılan analizlerin sonuçları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 5.9 Toxopeus vd. tarafından AFF-8 için yapılan HAD sonuçları [48]

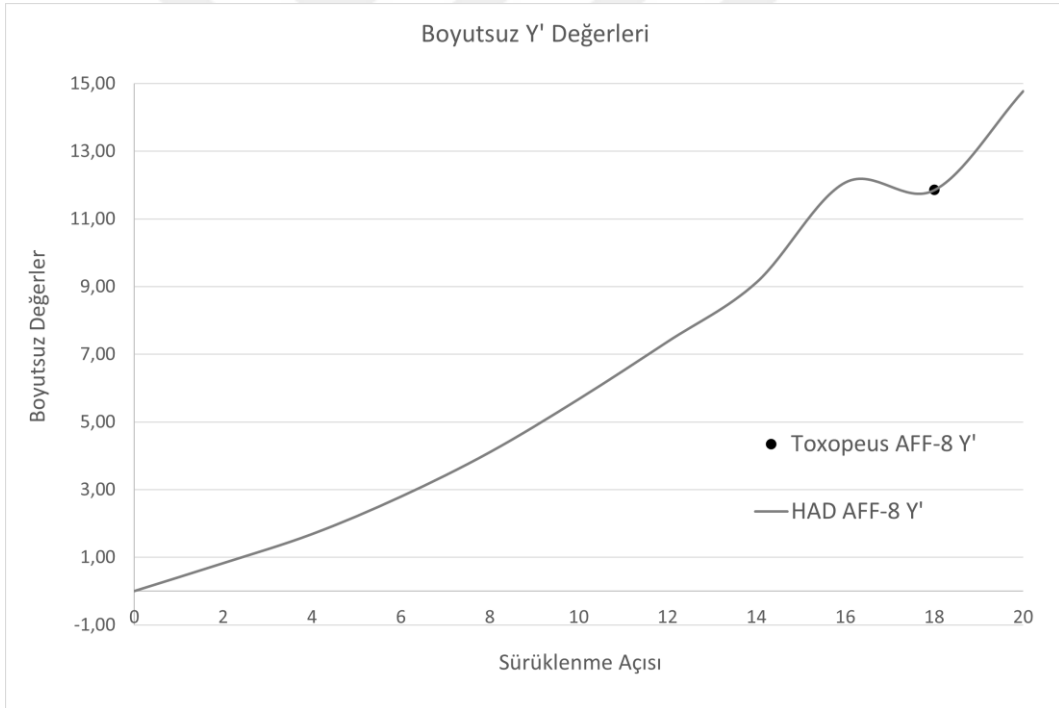
Açı	X'	Y'	N'
18°	0,85	11,866	2,973

Tablo 5.10 AFF-8 konfigürasyonu için elde edilen kuvvetler ve momentler

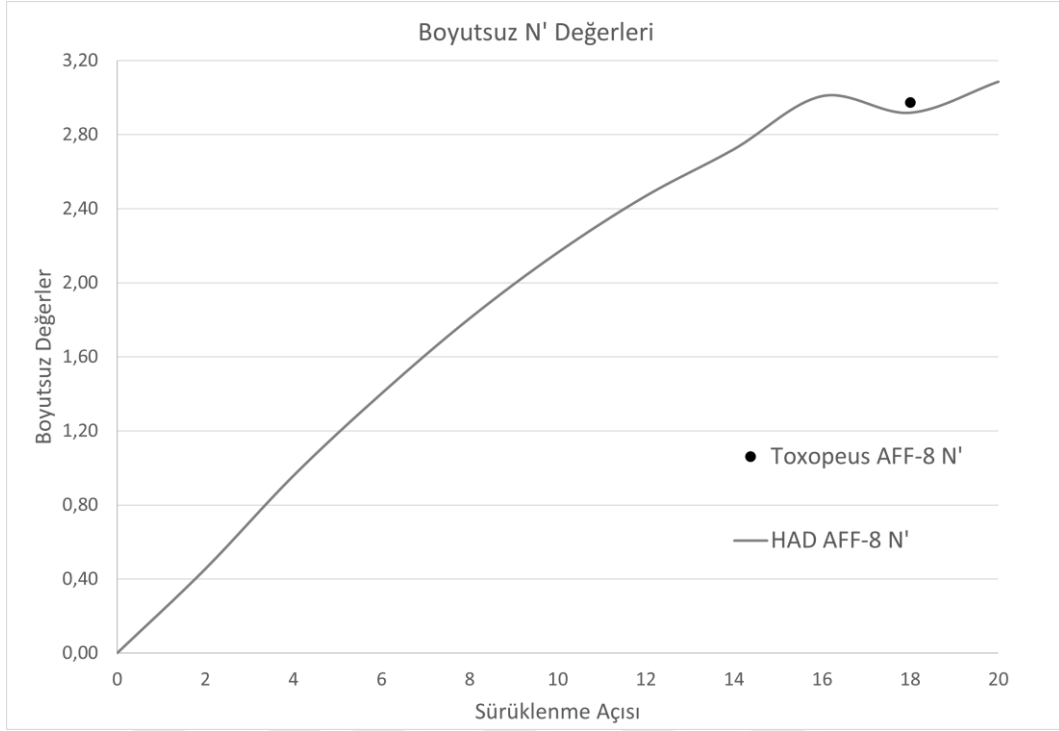
Sürüklenme Açı	X (N)	X' (x10 ⁻³)	Y (N)	Y' (x10 ⁻³)	N (Nm)	N' (x10 ⁻³)
0°	122,2605	-1,20683	-0,07076	-0,00069	0,36253	0,00084
2°	120,1928	-1,18642	-83,65574	-0,82576	196,39776	0,45497
4°	117,3173	-1,15803	-170,72788	-1,68525	413,57488	0,95808
6°	112,2693	-1,10821	-282,83820	-2,79189	605,27235	1,40216
8°	104,6136	-1,03264	-415,85953	-4,10494	780,27290	1,80757
10°	93,7995	-0,92589	-574,71143	-5,67297	933,66604	2,16292
12°	78,7258	-0,77710	-746,74898	-7,37115	1065,71360	2,46882
14°	61,8646	-0,61066	-924,11950	-9,12197	1174,60530	2,72107
16°	80,2412	-0,79206	-1223,29300	-12,07511	1298,31590	3,00766
18°	67,8632	-0,66987	-1200,20900	-11,84725	1259,51750	2,91778
20°	76,373739	-0,75388	-1496,4421	-14,77136	1331,7995	3,08523



Şekil 5.18 AFF-8 için 0^0 - 20^0 arası X yönünde oluşan boyutsuz kuvvet değerleri



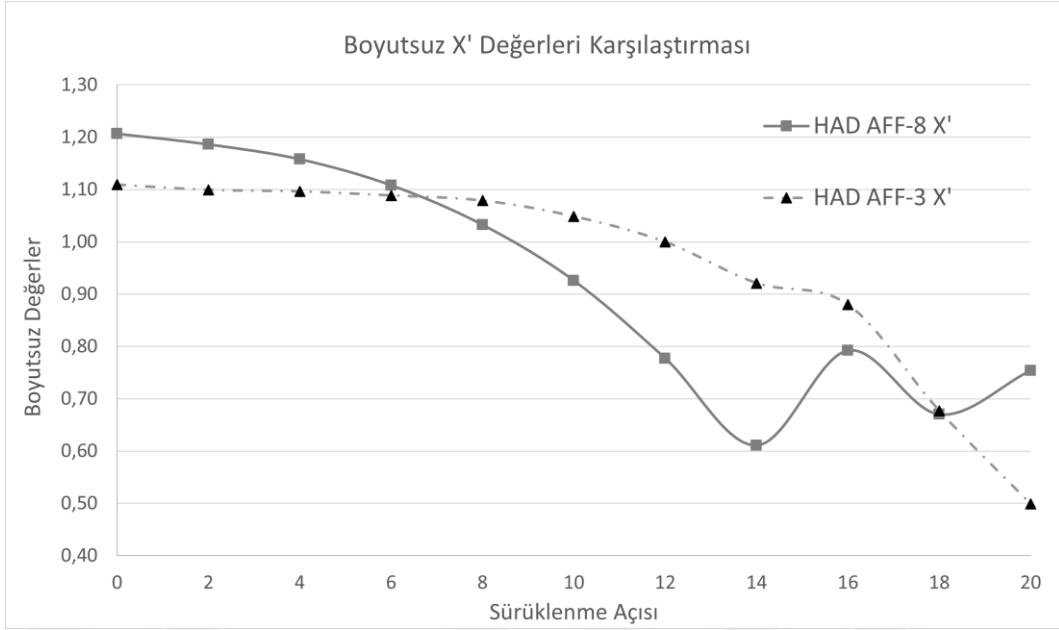
Şekil 5.19 AFF-8 için 0^0 - 20^0 arasında Y yönünde oluşan boyutsuz kuvvet değerleri



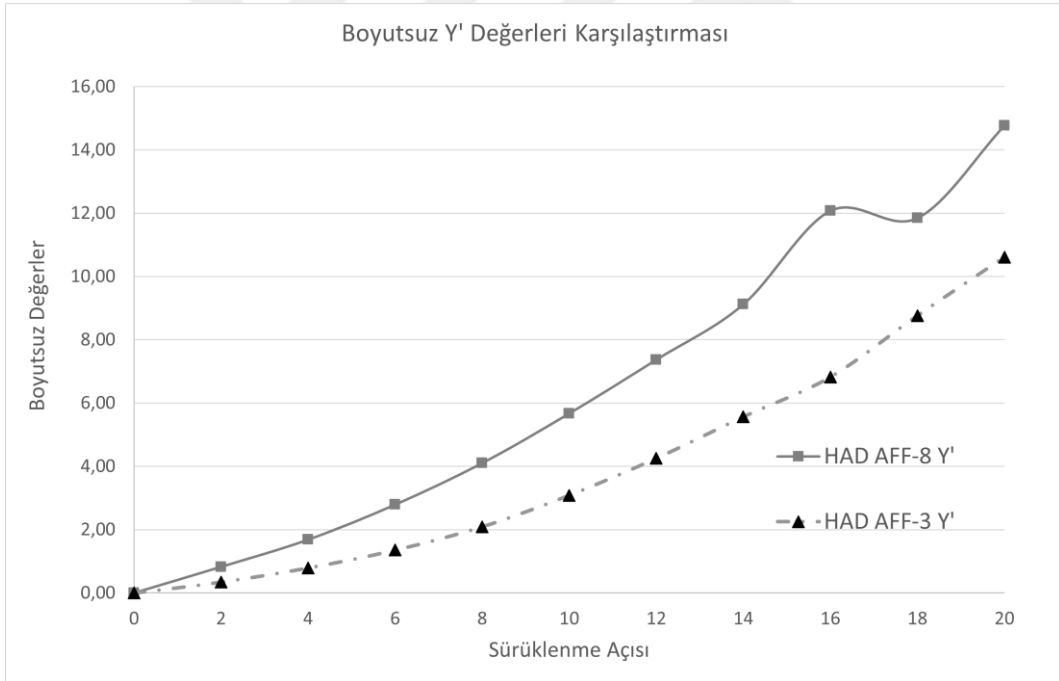
Şekil 5.20 AFF-8 için 0^0 - 20^0 arasında z eksenini etrafındaki boyutsuz moment değerleri

Yukarıda verilen üç grafik AFF-8 için yapmış olduğumuz HAD analizlerini ve literatürde AFF-8 ile ilgili var olan HAD analizi sonuçlarının kıyasını göstermektedir. Elde edilen sonuçların iyi bir uyum içinde olduğu gözükmemektedir. DARPA Suboff AFF-8 konfigürasyonunun analizlerinde ilginç olarak karşılaşılan durum 14^0 dereceden sonra X eksenini yönünden gelen kuvvet değerlerinin belirli açılar artmasıdır. Bunun sebebinin kuvvetle muhtemel yelken kısmının olmasından dolayı olduğu düşünülmektedir. AFF-3 ile yapılan analizlerde böyle bir değişim olmayıp açı değeri arttıkça beklenen şekilde X yönündeki kuvvetler de azalmıştır.

