

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**DARPA SUBOFF FORMUNUN LİNEER HİDRODİNAMİK
KATSAYILARI ÜZERİNDEKİ ÖLÇEK ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Furkan KIYÇAK

Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2023

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**DARPA SUBOFF FORMUNUN LİNEER HİDRODİNAMİK
KATSAYILARI ÜZERİNDEKİ ÖLÇEK ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Furkan KIYÇAK
(508201109)**

Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Ömer Kemal KINACI

HAZİRAN 2023

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 508201109 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Furkan KIYÇAK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “DARPA SUBOFF FORMUNUN LİNEER HİDRODİNAMİK KATSAYILARI ÜZERİNDEKİ ÖLÇEK ETKİSİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Ömer Kemal KINACI**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Kadir SARIÖZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ferdi ÇAKICI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 16 Mayıs 2023
Savunma Tarihi : 12 Haziran 2023





Aileme ve dostlarıma,



ÖNSÖZ

Tez süresince bana güvenen, yardım ve desteklerini esirgemeyen, su altı hidrodinamiği konusunda merakımı görüp bilgisiyle çalışmama ışık tutan tez danışmanım saygıdeğer hocam Prof. Dr. Ömer Kemal KINACI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tez aşamasında, üzerimdeki yükleri ellerinden geldiğince hafifletmeye çalışan, bana ve verdiğim kararlara sonuna kadar güvenen sevgili aileme, bu yorucu süreçte hep yanımda olduklarını hissettiğim değerli arkadaşlarıma, yüksek lisansıma desteklerinden dolayı Kuasar Marin ailesine teşekkür etmek isterim.

Son olarak Şubat ayı içerisinde gerçekleşen trajik depremde hayatlarını kaybeden çok sayıda vatandaşımıza Allah'tan rahmet, sağ kalıp çeşitli zorluklar içerisinde yaşantılarını devam ettirmeye çalışan depremzedelere en içten duygularıyla sevgi ve saygılarımı sunar, hayatlarında kolaylıklar dilerim.

Haziran 2023

Furkan KIYÇAK
Gemi İnşa Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Su Altı Araçları	2
1.2 Denizaltılar	3
1.2.1 Holland	3
1.2.2 U-35 sınıfı ve tip XXI U-botları	4
1.2.3 Albacore	5
1.2.4 Skipjack	6
1.3 Jenerik Bir Denizaltı Formu: DARPA Suboff	7
1.4 Tezin Amacı ve Kapsamı	8
2. SU ALTI HİDRODİNAMİĞİ	11
2.1 Su Altı Araçlarının Manevrası	13
2.2 Hidrodinamik Katsayıların Hesaplanmasında Kullanılan Yöntemler	14
2.2.1 Ampirik yöntemler	14
2.2.2 Deneyssel yöntemler	15
2.2.2.1 Statik sürüklenme deneyleri	16
2.2.2.2 Döner kol mekanizması	17
2.2.3 Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD)	19
3. MATEMATİK MODEL	23
3.1 Koordinat Sistemi	23
3.2 Hareket Denklemleri	24
3.2.1 Abkowitz modeli	25
3.2.2 Manevra modelleme grubu (MMG) modeli	26
3.3 RANS ve Türbülans Denklemleri	28
3.4 Boyutsuzlaştırma	30
3.5 Eğri Çizdirme Metodu	30
4. SONUÇLAR	33
4.1 Statik Sürüklenme Simülasyonları	33
4.1.1 Katı modelin oluşturulması	33
4.1.2 Ağ örgüsünün kurulumu	33
4.1.3 Problemin kurulumu	35
4.1.4 Hidrodinamik katsayıların elde edilme örneği	36
4.1.5 Sonuçların görüntülenmesi	37