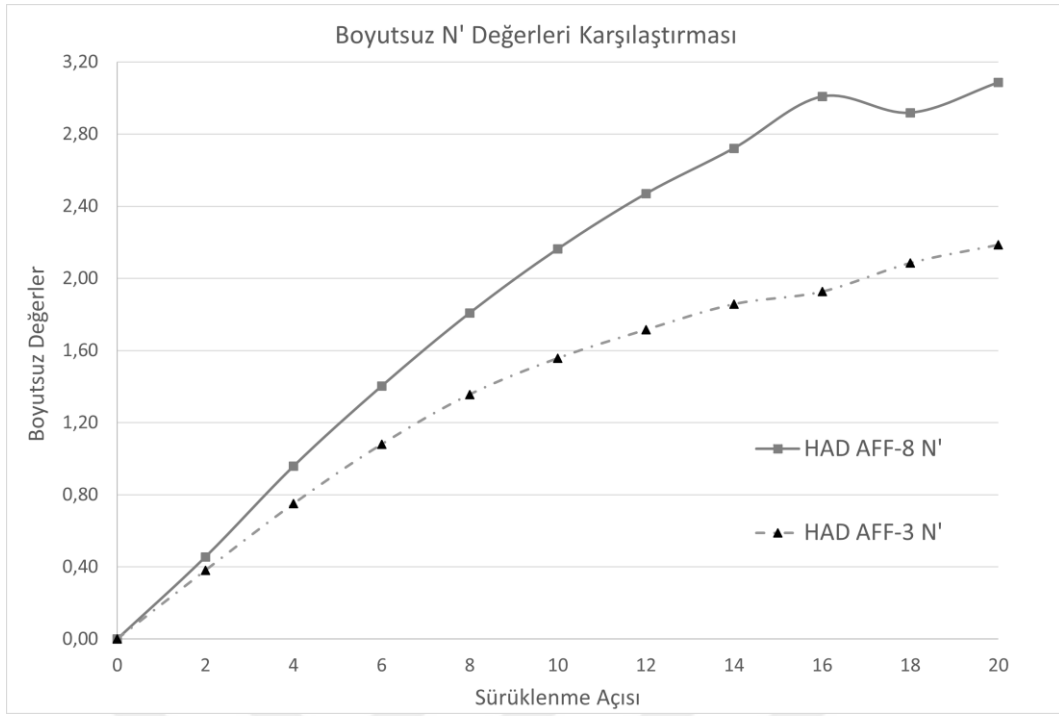
Aşağıda verilen diğer üç farklı grafik ise DARPA Suboff AFF-3 konfigürasyonunun ve bu konfigürasyona yelken eklenmesi ile elde edilen DARPA Suboff AFF-8 konfigürasyonunun daha iyi kıyasını göstermektedir. Bu bölümde bahsedilen modellerin tamamı pervanesiz olarak, modele önünden akım gönderilerek X ve Y yönündeki kuvvet değerleri bulunmuş ve Z eksenini etrafında oluşan N moment değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5.21 AFF-8 ve AFF-3 için $0^0 - 20^0$ arası X yönünde oluşan boyutsuz kuvvet değerleri



Şekil 5.22 AFF-8 ve AFF-3 için $0^0 - 20^0$ arası Y yönünde oluşan boyutsuz kuvvet değerleri



Şekil 5.23 AFF-8 ve AFF-3 için 0^0 - 20^0 arası boyutsuz N' moment değerleri

6

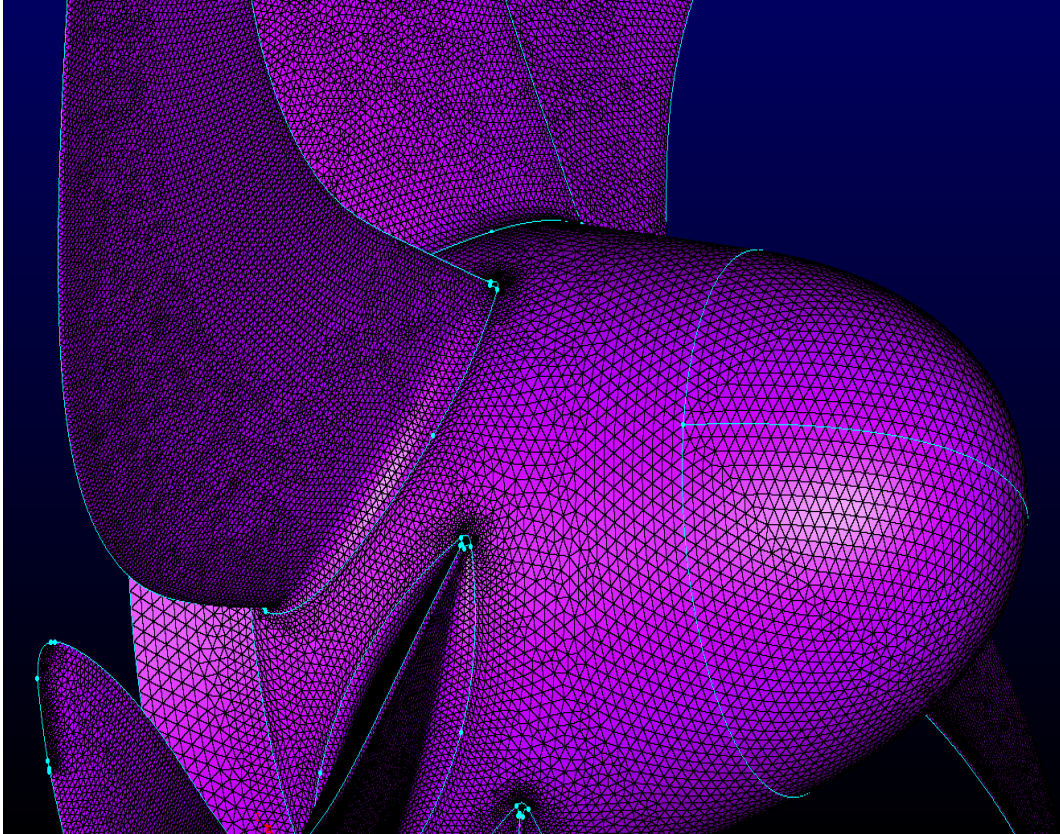
KENDİNDEN TAHRİKLİ PERVANELİ DARPA SUBOFF DENİZALTI KONFIGÜRASYONLARININ STATİK SÜRÜKLENME DURUMUNUN HAD İLE İNCELENMESİ

Bu kısımda pervaneli denizaltı modelleri ile yapılan çalışmalar ele alınmıştır. Eklenen pervane E1619 pervanesi olarak bilinmekte olup, INSEAN kurumu tarafınca dizayn edilen temsili denizaltı pervanesidir. Bu pervanenin çap deliği denizaltı modellerinin kuyruk kısmına geçirilerek monte edilmiştir. Önceki kısımlarda yapılan analizler bu kısımda pervaneli olarak aynı modeller üzerinden yeniden yapılmıştır. Bunun için her iki denizaltı modelinin de sevk noktası yani pervane itmesi buna müteakip oluşan denizaltı direncinin eşit olduğu nokta yaklaşımlar yapılarak bulunmuştur. Daha sonra bulunan RPM değerinde diğer açıların analizlerine geçilmiştir. Böylece kendinden tahrikli olarak sevk edilebilen DARPA Suboff AFF-3 ve DARPA Suboff AFF-8 konfigürasyonlarının farklı açılardaki statik drift durumunda oluşan kuvvet ve moment değerleri elde edilmiştir. Pervaneli olarak analizlerin yapıldığı bu kısımda denizaltı modellerinin sevk noktalarının belirlenmesinde değişken yüklemeli sevk denemeleri yöntemi kullanılmıştır. Değişken yüklemeli denilmesinin nedeni farklı yükleme durumlarında analizlerin yapılmasındandır. Bir başka deyimle model hızının sabit tutulmasıyla beraber dönen pervane devrinin değiştirilmesidir.

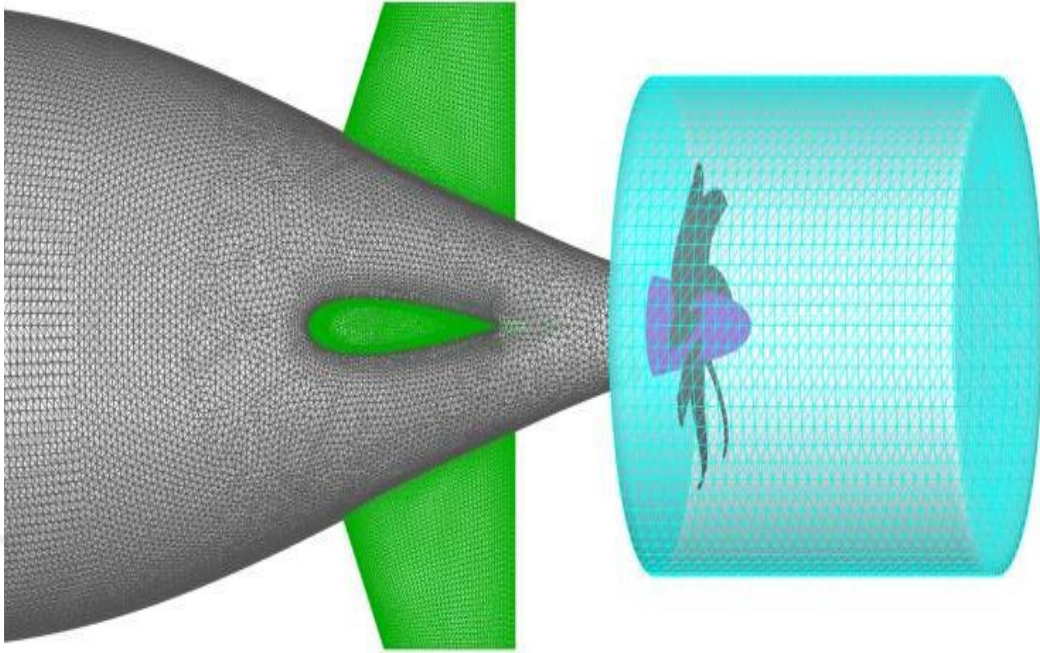
6.1 INSEAN E1619 Pervanesi ile HAD Analizleri Yöntemi

INSEAN E1619 pervanesinin açık su karakteristikleri önceden yapılan çalışmalarda belirlendiği ve değerlerine ulaşılabildiği için tekrardan farklı çözüm ağı yoğunluklarına göre analizler yapılmamıştır [27]. Pervaneye ait rotasyonel dönme hareketini çözücüye anlatabilmek için zamandan bağımsız hesaplar için önerilen hareketli referans eksen (Moving Reference Frame - MRF) metodu kullanılmıştır. Farklı ilerleme hızları için gönderilen akış hızı sabit tutularak pervaneye ait devir sayısı yani RPM (revolution per minute) değiştirilmiştir. Bu

analizler sırasında pervane ve hub(pervanenin oturduğu kısım) da denizaltı gibi duvar olarak tanımlanmıştır. En dışta bulunan büyük küre geometrisi analizler boyunca simetri olarak tanımlanmış, iç küre ise ara yüzey olarak tanımlanmıştır. Denizaltı modellerine eklenirken pervaneli kısım ayrı bir silindir domain içinde olacak şekilde analiz yapılmıştır. Bunları yapabilmek adına ağ oluşturma programında üç farklı blok oluşturularak ANSYS Fluent programına geçilmiştir. Birinci blok E1619 pervanesi ve o pervaneyi içine alan silindir domainden oluşmaktadır. İkinci blok ise denizaltı geometrisini, denizaltıyı içine alan iç küreyi ve pervane kısmının domaininden içermektedir. Üçüncü blok ise iç küre ve dış küre olarak tanımlanan domainlerden oluşturulmuştur. Analiz programında dönme yönü seçilmiş ve uygun görülen RPM değerlerinde analizler önceki kısımlarda olduğu gibi 2500 iterasyon olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.1 Pervane bölgesinde çözüm ağı görünümü



Şekil 6.2 Pervane bölgesinde çözüm ağı görünümü

6.2 Kendinden tahrikli AFF-3 Konfigürasyonu

Bu bölümde DARPA Suboff AFF-3 denizaltı modelinin kendisini sevk edebilmesi için kullanılan E1619 model pervanesi ile birlikte yapılan analizleri ve bu analizlerin sonuçları anlatılacaktır.

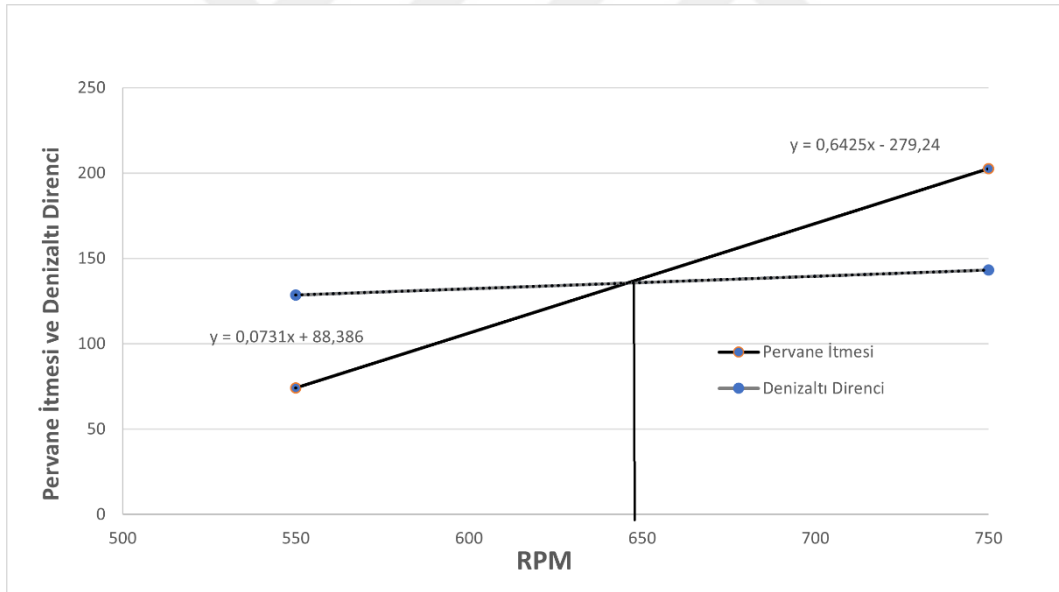
DARPA Suboff AFF-3 konfigürasyonu bare hull denilen çıplak gövde ve dört adet kış dümenden oluşmaktadır. Önceki bölümlerde pervanesiz olarak statik sürüklenme analizleri yapılan bu modele bu bölümde dönme hareketinin tanımlanabildiği E1619 model pervanesi eklenmiştir.

Önce pervanenin eklenmiş olduğu denizaltı modeli için sevk noktası tayin edilmiştir. Bunu yapabilmek için değişken yüklemeli denemeler yapılarak asıl olan değere yaklaşımlarda bulunulmuştur. Sevk noktasından maksat sabit denizaltı hızında (bu çalışmada $6,5 \text{ knot} = 3,3436 \text{ m/s}$) denizaltının maruz kaldığı direncin, pervanenin ürettiği itme kuvvetine eşit olacağı andaki pervane devir sayısına (RPM değerine) ulaşmaktır. Önce tahmini olarak 550 rpm ve 750 rpm için analizler yapılmıştır. Aşağıdaki tabloda verilen sonuçların grafiği çizdirilerek, oluşan her bir doğrunun denklemi çıkarılmıştır.

Tablo 6.1 İlk RPM değeri yaklaşımları

RPM	Pervane İtmesi	Denizaltı Direnci
550	74,107566	128,58717
750	202,59871	143,20586

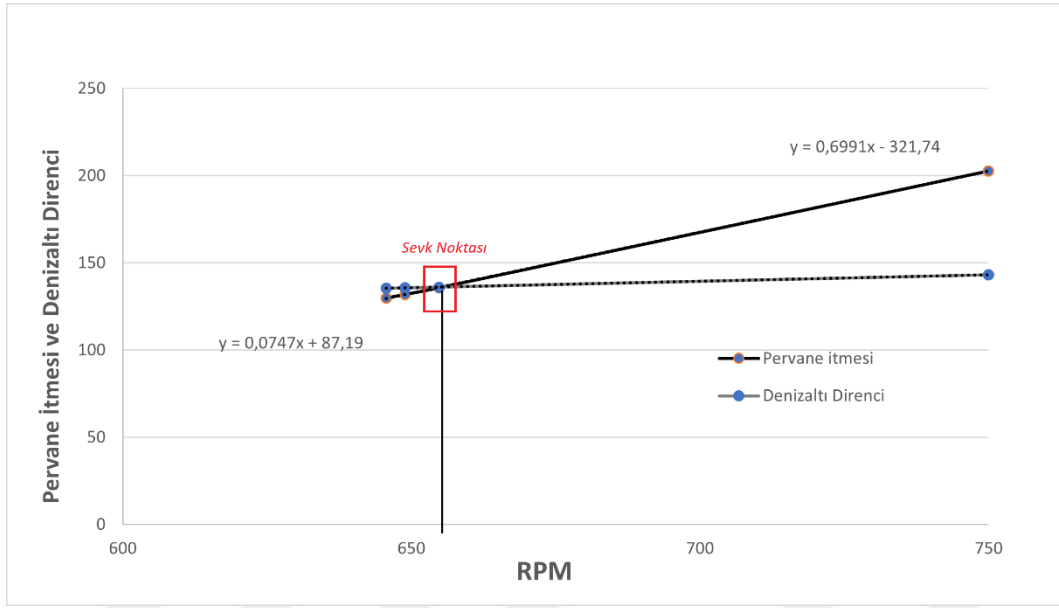
Matematikten bildiğimiz; iki doğrunun denklemlerinin eşitlenmesi ve eşitliğin çözülmesi ile elde edilen değerlerin bize o iki doğrunun kesişim noktasını verdiğini bilmekteyiz. Bunun için önce tabloda gözüken değerlerle grafikler oluşturulmuş ve denklemleri çıkarılmıştır. Ortaya çıkan denklemlerin eşitlenmesi ile kesişim noktası bulunmuştur. Bulunan bu kesişim noktası değeri neyse, o değerde yeniden analiz yapılarak daha yakınsamaya çalışılmıştır. 550 rpm ve 750 rpm değerinde yapılan analizlerin grafiklerindeki denklemlerin kesişim noktasının verdiği rpm değeri 645,6375 tir.



Şekil 6.3 550 ve 750 rpm için oluşan kesişim noktası sonucu 645,6375 rpm

Daha sonra elde edilen 645,6375 değeri için analizler tekrarlanmış ve bir adım daha yakınsama sağlanmıştır. Elde edilen yeni değerde aynı şekilde excelde grafiğe dökülüp yeni denklemlerin kesişim noktası bulunup yeniden analiz yapılmıştır. Bu adımlar tekrarlandıkça asıl olan sevk noktasına yani pervane itmesi ve direncin birbirine eşit olduğu yere gelinmiştir. Aşağıdaki verilen grafikte

tabloda gözükten farklı rpm değerinin denklemleri elde edilerek bulunan kesişim noktasını ifade edilmeye çalışılmıştır. 550 rpm sonucu yakınsamalar sonucunda diğer değerlerden uzak kaldığı için en sonuncu grafiğe dahil edilmemiş ve kalan değerler ile elde edilen en yakın 6,5 knot hızda (3,3436m/s) sonuç 654,797 rpm olmuştur.



Şekil 6.4 Pervaneli AFF-3 için denemeler sonucu sevk noktasının belirlenmesi

Aşağıdaki tabloda yapılan rpm analizlerinin değerleri ve bu değerlere tekabül gelen itme-direnç değerleri verilmektedir. Grafik sonuçlarına göre belirlenen 654,797 rpm sonucu sevk noktası olarak tayin edilmiş ve o değer sevk noktası olduğundan emin olabilmek için yeniden analiz yapılarak teyit edilmiştir.

Tablo 6.2 AFF-3 için RPM değeri yaklaşımları ve sevk noktasının belirlenmesi

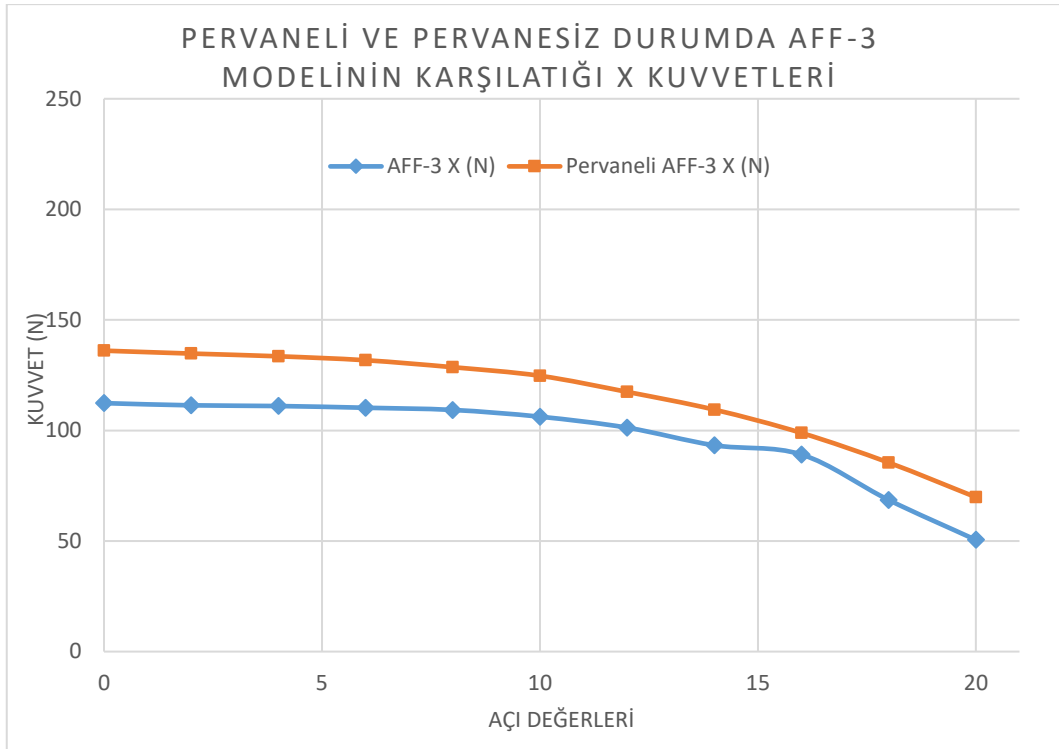
RPM	Pervane İtmesi	Denizaltı Direnci
550	74,107566	128,58717
645,6375	129,84219	135,41728
648,89	131,9217	135,65475
654,797	135,73997	136,08629
750	202,59871	143,20586

654,797 rpm değerinin sevk noktası olarak belirlenmesinin ardından statik drift durumunda kendinden tahrikli olarak ilerleyen AFF-3 denizaltı geometrisinin karşılaştığı kuvvetleri anlayabilmek adına diğer açılı analizlere geçilmiştir. Önceki kısımlarda olduğu gibi, bu kısımda da zamandan bağımsız olarak 0 derecen 20 dereceye kadar ikişer derece aralıklarla yapılan HAD analizleri tamamlanmıştır. Aşağıda verilen tabloda X ve Y yönlerinde pervanenin ve denizaltının karşılaştığı kuvvetler, Z eksen etrafında ise oluşan yaw hareketinden kaynaklı dönme momenti değerleri verilmiştir.