4.1.6 Hidrodinamik katsayılar	39
4.2 Ağdan Bağımsızlık Çalışması	40
4.3 Safi Savrulma Simülasyonları	42
4.3.1 Katı modelin oluşturulması	42
4.3.2 Ağ örgüsünün kurulumu	42
4.3.3 Problemin kurulumu.....	43
4.3.4 Hidrodinamik katsayıların elde edilme örneği	45
4.3.5 Sonuçların görüntülenmesi.....	45
4.3.6 Hidrodinamik katsayılar	46
5. DEĞERLENDİRME.....	49
KAYNAKLAR.....	53
ÖZGEÇMİŞ.....	59



KISALTMALAR

AUV	: Autonomous Underwater Vehicle
CFD	: Computational Fluid Dynamics
DARPA	: Defense Advanced Research Projects Agency
DES	: Detached Eddy Simulation
DNS	: Direct Numerical Simulation
DOF	: Degrees of Freedom
EFD	: Experimental Fluid Dynamics
FVM	: Finite Volume Method
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
IMO	: International Maritime Organization
ITTC	: International Towing Tank Conference
LCB	: Longitudinal Center of Bouyancy
LES	: Large Eddy Simulation
MMG	: Maneuvering Modeling Group
RANS	: Reynolds Averaged Navier Stokes
ROV	: Remotely Operated Underwater Vehicle
VCB	: Vertical Center of Bouyancy



SEMBOLLER

$\ddot{x}_G$	: x eksenindeki ivme
$\ddot{y}_G$	: y eksenindeki ivme
$N_{\dot{r}}$	: N momentinin $\dot{r}$ 'ye göre ek su kütlesi katsayısı
$N_{\dot{v}}$	: N momentinin $\dot{v}$ 'ye göre ek su kütlesi katsayısı
$Y_{\dot{r}}$	: Y kuvvetinin $\dot{r}$ 'ye göre ek su kütlesi katsayısı
$Y_{\dot{v}}$	: Y kuvvetinin $\dot{v}$ 'ye göre ek su kütlesi katsayısı
$\dot{r}$	: Açısal savrulma ivmesi
D	: Denizaltı çapı
Fr	: Froude sayısı
I_z	: Savrulma eylemsizlik momenti
L_{pp}	: Denizaltı dikeyler arası boyu
m	: Denizaltı kütlesi
m_x	: Denizaltının x yönünde ek su kütlesi
N	: Savrulma momenti
N_H	: Gövdeye z eksenini etrafında binen savrulma momenti
N_r	: N momentinin r hızına göre 1.derece türev katsayısı
N_r'	: N momentinin r hızına göre 1.derece boyutsuz türev katsayısı
N_{rrr}	: N momentinin r hızına göre 3.derece türev katsayısı
N_v	: N momentinin v hızına göre 1.derece türev katsayısı
N_v'	: N momentinin v hızına göre 1.derece boyutsuz türev katsayısı
N_{vvv}	: N momentinin v hızına göre 3.derece türev katsayısı
r	: Açısal savrulma hızı
r'_{max}	: Savrulma oranı
Re	: Reynolds sayısı
u	: İleri öteleme hızı
U_0	: Denizaltı servis hızı
v	: Yan öteleme hızı
X	: Boyuna öteleme kuvveti
x_G	: Ağırlık merkezi boyuna konumu

X_H	: Gövdeye x ekseninde binen boyuna öteleme kuvveti
Y	: Yan öteleme kuvveti
Y_H	: Gövdeye y ekseninde binen yan öteleme kuvveti
Y_r	: Y kuvvetinin r hızına göre 1.derece türev katsayısı
Y_r'	: Y kuvvetinin r hızına göre 1.derece boyutsuz türev katsayısı
Y_{rrr}	: Y kuvvetinin r hızına göre 3.derece türev katsayısı
Y_v	: Y kuvvetinin v hızına göre 1.derece türev katsayısı
Y_v'	: Y kuvvetinin v hızına göre 1.derece boyutsuz türev katsayısı
Y_{vvv}	: Y kuvvetinin v hızına göre 3.derece türev katsayısı
ρ	: Su yoğunluğu
ν	: Suyun kinematik viskozitesi
β	: Sürüklenme açısı
ω	: Açısal hız
δ	: Dümen açısı
ψ	: Pruva açısı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : DARPA çıplak gövde formu geometrik özellikleri.....	8
Çizelge 3.1 : Boyutsuzlaştırma	30
Çizelge 4.1 : Statik sürüklenme analizi durumları.....	36
Çizelge 4.2 : 1.durum için kuvvetler ve momentler	37
Çizelge 4.3 : 1.durum için boyutsuz kuvvetler ve momentler	37
Çizelge 4.4 : Statik sürüklenme ile elde edilen lineer hidrodinamik katsayılar	39
Çizelge 4.5 : Y ve N değerlerinin farklı ağ yoğunluklarında karşılaştırması	41
Çizelge 4.6 : Safi savrulma analizi durumları	44
Çizelge 4.7 : 1.durum için kuvvetler ve momentler	45
Çizelge 4.8 : 1.durum için boyutsuz kuvvetler ve momentler	45
Çizelge 4.9 : Safi savrulma ile elde edilen lineer hidrodinamik katsayılar	47
Çizelge 5.1 : EFD ve HAD sonuçlarının karşılaştırması	51



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Çeşitli ROV ve AUV tipleri.	2
Şekil 1.2 : Holland.	4
Şekil 1.3 : U-35.	4
Şekil 1.4 : U21.	5
Şekil 1.5 : Albacore.	6
Şekil 1.6 : Skipjack.	7
Şekil 1.7 : DARPA Suboff çıplak gövde formu.	7
Şekil 2.1 : Gemi 6 serbestlik derecesi.	12
Şekil 2.2 : Statik sürüklenme deneyi	16
Şekil 2.3 : Çekme tankı mekanizması	17
Şekil 2.4 : Döner kol mekanizması.	18
Şekil 2.5 : HAD ile denizaltı hidrodinamik analizi	19
Şekil 2.6 : HAD ile kısıtlanmış model deneyi	21
Şekil 3.1 : Dünya ve gövde eksen takımları	23
Şekil 4.1 : DARPA takıntısız gövdesi	33
Şekil 4.2 : Akış hacmi görüntüsü.	34
Şekil 4.3 : Cismin etrafındaki ağ örgüsü	34
Şekil 4.4 : Cismin etrafındaki sınır tabaka.	34
Şekil 4.5 : Gövde üzerindeki basınç dağılımı.	38
Şekil 4.6 : Gövde üzerindeki y^+ dağılımı.	38
Şekil 4.7 : Akım hatları.	38
Şekil 4.8 : Statik sürüklenmede $Re-Y_v'$ dağılımı.	39
Şekil 4.9: Statik sürüklenmede $Re-N_v'$ dağılımı.	40
Şekil 4.10 : Ağ yakınsaması	41
Şekil 4.11 : Akış hacmi görüntüsü.	42
Şekil 4.12 : Cismin etrafındaki ağ örgüsü	43
Şekil 4.13 : Cismin etrafındaki sınır tabaka.	43
Şekil 4.14 : Gövde üzerindeki basınç dağılımı.	46
Şekil 4.15 : Gövde üzerindeki y^+ dağılımı.	46
Şekil 4.16 : Akım hatları.	46
Şekil 4.17 : Safi savrulmada $Re-Y_r'$ dağılımı.	47
Şekil 4.18 : Safi savrulmada $Re-N_r'$ dağılımı.	48



DARPA SUBOFF FORMUNUN LİNEER HİDRODİNAMİK KATSAYILARI ÜZERİNDEKİ ÖLÇEK ETKİSİ

ÖZET

Gemiler, kullanılış amaçlarına göre dört farklı ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar açık deniz araçları, yatlar, ticaret gemileri ve askeri gemilerdir. Askeri gemilerin diğer gemilere göre farklı yapıları ve donanım ilkeleri olsa da, askeri gemiler içerisinde denizaltılar, hem üç ana gruba göre hem de diğer askeri gemilere kıyasla oldukça özgün ve spesifik tasarım özelliklerine sahiptir. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin savunma sanayilerine yaptıkları yatırımlar ise, askeri gemiler ile denizaltılar konusundaki çalışmaları beraberinde getirmektedir.