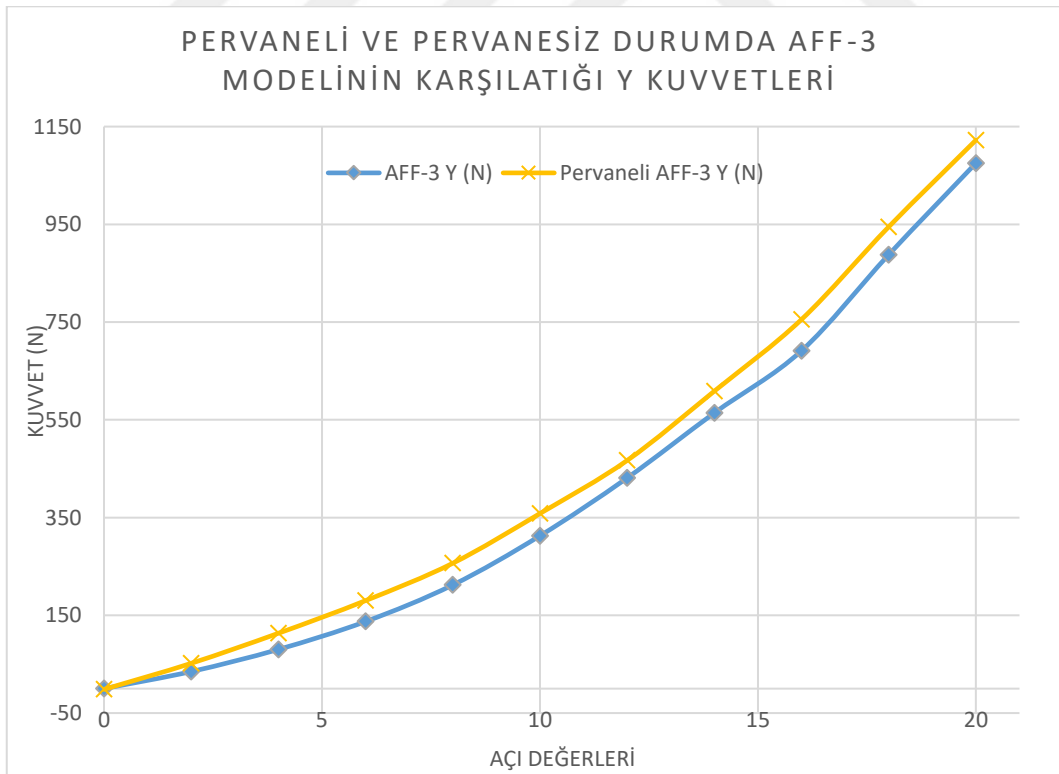
Tablo 6.3 AFF-3 için 6,5 knot hızda pervaneli analizlerden oluşan kuvvet ve moment değerleri

654,7970 RPM için	X eksenı boyunca oluşan kuvvetler (N)		Y eksenı boyunca oluşan kuvvetler (N)		Z eksenı etrafında oluşan momentler (Nm)
Dereceler	Pervane itmesi	AFF-3 direnci	Pervane itmesi	AFF-3 direnci	Moment(Z)
0°	135,73997	-136,08629	-10,73173	-1,46934	2,34544
2°	134,65087	-134,77066	-7,32804	51,81943	140,11678
4°	129,93457	-133,54001	-4,70440	113,31157	280,81618
6°	124,56263	-131,76198	-2,83042	180,12987	417,11073
8°	118,31883	-128,60600	-2,21466	256,53745	540,12490
10°	107,84668	-124,72508	-2,38874	358,33530	643,83617
12°	96,029376	-117,44374	-2,82067	466,88394	730,65810
14°	89,286997	-109,41902	-2,81800	608,73991	809,84007
16°	86,137618	-98,87718	-2,71689	755,34635	873,74966
18°	83,432555	-85,46170	-2,00501	944,79781	929,15168
20°	80,491167	-69,82819	-1,22994	1122,1512	998,67696

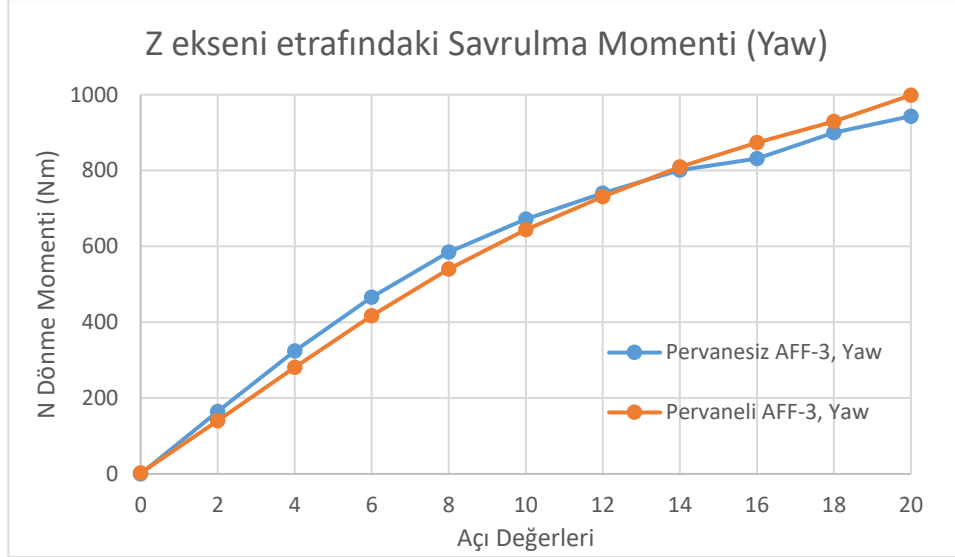
Açı değeri arttıkça tabloda X doğrultusunda üretilen pervane itmesinin ve AFF-3 direncinin azaldığı, Y doğrultusunda üretilen pervane itmesinde önemli bir değışiklik meydana gelmediğı ancak açı değeri ile denizaltı modeline yandan gelen enine (transverse) kuvvet değeri lerinin (sway forces) doğru orantılı bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Z eksenı etrafında oluşan N momenti (yaw) ise beklendiğı gibi açı değeri arttıkça artış göstermiştir. Bu kısımdaki değeri lerin kıyasını yapabileceğimiz benzer bir çalışma olmadığından sadece elde edilebilen veriler paylaşılmıştır. Aşağıdaki grafikte pervaneli olarak sevk edilen AFF-3 modelinin statik drift durumunda karşılaştığı kuvvet değeri leriyle, pervanesiz olarak akım gönderildiğı zaman elde edilen surge ve sway kuvvet değeri leri karşılaştırılmaktadır.



Şekil 6.5 AFF-3 için 6,5 knot hızda Pervaneli ve Pervanesiz durumda karşılaştığı X kuvvet değerlerinin (surge) karşılaştırılması



Şekil 6.6 AFF-3 için 6,5 knot hızda Pervaneli ve Pervanesiz durumda karşılaştığı Y kuvvet değerlerinin (sway) karşılaştırılması

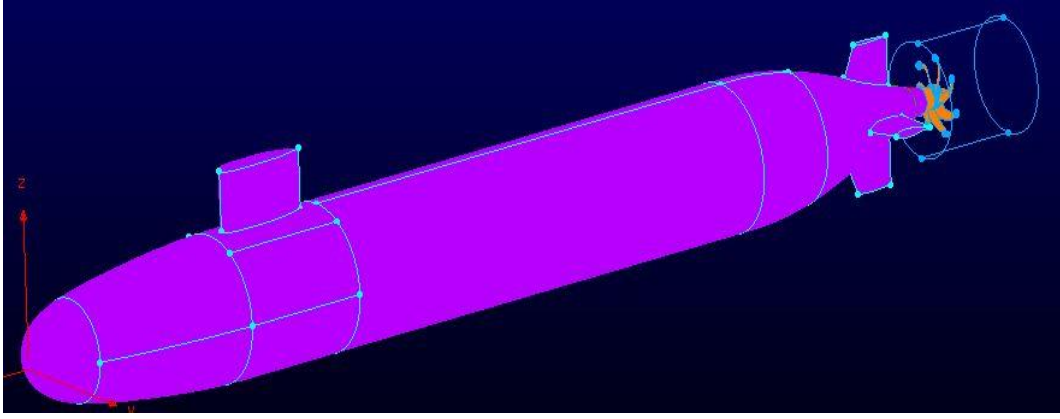


Şekil 6.7 AFF-3 için 6,5 knot hızda Pervaneli ve Pervanesiz durumda oluşan savrulma momentlerinin (yaw) karşılaştırılması

6.3 Kendinden tahrikli AFF-8 Konfigürasyonu

Bir önceki bölümde AFF-3 konfigürasyonu ile ilgili anlatılan çalışmalar, bu bölümde AFF-8 konfigürasyonu için anlatılacaktır. DARPA Suboff AFF-8 konfigürasyonu ta takıntılı olan konfigürasyon olarak bilinmektedir. Çıplak gövde, dört adet kış dümen ve yelken kısmından oluşmaktadır. Önceki bölümlerde pervanesiz olarak statik sürüklenme analizleri yapılan bu modele bu bölümde de 0° - 20° arası, yine ikişer derece aralıklarla, statik drift durumunda karşılaşılan kuvvetleri ve momentleri tanımlayabilmek için dönme hareketinin tanımlanabildiği E1619 model pervanesi eklenmiştir.

Pervaneli AFF-3 kısmında ilk olarak nasıl sevk noktası belirlendiyse, aynı şekilde AFF-8 ile yapılan pervaneli analizlerde de ilk olarak sevk noktası tayin edilmeye çalışılmıştır. Yine değişken yüklemeli yöntem kullanılarak 6,5 knot hız için 550 ve 750 rpm değerlerinde için analizler koşturulmuştur. Amacımız sevk noktasını belirleyebilmek olduğu için denemeler yapılarak yakınsamaya çalışılmıştır. Yapılan denemelerin sahip olduğu rpm değerleri, 0 rpm değerinde pervanenin ürettiği itki kuvveti ve 0 rpm değerinde sevk edilirken ki denizaltı modelinin karşılaştığı direnç değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir. Aşağıda verilen şekil 6.8 de pervanenin takıldığı AFF-8 modeli gözükmemektedir.