Öte yandan, teknolojinin gelişmesi ile harp gemisi tiplerinde de önemli değişiklikler olmuştur. Eski zamanlarda tercih edilen kalın zırhlı ve tonajı büyük savaş gemileri yerine tonajı daha küçük, vurucu gücü yüksek silahlarla donatılmış ve manevra kabiliyeti yüksek olan gemiler tercih edilmeye başlanmıştır. Teknolojik gelişmelerin bir diğer faydası ise bilgisayar kapasitelerinin artması sonucunda hesaplamalı analizlerin hassasiyetinin artmasıdır. Hidrodinamik dizayn, tasarlanan su aracının görevlerini yerine getirmesinde etkin bir rol oynamaktadır ve bu sebeple söz konusu hassasiyet artışı gemi hidrodinamiği alanında önemli gelişmelere yol açmıştır. Bilindiği üzere, manevra, gemi hidrodinamiği disiplininde önemli bir yer tutmaktadır ve dolayısıyla gemi manevra kabiliyetinin doğru hesaplanması özellikle askeri projelerde seyrüsefer güvenliğinin sağlanması açısından gereklidir. Manevra hesaplarının yapılabilmesi ve geminin gerekli dizayn kriterlerine sahip olup olmadığının tespiti ise hidrodinamik katsayıların doğru bir şekilde hesaplanmasını gerektirmektedir.

Gemi hidrodinamiği analizlerinde ampirik yöntemler, deneysel yöntemler ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kullanılabilir. Askeri projelerde yapılan çalışmalar genelde gizli tutulup toplum ile paylaşılmadığından ampirik yöntemler genellikle kullanışlı değildir. Bu noktada model deneyleri oldukça kullanışlıdır ancak bunun yanında pahalı ve zaman alıcıdır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ise ampirik metodlara göre daha güvenilir, model deneylerine göre ise daha ucuzdur; bu sebeple kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, araştırmacılara özellikle tasarım aşamasında önemli bulgular sağlayıp zamanında önlem alma imkanı sunmaktadır. Böylece dizayn edilecek olan deniz araçları için bir ön fikir sahibi olma imkanı tanımaktadır.

Bir gemiye etki eden hidrodinamik kuvvet ve momentler, Froude ve Reynolds sayılarının fonksiyonlarıdır. Su altına batık cisimler için, uzak kalan serbest su yüzeyi nedeniyle Froude sayısı önemsizdir; bu nedenle, bu kuvvetler yalnızca Reynolds sayısına bağlıdır. Bu çalışmada, literatürde kapsamlı bir şekilde çalışılan ve deneysel sonuçları açık literatürde yayınlanmış 'DARPA' Suboff formu çıplak gövdesi ele alınmıştır. Bu formda manevra türevleri üzerindeki ölçek etkileri Reynolds sayısına göre incelenmiştir. Bu kapsamda denizaltının çıplak gövde formu üzerinde sayısal

alışmalar yapılmıştır. Sayısal analizler, statik sürüklenme ve döner kol deneylerini kapsamaktadır. Bu tez kapsamında, öncelikle, RANS tabanlı HAD aracılığıyla sonlu hacimler yöntemi kullanılarak 12 farklı Reynolds sayısında ve 6 farklı drift açısında statik sürüklenme deneylerinin simülasyonu yapılmıştır. Daha sonrasında ise 12 farklı Reynolds sayısında ve 5 farklı r'_{max} değeriinde döner kol testleri baz alınarak safi savrulma simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Literatürde geçen MMG matematik modeli yardımıyla lineer hidrokinamik katsayılar, Reynolds sayısının bir fonksiyonu olarak logaritmik denklemlerle ifade edilmiş ve geminin model ölçeğine bağımlılığı açıkça gösterilmiştir. Elde edilen bulgular, model deneyi sonuçları ile karşılaştırılmış ve hata oranları belirlenmiştir.

Bu çalışma, bundan sonra DARPA ve benzeri formlar üzerinde yapılacak manevra analizlerinde, elde edilen genelleştirilmiş denklemler yardımıyla doğrudan lineer hidrokinamik katsayıları elde etme olanağı sağlamıştır.



SCALE EFFECT ON THE LINEAR HYDRODYNAMIC COEFFICIENTS OF DARPA SUBOFF

SUMMARY

Ships can be classified into four main categories based on their intended use, namely offshore vessels, yachts, commercial ships, and military vessels. While naval vessels differ from other ships in terms of structure and equipment principles, submarines within the naval category have unique design features that set them apart from both the other main groups of ships and other types of naval vessels.

Developed and developing countries invest heavily in defense industries, leading to extensive research on military ships and submarines. Technological advancements have also brought significant changes to warship types. Instead of heavily armored and high-tonnage warships, smaller ships equipped with powerful weapons and high maneuverability are now preferred.

Although underwater vehicles are standardized on a class basis, they are mostly designed for military purposes, so their geometry is kept secret and not shared with the public. To solve this problem, many organizations have tried to build literature by providing generic geometries reflecting the standard geometric properties of underwater vehicles and paving the way for scientific studies on underwater vehicles in the academic world. In this way, generic forms have become frequently used in scientific studies. An example of this is the DARPA Suboff. Although there are different configurations, ITTC recommended researchers use bare hull (AFF-1) and full-appended (AFF-8) configurations. DARPA has pioneered scientific studies on underwater hydrodynamics and provided the opportunity to compare experimental results with the results obtained as a result of studies using empirical and numerical methods.

It is especially important to determine the maneuver characteristics of submarines operating with limited energy, which affect their warfare capabilities and navigational safety, from the preliminary design stage, for the submarines to fulfill their duties and to maintain the trajectory determined during the mission. A submarine has three modes of operation. These are the water surface operation mode, the snorkel depth operation mode, and the deep water operation mode. The submarine spends most of its operational time submerged in deep water, where it performs its main functions. Therefore, it is aimed to have high maneuverability, especially in deep water operations. To examine the maneuvering performance of the submarine, regardless of its operational status, the hydrodynamic forces and moments that occur due to the motion of the solid body in the fluid and which are seen as derivatives or coefficients in the maneuvering motion equations must be accurately calculated at the preliminary design stage.

The calculation of hydrodynamic coefficients is crucial to meet design criteria, and various methods can be employed to analyze hydrodynamics in the shipbuilding

industry, including empirical methods, model experiments, and computational fluid dynamics (CFD).

In empirical methods, formulations are usually expressed as a function of parameters such as form properties, velocity, and main dimensions. Empirical methods are predictive methods, they are based on experimental-navigation experience and can be used in the preliminary design phase. Empirical methods are a suitable method to observe the effects of the frequently changing form on the hydrodynamic coefficients during the preliminary design phase.

Although empirical methods seem attractive to users who want to perform hydrodynamic analysis with their advantages such as being fast, low cost, practicality and easy to apply, it should be noted that these methods only provide superficial information at the preliminary design stage and their sensitivity is low. If the method is not used within the limits, there is a high probability of obtaining completely erroneous results. There are also empirical formulas for obtaining the maneuvering coefficients in terms of main dimensions, but the results are generally not satisfactory. It is very difficult to use empirical methods when performing hydrodynamic analysis of an underwater vehicle such as a submarine because the studies and test-navigation experiences related to the submarine are generally kept confidential and not shared with the public.

Although it is a known fact that experimental methods are more reliable than other methods and provide detailed information about flow dynamics, they are not always preferred due to constraints such as their high cost, the need for a long time to get results, and the need for a sufficient experience of the personnel who will perform the experiments. Although it is accepted that the experimental methods give the most realistic results, they may include errors made during the setup phase of the experiments, errors caused by measuring devices, or human errors.