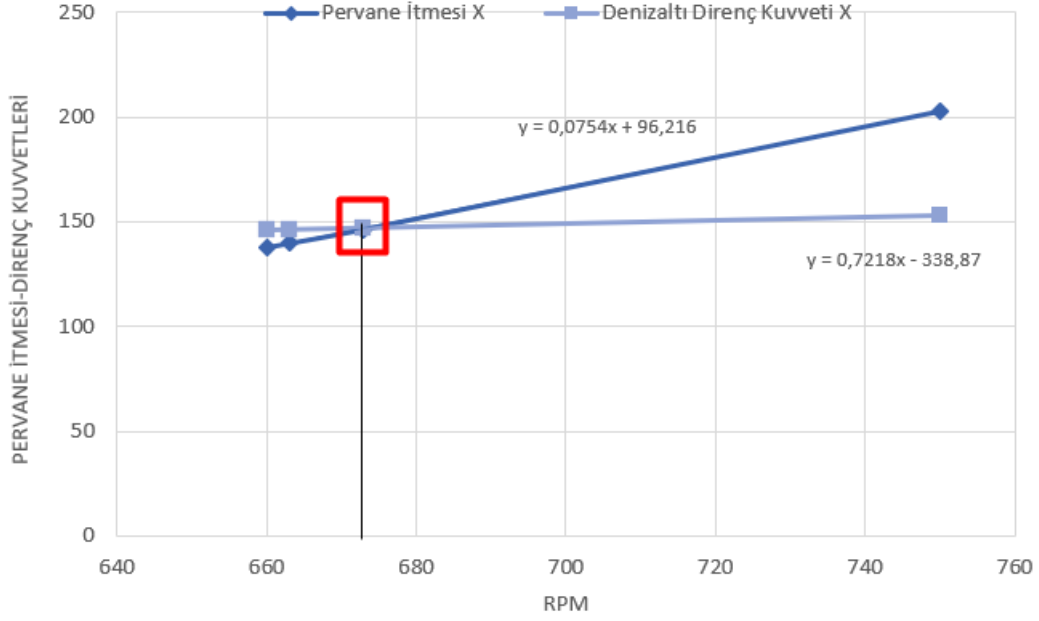
Şekil 6.8 Pervaneli AFF-8 modelinin Pointwiseda görünümü

Pervaneli model ile sevk noktasını bulabilmek kullandığımız değişken yüklemeli yöntem gereği yapılan rpm denemeleri aşağıdaki tablo 6.4'te verilmiştir.

Tablo 6.4 AFF-8 için RPM değeri yaklaşımları ve sevk noktasının belirlenmesi

RPM	Pervane İtmesi X	Denizaltı Direnç Kuvveti X
300	37,893	122,5549
550	73,5133	138,23018
660,0655	137,86183	146,0067
663,1225	139,84935	146,21644
672,835	146,28422	146,92364
750	202,5223	152,77038

Bu farklı rpm değerlerinde yapılan analizlerde herhangi bir açı değişimi olmamıştır. 0 derece de denizaltı dönmesi olmadan sadece pervaneye rotasyonel dönme hareketi ve yönü tanımlanarak zamandan bağımsız şekilde analizler tamamlanmıştır. Yakınsamalar sonucu 672,835 devirde pervane dönüyorken oluşan itme kuvveti ve direnç kuvveti eşit çıktığı için bu değer DARPA Suboff AFF-8 konfigürasyonu için sevk noktası olarak tayin edilmiştir. Aşağıdaki verilen grafikte elde edilen doğrular ve o doğruların gözükmemektedir. Tabloda gözükken 300 ve 550 rpm değerleri doğrusallığı bozduğu ve dışta kaldığı için aşağıdaki grafiğe dahil edilmemiştir.

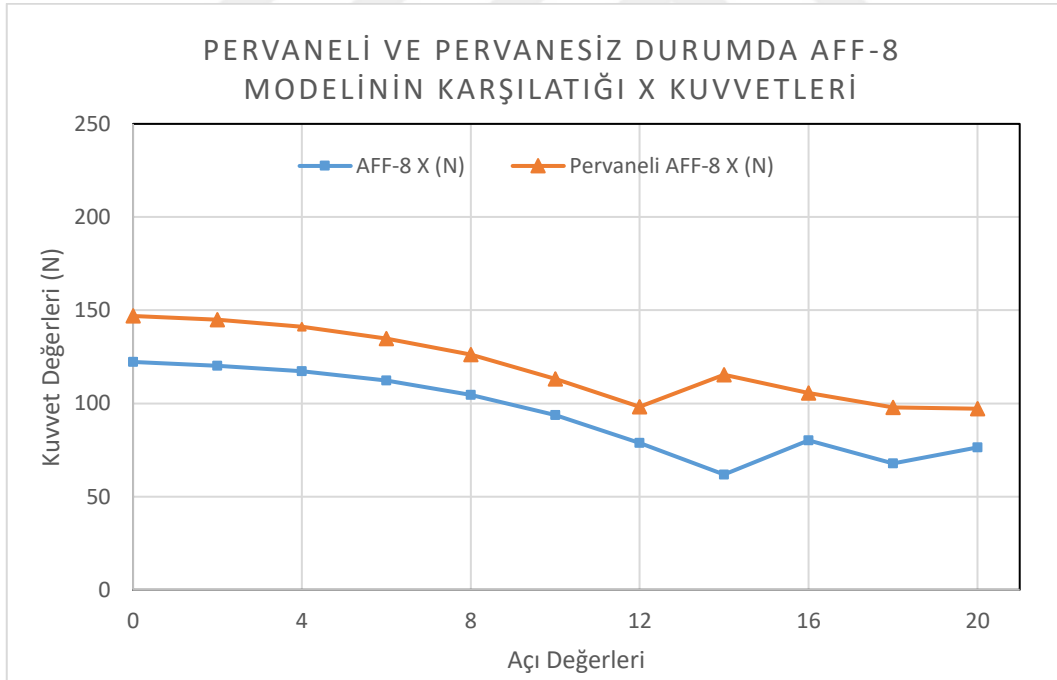


Şekil 6.9 Pervaneli AFF-8 modeli için 6,5 knot hızda denemeler sonucu sevk noktasının belirlenmesi

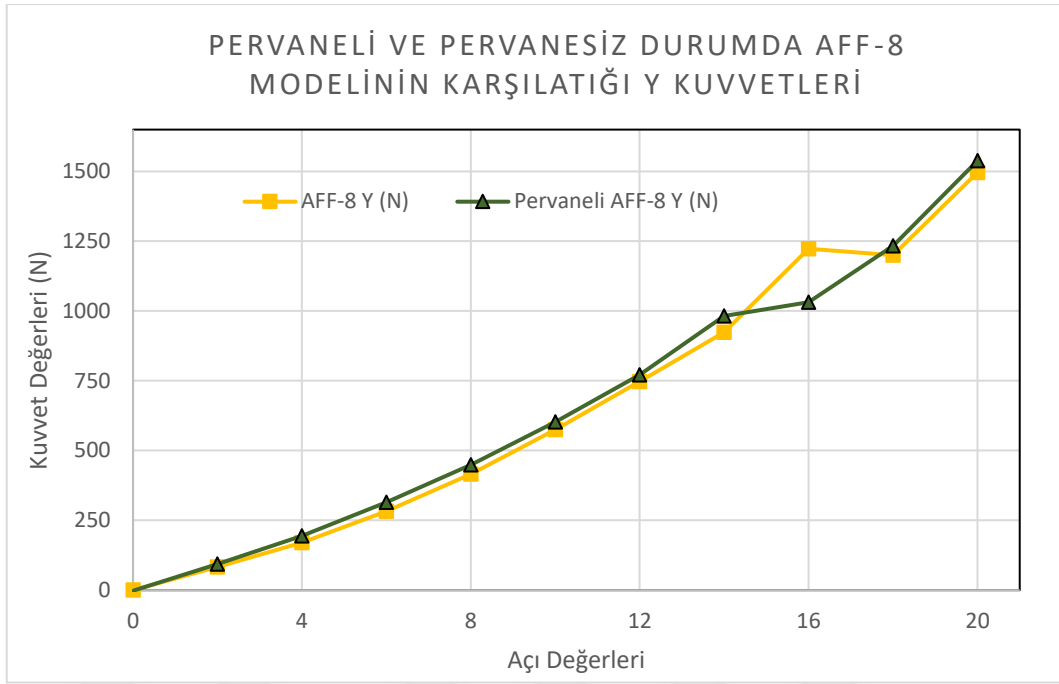
Yukarıdaki grafikte kırmızı kare içine alınan kesişim noktasının değeri iki denklemin eşitliğinde yararlanılarak 672,835 olarak bulunmuştur. Sevk noktası olarak alınan bu değerden emin olabilmek adına yeniden analiz yapılmış ve itme kuvveti ile direnç kuvvetinin eşitliği görüldükten sonra statik drift açılarına geçilmesine karar verilmiştir. Statik drift durumunda kendisini sevk edebilen pervaneli DARPA Suboff AFF-8 denizaltı geometrisinin karşılaştığı kuvvetleri ve momentleri görebilmek için önceki kısımlarda olduğu gibi, bu kısımda da zamandan bağımsız olarak 0 derecen 20 dereceye kadar ikişer derece aralıklarla yapılan HAD analizleri yapılmıştır. Aşağıda verilen tabloda X ve Y yönlerinde pervanenin ve denizaltının karşılaştığı sırasıyla surge ve sway kuvvetleri, Z ekseninde etrafında ise dönme hareketinden kaynaklı oluşan N yaw momenti değerleri elde edilmiştir.

Tablo 6.5 AFF-8 için 6,5 knot hızda pervaneli analizlerden oluşan kuvvet ve moment değerleri

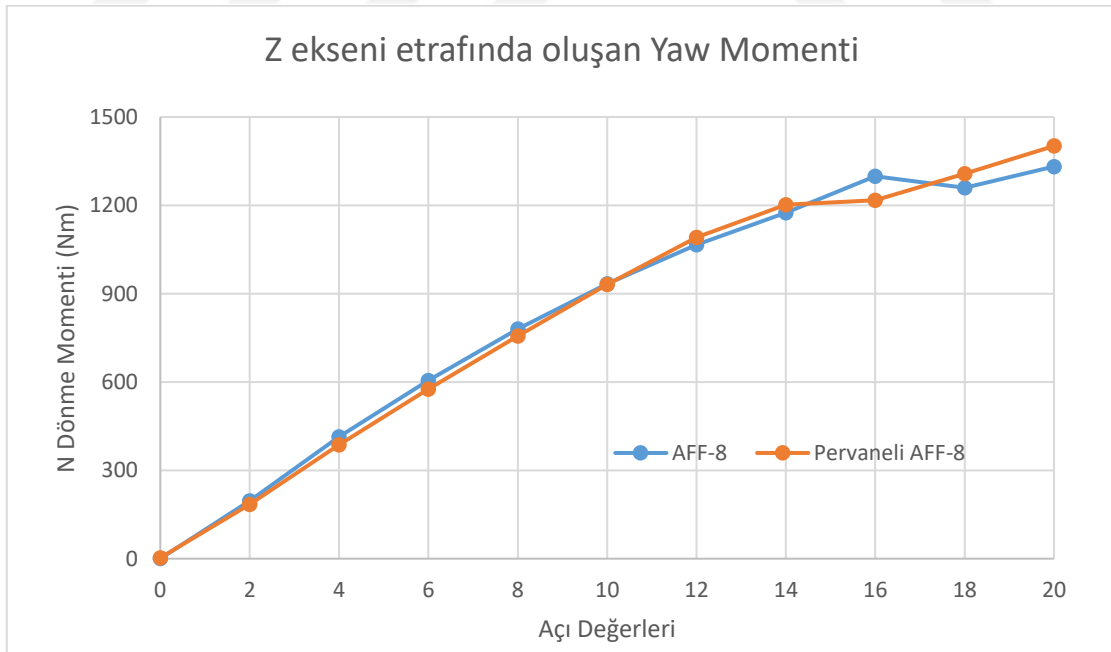
672,835 RPM için	X eksenı boyunca oluşan kuvvetler (N)		Y eksenı boyunca oluşan kuvvetler (N)		Z eksenı etrafında oluşan momentler (Nm)
Dereceler	Pervane itmesi	AFF-8direnci	Pervane itmesi	AFF-8 direnci	Moment(Z)
0°	146,28422	-146,92364	-11,254361	-2,0485	2,9591987
2°	148,61622	-144,93718	-8,680369	93,55125	184,91972
4°	143,71187	-141,11379	-5,3564	194,68038	386,83403
6°	138,65033	-134,86015	-3,02195	314,99084	575,78298
8°	132,32501	-126,20432	-1,2555	448,5951	756,21298
10°	121,86661	-113,14601	-0,1990	602,51553	931,72783
12°	107,95700	-98,287154	0,2687	771,39606	1091,5713
14°	99,21287	-115,44788	0,27091	982,60069	1201,973
16°	98,13816	-105,67982	-3,425	1031,5625	1217,7573
18°	93,95720	-97,913462	0,2222	1233,826	1307,5664
20°	85,24710	-97,1659	2,3689	1538,377	1401,6873



Şekil 6.10 AFF-8 için Pervaneli ve Pervanesiz durumda karşılaştığı Surge kuvvet değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 6.11 AFF-8 için Pervaneli ve Pervanesiz durumda karşılaştığı Sway kuvvet değerlerinin karşılaştırılması



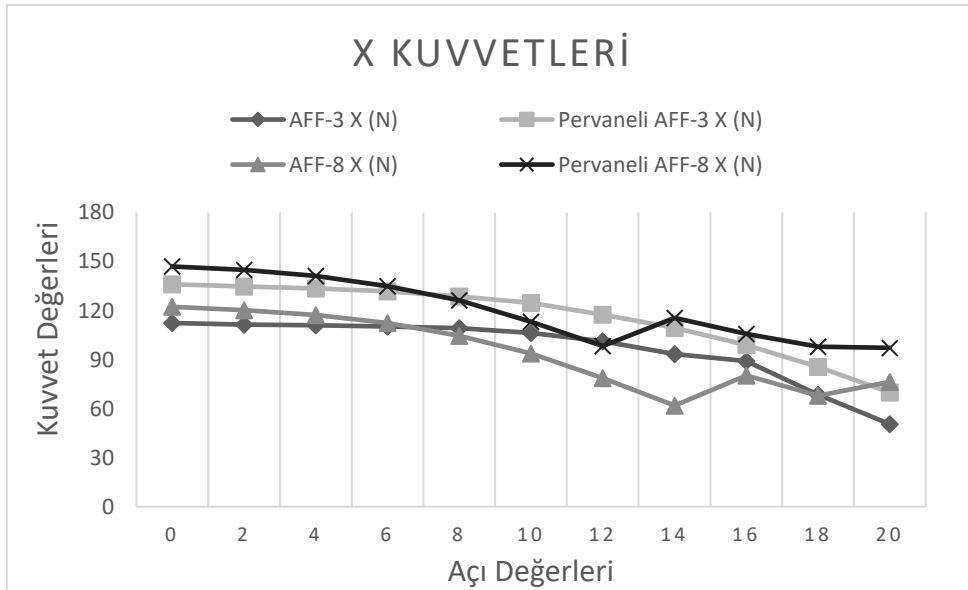
Şekil 6.12 AFF-8 için Pervaneli ve Pervanesiz durumda oluşan Yaw momentleri

6.4 Pervaneli ve Pervanesiz Tüm Sonuçların Kıyası

Bu bölümde şimdiye kadar yapılan tüm HAD analizlerinin sonuçları birlikte paylaşılmıştır. Statik drift durumunda yatay düzlemde ortaya çıkan X, Y yönündeki direnç kuvvetleri (sırasıyla surge ve sway) ve Z eksenini etrafında N (yaw) moment değerleri AFF-3 ve AFF-8 için hem pervaneli hem pervanesiz şekilde tablo ve grafikler halinde verilmiştir.

Tablo 6.6 X yönünde oluşan tüm kuvvet değerleri

X	AFF-3	Pervaneli AFF-3	AFF-8	Pervaneli AFF-8
Sürüklenme Açısı	X (N)	X (N)	X (N)	X (N)
0°	112,357	136,08629	122,2606	146,92364
2°	111,3641	134,77066	120,1928	144,93718
4°	111,0517	133,54001	117,3173	141,11379
6°	110,268	131,76198	112,2694	134,86015
8°	109,2802	128,606	104,6136	126,20432
10°	106,225	124,72508	93,79957	113,14601
12°	101,2737	117,44374	78,7258	98,287154
14°	93,2992	109,41902	61,86462	115,44788
16°	89,12992	98,877181	80,24121	105,67982
18°	68,562	85,461702	67,86323	97,913462
20°	50,51286	69,828192	76,37374	97,1659

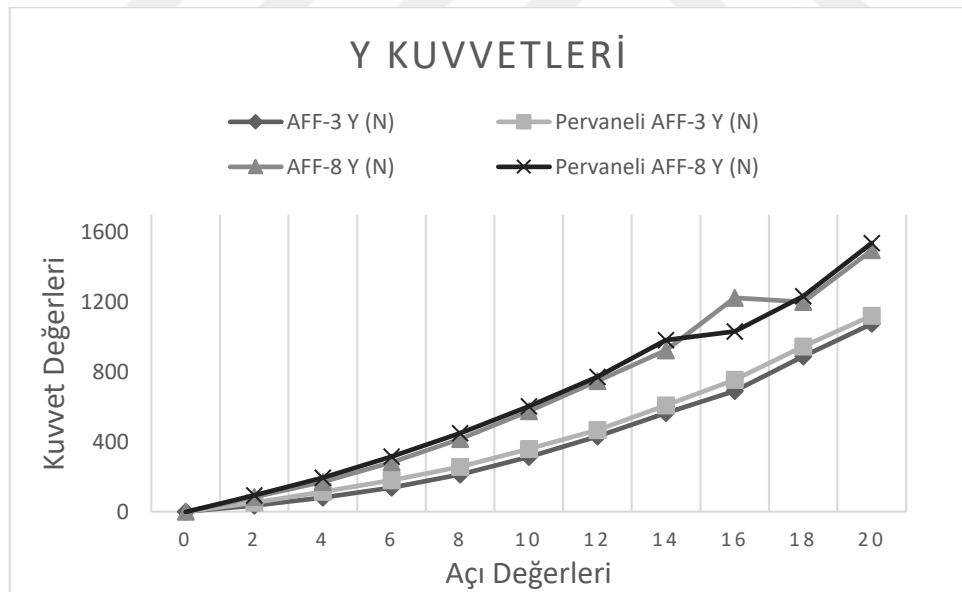


Şekil 6.13 X doğrultusunda oluşan tüm kuvvet değerleri

Aşağıda verilen tablo 6.7 ve şekil 6.13 de Y yönünde oluşan kuvvet değerleri pervaneli ve pervanesiz durum için verilmiştir.

Tablo 6.7 Y yönünde oluşan tüm kuvvet değerleri

Y	AFF-3	Pervaneli AFF-3	AFF-8	Pervaneli AFF-8
Sürüklenme Açısı	Y (N)	Y (N)	Y (N)	Y (N)
0°	0,0664	-1,469338	0,07076	-2,0485
2°	34,9619	51,819426	83,65574	93,55125
4°	80,2729	113,31157	170,72788	194,68038
6°	137,3062	180,12987	282,8382	314,99084
8°	212,1415	256,53745	415,85953	448,5951
10°	312,6999	358,3353	574,71143	602,51553
12°	431,0689	466,88394	746,74898	771,39606
14°	564,1457	608,73991	924,1195	982,60069
16°	691,3075	755,34635	1223,293	1031,5625
18°	887,8658	944,79781	1200,209	1233,826
20°	1075,115	1122,1512	1496,4421	1538,377