In maneuvering problems, captive test methods are used to obtain hydrodynamic coefficients. These methods involve forcing the form at a certain scale to make predetermined movements depending on a motion mechanism to obtain the hydrodynamic forces and moments on the form. By using the hydrodynamic forces and moments obtained as a result of the experiment, the hydrodynamic coefficients are obtained using the mathematical model. Although there are many types of experiments in maneuvering problems, these two types will be mentioned because static drift test and rotating arm mechanism are both widely used and simulated in this thesis.

Static drift tests help calculate the necessary coefficients to estimate the maneuverability of the ship. The most basic experimental method in maneuver analysis is static drift tests and is a time-independent method. As a result of this test, the sway force and yaw moment depending on the linear velocities formed on the form pulled at constant speed at certain drift angles are calculated and thus static maneuvering derivatives are obtained. Static drift tests are carried out in the towing tank. One of the experimental methods used is the rotary arm mechanism, which is a time-independent method that enables the calculation of rotational coefficients. In this experiment, the model is attached to the model using a rotating arm placed from the center of a circle towards the arc of the circle, and rotational motion is made around the circle. As a result of this test, the sway force and yaw moment on the form which is rotated at constant angular velocity and certain rotational diameters are calculated and thus rotational maneuver derivatives are obtained.

The fact that hydrodynamic analyzes based only on empirical methods generally do not seem sufficient and reliable, and experimental methods are expensive and require long setup times, encourage researchers to use numerical methods. Parallel to this, the capabilities of the software used within the scope of CFD are also increasing, and with the advancement of modern CFD techniques, it is believed that the method gives very accurate estimates. These software have also given the academic world the advantage of testing the accuracy of the findings by comparing them with the findings obtained by conducting experiments. Thanks to CFD, researchers can obtain important information, especially during the preliminary design phase, and with the help of this information, an idea about the vehicles planned to be designed can be obtained.

In the scope of CFD, while determining the hydrodynamic coefficients in the maneuvering problems of water vehicles, it includes the simulation of the experimental methods with restricted motion in a computer environment. In addition to being more reliable than empirical formulas and cheaper than model experiments, it is also possible to analyze full-scale Reynolds numbers with CFD. Another advantage of CFD over model experiments is that it can perform the necessary predictions without the support braces required for fixed model experiments.

Obtaining the hydrodynamic coefficients starts with obtaining the hydrodynamic forces and moments on the form in which the experiment is applied using the mechanism in experimental methods, and the hydrodynamic forces and moments on the form in which the simulation is applied in CFD. Then, the hydrodynamic coefficients are calculated with the help of a mathematical model accepted as suitable for experiments or simulation. In the literature, two different methods are generally suggested for the mathematical model to be used for maneuvering problems. These are defined as the Abkowitz model, which is a hydrodynamic coefficient-based model, and the Maneuver Modeling Group model, which is a modular-based model.

The Abkowitz model is based on the third-order Taylor series expansion of hydrodynamic forces and moments. In this model, the water vehicle is considered as a whole, and a non-linear approach is used in the calculation of hydrodynamic forces and moments. The MMG model divides the hydrodynamic forces and moments into three components: the bare hull, rudder, and propeller, and considers the interaction between these three components. In the thesis study, the MMG mathematical model was taken as a basis.

As well known, forces and moments acting on a ship are functions of Froude and Reynolds numbers. As a ship gets larger in size, these two numbers grow, which leads to different flow regimes around the hull. Recently, internal and external factors affecting the hydrodynamic coefficients, which are the expressions of these forces and moments in terms of coefficients, have been the subject of research, and especially the scale effect has become the focus of attention of researchers. In maneuver calculations, the hydrodynamic coefficients are considered constant for model and full ship scales. However, although it is undesirable for the scaled form to affect the results, there is no method developed to get rid of the scale effect.

For submerged bodies, the Froude number is insignificant due to the distant free water surface; therefore, these forces only depend on the Reynolds number. In this study, we consider the benchmark ‘DARPA’ Suboff form, which is extensively studied in the literature, and investigated the scale effects on the hydrodynamic coefficients with respect to the Reynolds number. Numerical studies are carried out on the bare hull form of the submarine. Captive motions of static drift and pure yaw motions are

conducted utilizing the static drift and rotating arm tests via RANS-based CFD. Linear hydrodynamic coefficients are expressed with logarithmic equations as functions of the Reynolds number, explicitly showing the dependency on the ship's model scale.

As a result of the study, although the results in the Y_v' , N_v' , and Y_r' maneuver derivatives are very close to the experimental results, there is a difference between the EFD and HAD and the test result for the N_r' coefficient. N_r is known to be very sensitive to the boat's center of gravity; any small change in this value can be reflected as a large difference in this hydrodynamic coefficient. It is also possible for the deviations to be caused by a geometric problem such as the moment of inertia. However, this study reveals the dependence of the hydrodynamic coefficients on the Reynolds number. Therefore, care should be taken when estimating the exact scale from scale model maneuver tests. Speed variation tests in some mathematical models attempt to compensate for this lack of state-of-the-art technology, but it is believed that using hydrodynamic coefficients as a function of the Reynolds number will improve the accuracy of the maneuver simulations.



1. GİRİŞ

Gemiler, kullanılış amaçlarına göre dört farklı ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar açık deniz araçları, yatlar, ticaret gemileri ve askeri gemilerdir. Askeri gemiler, savaşa katılan veya gerektiğinde savaşan gemilere destek hizmeti sağlayan gemilerdir. Savaşa katılan gemiler muharip sınıfı gemiler, destek hizmetleri sağlayan gemiler ise yardımcı sınıf savaş tekneleri olarak sınıflandırılmaktadır. Harp gemilerinin kullanım amacı ve deplasman tonajına göre uçak gemileri, kruvazörler, destroyerler, fırkateynler, korvetler, hücumbotları, karakol gemileri, mayın gemileri, çıkarma gemileri, sahil güvenlik gemileri, destek gemileri ve denizaltılar gibi birçok çeşidi vardır. Teknolojinin gelişmesi, harp gemisi tiplerinde de önemli değişikliklere sebep olmuştur. Eski zamanlarda tercih edilen kalın zırhlı ve tonajı büyük savaş gemileri yerine tonajı daha küçük, vurucu gücü yüksek silahlarla donatılmış ve manevra kabiliyeti yüksek olan gemiler tercih edilmeye başlanmıştır (Baykal, 2011).

Gemilerin kullanım amacına göre sınıflandırmasında askeri gemiler, diğer üç grup olan açık deniz araçları, yatlar ve ticaret gemilerine göre çok farklı yapıları ve donanım ilkeleri olsa da denizaltılar, daha da genelleştirmek gerekirse çoğunlukla askeri amaçlar için kullanılan su altı araçları, diğer gemilere kıyasla oldukça özgün ve spesifik tasarım özelliklerine sahiptir. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin özellikle bilimsel araştırmalara ve savunma sanayilerine yaptıkları yatırımlar, su altı araçları konusundaki çalışmaları beraberinde getirmektedir.

Öte yandan, bilgisayarların hesaplama kapasitelerinin artması sonucunda hesaplamalı analizlerin hassasiyeti de artmıştır. Bilindiği gibi gemi inşa sektöründe hesaplamalı bilimlerin başında içerdiği yoğun matematik ve fizik altyapısı sebebiyle hidrodinamik gelmektedir. Hidrodinamik, sıkıştırılamaz akışkanlar ile ilgilenen, sıvıların davranışlarını, sıvılara daldırılmış katı cisimlerin sıvılarla olan etkileşimlerini ve sıvılar içerisinde hareket eden katı cisimlere etkiyen kuvvetleri inceleyen bir bilim dalıdır. Su araçlarının tasarımında hidrodinamik etkin bir rol oynamaktadır ve özellikle kısıtlı kaynaklarla görevlerini icra eden su altı araçlarının tasarımı konusunda kritik bir öneme sahiptir (Arslan, 2013).