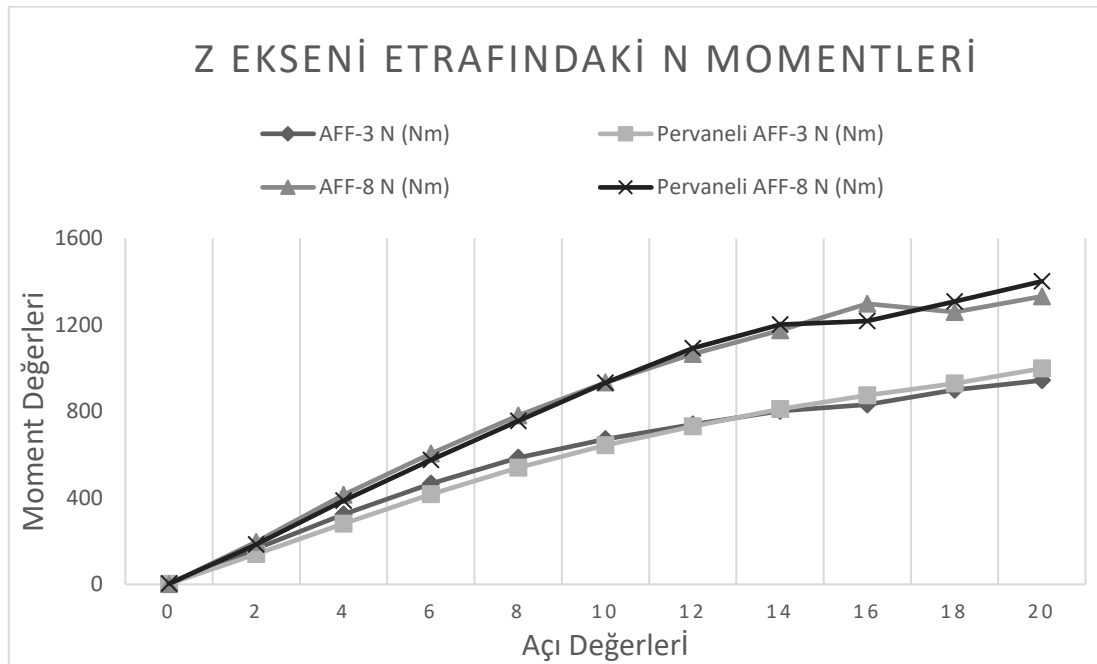


Şekil 6.14 Y doğrultusunda oluşan tüm direnç değerleri

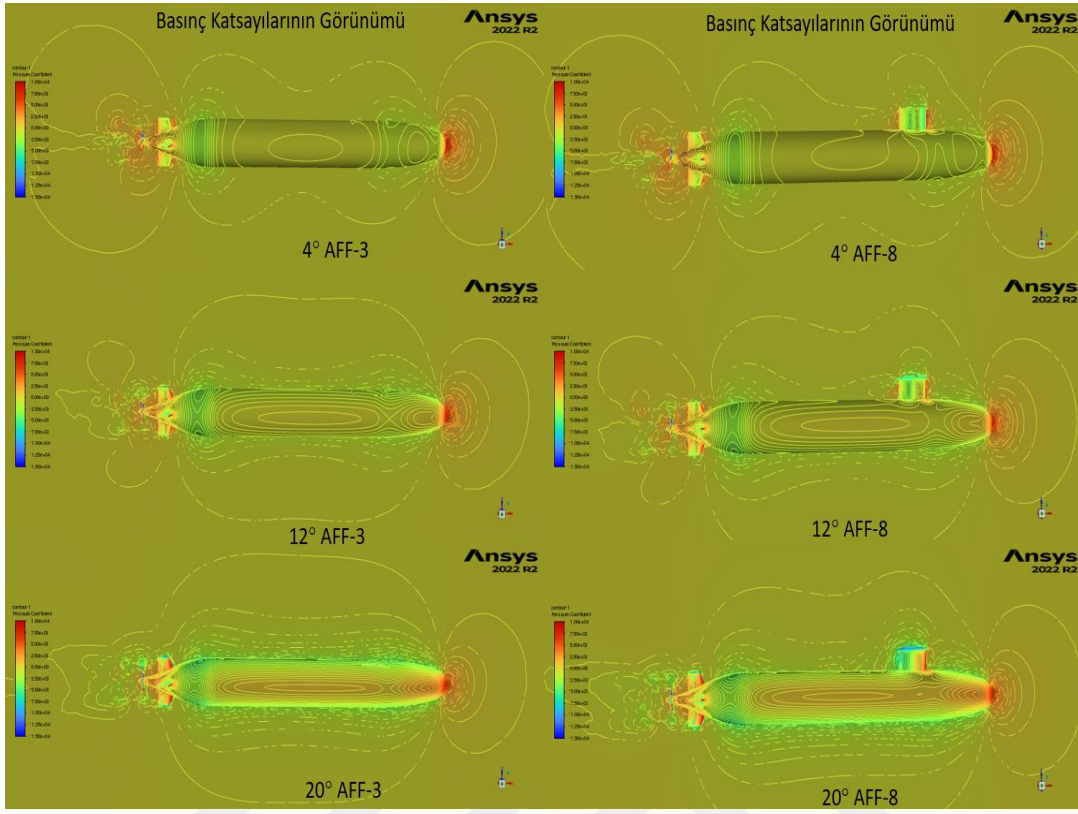
Aşağıda verilen tablo 6.8 ve şekil 6.14 de Z eksenini etrafında oluşan moment değerleri pervaneli ve pervanesiz durumda iki konfigürasyonda da verilmiştir.

Tablo 6.8 Z eksenini etrafında oluşan tüm moment değerleri

N	AFF-3	Pervaneli AFF-3	AFF-8	Pervaneli AFF-8
Sürüklenme Açısı	N (Nm)	N (Nm)	N (Nm)	N (Nm)
0°	0,1113	2,3454396	0,362539	2,9591987
2°	164,245	140,11678	196,3978	184,91972
4°	323,744	280,81618	413,5749	386,83403
6°	466,014	417,11073	605,2724	575,78298
8°	585,313	540,1249	780,2729	756,21298
10°	672,107	643,83617	933,666	931,72783
12°	740,192	730,6581	1065,714	1091,5713
14°	801,405	809,84007	1174,605	1201,973
16°	831,377	873,74966	1298,316	1217,7573
18°	899,707	929,15168	1259,518	1307,5664
20°	943,302	998,67696	1331,8	1401,6873



Şekil 6.15 Z eksenini etrafında oluşan tüm moment değerleri



Şekil 6.16: Pervaneli AFF-3 ve AFF-8 modellerinin farklı açılardaki durumunu gösteren basınç katsayıları

Bu yüksek lisans tezi kapsamında Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yöntemlerinden yararlanılarak, bilimsel çalışmalarda sıklıkla kullanılan ve kullanılması tavsiye edilen temsili denizaltı modelleri arasından DARPA Suboff jenerik denizaltı modelinin yatay düzlemde iki farklı konfigürasyonun farklı açılarda statik sürüklenme durumu altında karşılaştığı manevra kuvvetleri ve momentleri belirlenmeye çalışılmıştır. Denizaltı modelinin iki farklı konfigürasyonundan kasıt; sadece gövde ve dört adet kış dümenden oluşan AFF-3 konfigürasyonu ve sadece gövde, yelken ve dört kış dümenden oluşan tam ekli konfigürasyon olan AFF-8 konfigürasyonu kullanılmıştır. Bu bahsedilen iki farklı konfigürasyonun hem pervaneli hem de pervanesiz olmak üzere HAD analizleri zamandan bağımsız olarak, sonlu hacimler yöntemi kullanılarak koşturulmuştur. Elde edilen değerler toplamda dört farklı şekilde tasnif edilmiştir.

Başlangıçta her HAD analizi çalışmasında olduğu gibi ağdan bağımsızlık (mesh independence) çalışması yapılmıştır. Ağdan bağımsızlık çalışması için üç farklı durumda; sık, orta ve seyrek ağ yoğunluklarında küçük açılarda (0-2-4-6 dereceler) HAD analizleri koşturulmuştur. Daha sonra elde edilen sonuçlar SNAME 1950'nin önerilerine göre boyutsuz hale getirilmiştir. Boyutsuz hale getirmenin amacı var olan verilerle kıyaslayabilmek içindir. Yapılan HAD analizlerinin literatürde var olan deneysel sonuçlar ile doğrulanması yapılmış ve orta ağ yoğunluğunun seçilmesine karar verilmiştir.

Orta sıklıktaki ağ yoğunluğunun (medium mesh) seçiminin ardından AFF-3 modeli ile HAD analizlerine daha büyük açılarda (6^0 den 20^0 dereceye kadar, ikişer derece aralıklarla) devam edilmiştir. Analizlerden elde edilen sonuçların doğruluğu literatürde 18 dereceye kadar ulaşılabilen boyutsuz deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. 18 dereceye kadar olan sonuçların iyi bir uyum içinde olduğu görülmüş ve 20 derece içinde analiz sonucu eklenmiştir. Ancak 20 derecenin doğrulamasının yapılabileceği bir veriye ulaşılamadığı için haliyle kıyası yoktur ama grafiklerin devamı şeklinde doğru olduğu öngörülmektedir. Yapılan HAD analizlerinin sonuçları ve literatürde bulunabilen

deneysel verilerin karşılaştırmalarının yapılmasıyla, bu çalışmada kullanılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemlerinin etkinliğinin ve doğruluğunun yüksek düzeyde iyi bir uyum içerisinde olduğu gösterilmiştir.

Daha sonra aynı analizler AFF-8 konfigürasyonu için yapılmıştır. Bu çalışma, ilk olarak literatürde daha önce herhangi bir deneysel manevra kuvvetleri verisi bulunmayan AFF-8 tam takınlı konfigürasyonun manevra kuvvetlerini ve momentlerini belirlemeyi amaçlamıştır. Bunun için tıpkı AFF-3 modeline uygulandığı gibi aynı analizler 0 dereceden 20 dereceye kadar, ikişer derece aralıklarla tekrarlanarak devam etmiştir. Elde edilen tüm kuvvet ve moment değerleri kaydedilmiştir. Bu değerlerin kıyasının yapılabileceği sadece bir çalışmaya rastlanılmıştır. Bu çalışmada iki viskoz akış çözücü kullanarak ve 0° ve 18° sürüklenme açıları için DARPA Suboff AFF-8 konfigürasyonunun manevra kuvvetlerini ve momentlerini tahmin etmeye çalışmışlar ve boyutsuz sonucunu paylaşmışlardır [48]. Böylece bizim çalışmamızda AFF-8 için sadece 18 derecedeki sürüklenme durumu için karşılaştırma yapılabilmektedir.

Daha sonra ise çalışmanın diğer kısmını oluşturan statik sürüklenme durumunda kendinden tahrikli modellerin incelenmesine geçilmiştir. Bu sebeple 0° den 20° dereceye kadar, ikişer derece aralıklarla, statik sürüklenme durumunda, HAD analizleri yapılan AFF-3 ve AFF-8 konfigürasyonlarına, kendilerini sevk edebilmeleri için yedi kanatlı, yüksek çalıklıklı temsili denizaltı pervanesi olan INSEAN kurumunca tasarlanan E1619 pervanesi eklenmiştir. Bu pervanenin eklenmesi ile beraber her iki model içinde sevk noktası belirlenmiştir.

Sevk noktalarını belirleyebilmek için değişken yüklemeli HAD analizleri yapılarak yakınsama yapılmaya çalışılmıştır. Normalde ITTC 1978 yöntemine göre sevk noktasının tahmini için pervane, denizaltı ve pervaneli denizaltının ayrı ayrı hesaplarının yapılması gerekmektedir. Ancak pervaneye ait verilere önceki çalışmalardan [27] ulaşabildiğimizden dolayı ilk başta pervane açık su karakteristiklerinin tahmini üzerinde çalışılmamıştır. Farklı pervane devirlerinde analizler yapılabilmesi için pervaneye dönme hareketi MRF (Moving Reference Frame) yöntemi ile verilmiştir. Çeşitli sayıda, sabit hızda (3,3436 m/s) denemeler yapıldıktan sonra pervane itmesinin ve denizaltı modellerine ait direnç verilerinin eşit olduğu nokta olan sevk noktası tayin edilmiştir.

Belirlenen sevk noktalarındaki rpm değerinde farklı açılarda kendinden tahrikli olarak statik drift durumunda denizaltı modellerinin maruz kaldığı kuvvet ve moment değerleri, pervanesiz kısımda olduğu gibi 0 derecen 20 dereceye kadar ikişer derece aralıklarla elde edilmiş olup tablolar ve grafiklerle önceki kısımlarda sunulmuştur. Bu anlatılanları yapabilmek için, önce Pointwise adı verilen programda ağ oluşturma işlemi yapılmış ve ticari yazılım olan ANSYS Fluent programında hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmadan özetle statik sürüklenme açısı arttıkça sway kuvveti diye adlandırılan yanal kuvvet değerlerinin her durumda arttığı, yaw momenti olarak bilinen N savrulma momentinin arttığı ancak surge kuvveti olarak adlandırılan x eksenini doğrultusundaki kuvvetlerin azaldığı görülebilmektedir. Ancak AFF-8 konfigürasyonu için yelkeninden kaynaklandığı düşünülen, pervanesiz AFF-8 modelinde 14^0 den 16^0 ye ve 18^0 den 20^0 ye geçerken, pervaneli AFF-8 konfigürasyonunda ise 12^0 den 14^0 ye geçerken x eksenini doğrultusundaki direnç değerinin arttığı ve sonra azalmaya başladığı görülmüştür. Y eksenini doğrultusunda oluşan kuvvetlerde ve Z eksenini etrafında meydana gelen savrulma momentleri arasında ise pervanesiz AFF-8 modeli için her açı arttığında artış söz konusu iken 16^0 den 18^0 ye geçişte küçük bir azalma fark edilmiştir. Bunlara karşın AFF-3 modelinde her açı değerinde beklenen doğrultuda düzenli değişim (X değerlerinde $\downarrow$, Y ve N değerlerinde $\uparrow$) olmuştur. Genel olarak her model için pervaneli olma durumunda karşılaşılan kuvvet ve moment değerleri daha fazla olmaktadır.

Bu çalışmayla beraber 18 dereceye kadar deneysel sonuçlarına ulaşılabilen DARPA Suboff AFF-3 konfigürasyonunun statik sürüklenme durumu için 20 dereceye kadar olan analizlerinin sonuçları sunulmuştur. Ayrıca literatürde yeteri kadar kıyas yapılabilecek statik sürüklenme (drift) verisi olmayan DARPA Suboff AFF-8 denizaltı modelinin sonuçları da bundan sonraki bu alanda çalışan araştırmacılara yol gösterebilmesi niyetiyle sunulmuştur. Pervaneleriyle kendinden tahrikli olarak sevk edilebilen AFF-3 ile AFF-8 konfigürasyonlarının statik sürüklenme durumunda karşılaştığı kuvvet ve moment değerleri ile pervanesiz iken karşılaştıkları kuvvet değerleri karşılaştırmalı biçimde tablolar ve grafikler halinde açıklamaları yapılarak bu yüksek lisans tezi kapsamında sunulmuş ve literatüre kazandırılmıştır.

-
- [1] S. Demirsoy, “Osmanlı donanmasında Denizaltılar”, Yedi kıta, 2009, [Çevrimiçi]. Available at: <https://www.edergim.com/yedikita-dergisi/osmanli-donanmasinda-denizaltilar-16.html>.
- [2] P. D. M. Tulum, Vehbî, SÛRNÂME: Sultan Ahmet’in Düşün Kitabı, haz. Prof Dr Mertol Tulum, Kabalcı Yayınevi, İstanbul, 2008, s. 382. .
- [3] Serhat Güvenç, “Serhat Güvenç, ‘Turkey’s Submarine Pionners’, Warship International Fleet Review, AUG/SEPT 2001, s.49.”, .
- [4] “Cyril Field, The Story of the Submarine, W. Hodge Publishing, London, 1908, p. 126.”, .
- [5] E. Mercan, “Osmanlı Bahriyesi’nde İlk Denizaltılar: Abdülhamid ve Abdülmecid The First Turkish Submarines in Ottoman Navy: Abdülhamid and Abdülmecid”, 1886, [Çevrimiçi]. Available at: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/84507>.
- [6] “<https://www.savunmasanayiidergilik.com/tr/HaberDergilik/Turk-denizciliginin-ilk-denizaltilari>”. .
- [7] Y. N. ÇELİK, “TÜRK DENİZALTICILIK TARİHİ”. <http://www.denizalticilarbirligi.com/db.dztarih.htm>.
- [8] E. Malko, “TÜRK BASININDA TRUMAN DOKTRİNİ VE TÜRKİYE ’ YE AMERİKAN YARDIMLARI (1947-1950)”, 2005, [Çevrimiçi]. Available at: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/9879>.
- [9] Ö. F. Sukas, Ö. K. Kınacı, Ş. Bal, Ö. F. Sukas, Ö. K. Kınacı, ve Ş. Bal, “Gemilerin Manevra Performans Tahminleri için Genel Bir Değerlendirme - I”, Gemi ve Deniz Teknol.
- [10] Sabuncu, T. (1985). Gemi Manevraları ve Kontrolü, İ.T.Ü Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi, İstanbul. .
- [11] “Saout, O. (2003). Computation of Hydrodynamic Coefficients and Determination of Dynamic Stability Characteristics of an Underwater Vehicle Including Free Surface Effects (Master’s thesis)”, Florida Atlantic University.
- [12] “Groves, N., Huang, T. and Chang, M., 1989, ‘Geometric Characteristics of DARPA SUBOFF Models (DTRC Model Nos. 5470 and 5471)’, Report No. DTRC/SHD-1298- 01.”
- [13] “Huang T., Liu H. ve Groves N., (1989). ‘Experiments of the DARPA SUBOFF Program’, David Taylor Research Center, Ship Hydromechanics Department, Report Number DTRC/SHD-1298-02.”
- [14] H.-L. Liu ve T. T. Huang, “Liu H.L., and Huang T.T.H., Summary of DARPA Suboff Experimental Program Data, Naval Surface Warfare Center, Carderock Division, Report Number: CRDKNSWC/HD-1298-11, 1998.” .
- [15] “ITTC Manoeuvring Committee. (2014). Final report and recommendations to the 27th ITTC. Proceedings of the 27th International Towing Tank Conference, Copenhagen, Denmark.”

- [16] M. Renilson, "Applied Sciences and Technology Submarine Hydrodynamics". 2015.
- [17] Y. Arıkan, "Podlu sevk sistemlerinin performans analizi ve çevreye olan etkilerinin incelenmesi", 2010.
- [18] F. Di Felice, M. Felli, M. Liefvendahl, ve U. Svennberg, "Numerical and experimental analysis of the wake behavior of a generic submarine propeller", Symp. Mar. Propulsors, sayı June, s. 7, 2009.
- [19] O. Kırıkbas, O. K. Kinaci, ve S. Bal, "Su Altı Araçlarının Manevra Karakteristiklerinin Değerlendirilmesi-II: Akışkan Sınırlarının Etkileri", 2021.
- [20] O. Kırıkbas, O. K. Kinaci, ve S. Bal, "Sualtı araçlarının manevra karakteristiklerinin değerlendirilmesi - I: Manevra analizlerinde kullanılan yaklaşımlar", 2021.
- [21] "Tyagi, A. ve Sen, D. (2006). Calculation of transverse hydrodynamic coefficients using computational fluid dynamic approach. Ocean Engineering, No. 33, Technical Note, pp. 798-809."
- [22] K. Han vd., "Six-dof cfd simulations of underwater vehicle operating underwater turning maneuvers", J. Mar. Sci. Eng., c. 9, sayı 12, 2021, doi: 10.3390/jmse9121451.
- [23] H. ATİK, "Türbülans modellerinin DARPA SUBOFF statik sürüklenme testi üzerinden incelenmesi", Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Derg., c. 3, ss. 1509–1522, 2021, doi: 10.17341/gazimmfd.748378.
- [24] "Toxopeus S., Atsavapranee P., Wolf E., Daum S., Pattenden R., Widjaja R., Zhang J.T., and Gerber A., Collobrative CFD Exercise for Submarine in a Steady Turn, Proceedings of the ASME 2012, 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engine".
- [25] S. Sezen, A. Dogrul, C. Delen, ve S. Bal, "Investigation of self-propulsion of DARPA Suboff by RANS method", Ocean Engineering, c. 150, Elsevier Ltd, ss. 258–271, Şub. 15, 2018.
- [26] N. Chase ve P. M. Carrica, "Submarine propeller computations and application to self-propulsion of DARPA Suboff", Ocean Eng., c. 60, ss. 68–80, Mar. 2013, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2012.12.029.
- [27] Y. Arıkan Özden, "Denizaltı Kıç Formunun Sayısal Ve Deneysel Olarak İncelenmesi", Yıldız Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi, 2017.
- [28] C. Delen, S. Sezen, ve S. Bal, "Computational Investigation of Self Propulsion Performance of Darpa Suboff Vehicle", Tamap J. Eng., c. 2017, sayı 4, ss. 1–12, 2017.
- [29] M. C. Özden, S. Kurdoğlu, E. Demir, K. Sarıöz, ve Ö. Gören, "A compact motion controller-based planar motion mechanism for captive manoeuvring tests", Ocean Eng., c. 220, sayı May 2020, ss. 1–14, 2021, doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.108195.
- [30] M. C. Özden, "ÇEKME VE TAKİP MODLU MANEVRA DENEY SİSTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE BUNLARIN KIYASLAMALI DOĞRULAMASI", 2021.

- [31] Ö. F. Sukas, Ö. K. Kınacı, Ş. Bal, Ö. F. Sukas, Ö. K. Kınacı, ve Ş. Bal, “Gemilerin Manevra Performans Tahminleri için Genel Bir Değerlendirme - II”, Gemi ve Deniz Teknol.
- [32] E. Kahramanoglu, “Numerical investigation of the scale effect on the horizontal maneuvering derivatives of an underwater vehicle”, Ocean Eng., c. 272, sayı February, s. 113883, 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.113883.
- [33] “Sarıöz, K., Kükner, A. ve Alkan, A.D. (2008). Gemi Mühendisliği El Kitabı. Bölüm 7, Manevra”, .
- [34] “Yasukawa, H. ve Yoshimura, Y. (2014). Roll-Coupling Effect on Ship Maneuverability. Ship Technology Research, Vol. 61, No.1, pp. 16–32.”, .
- [35] F. Cakıcı ve E. Kahramanoglu, “Bir Balıkçı Gemisi Formu için Dönme ve Zig-Zag Testi Simülasyonu”, sayı June 2017.
- [36] “Sname 1950.PDF”. 1950.
- [37] B. J. Racine ve E. G. Paterson, “CFD-Based Method for Simulation of Marine-Vehicle Maneuvering”, sayı June, ss. 6–9, 2005.
- [38] Abkowitz, M. A. (1964). Lectures on ship hydrodynamics – Steering and maneuvering (Hy-5). Hydro & Aerodynamic Laboratory. .
- [39] K. Kim vd., “The Maneuvering Committee: final report and recommendations to the 25th ITTC”, Proc. 25th ITTC, c. I, ss. 143–208, 2008, [Çevrimiçi]. Available at: <http://www.riam.kyushu-u.ac.jp/ship/ittc/>.
- [40] J. Jiang, Y. Shi, ve G. Pan, “Computation of Hydrodynamic Coefficients of Portable Autonomous Underwater Vehicle”, Apcom Iscm, ss. 1–6, 2013.
- [41] “Yasukawa, H. ve Yoshimura, Y. (2014). Roll-Coupling Effect on Ship Maneuverability. Ship Technology Research, Vol. 61, No.1, pp. 16–32.”
- [42] “Żelazny, K. (2014). Approximate Method of Calculating Forces on Rudder During Ship Sailing on a Shipping Route. International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. Vol. 8, No.3, pp. 459–464.”
- [43] D. B. C. D.A. Jones, J. L. B. and I.B. Brayshaw, ve B. Anderson, The Calculation of Hydrodynamic Coefficients for Underwater Vehicles. 2002.
- [44] N. Chase, Simulations of the DARPA Suboff submarine including self-propulsion with the E1619 propeller. 2012.
- [45] “Menter, F. R. (1993). ‘Zonal Two Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows’, AIAA Paper 93-2906”.
- [46] H. Öztürk, “Denizali Direnç Hesabında Ölçek Etkilerinin HAD ile İncelenmesi”, YTÜ Lisans Tezi, 2019.
- [47] ITTC Resistance Committee, “Uncertainty analysis in CFD Verification and validation methodology and procedures”, ITTC - Recomm. Proced. Guidel., ss. 1–13, 2017.
- [48] “Vaz, G., Toxopeus, S. and Holmes, S., 2010, ‘Calculation of Manoeuvring Forces on Submarines Using Two Viscous-Flow Solvers’, OMAE 2010, Shanghai, China.”

- [49] S. Duman, "Investigation of The Turning Performance Of A Surface Combatant With Urans", İstanbul Technical University, Master Thesis, 2016.



TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makaleler

1. “Numerical Investigation of the Maneuvering Forces of Different DARPA Suboff Configurations for Static Drift Condition” named article has been accepted for publication from Journal of ETA Maritime Science