1.1 Su Altı Araçları

Su altı araçları günümüzde askeri amaçlı, ticari amaçlı, maden araştırmaları, oşinografik araştırmalar, okyanus diplerine döşenen boru hatlarının bakımı, jeofizik ile alakalı incelemeler ve hobi amaçlı kullanılmaktadır (Azarsina, 2009). Deniz ve okyanusların dip yapılarının keşfi için de kullanılan su altı araçları, kontrol yöntemine göre insanlı su altı araçları ve insansız su altı araçları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Sedini ve diğ, 2019).

İnsansız su altı araçları 60 yıldan fazladır kullanılmaktadır ve günden güne geliştirilmektedir. Daha önce, uzaktan manuel olarak kontrol edilen uzaktan kontrollü su altı araçları (ROV) tercih edilirken günümüzde operasyonel hedeflere bağlı olarak otonom su altı araçları (AUV) da tercih edilir hale gelmiştir ve her iki türün de denizcilik sektöründe kullanımı yaygınlaşmaktadır (Zheng ve diğ, 2017). İnsansız su altı araçları hedeflerine bağlı olarak bilgi toplamak amacıyla çeşitli sensörlerle donatılmış ve insanlar için riskli ve ulaşması zor bölgelerde görev yapmaktadırlar (Le ve Hong, 2021). İnsansız su altı araçlarına ait çeşitli tasarımlar Şekil 1.1’de gösterilmektedir.



Şekil 1.1 : Çeşitli ROV ve AUV tipleri (Adegboye ve diğ, 2019).

Öte yandan, su altı araçları söz konusu olduğunda akla ilk olarak denizaltı gelmektedir ve bu tez kapsamında incelenen ve üzerinde çalışılan su altı aracı da denizaltı olduğundan bu konuda da genel bilgilendirme yapılacaktır.

1.2 Denizaltılar

Denizaltılar, birçok mühendislik disiplini içinde barındıran, su üstü araçlarından oldukça farklı tasarım prensiplerine sahip, araştırma, arama-kurtarma, su altı donanımı bakımları ve özellikle I. Dünya Savaşı'ndan itibaren devletler tarafından çoğunlukla askeri amaçlarla kullanılan su altı araçlarıdır.

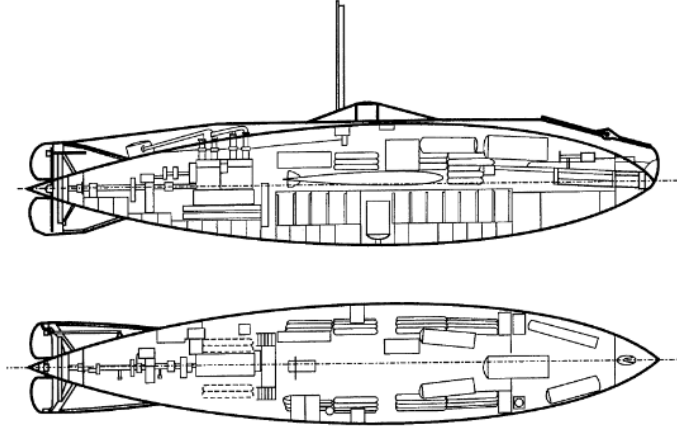
Tanımsal olarak denizaltılar, erzak depolama ve içten yanmalı dizel motorlara hava verme ihtiyaçları için atmosfer seviyesine çıkmaları dışında esas olarak torpido hücumu gerçekleştirme gibi ana işlevleri yerine getirmek amacıyla derin sularda, mayın yerleştirme, özel kuvvet hareketi gibi ikincil işlevleri yerine getirmek amacıyla akışkan sınırlarına yakın çalışan, su yüzeyine yakın çalıştığı durumlarda da gizli kalma, torpidolarla saldırı yapma veya kendisine yapılan saldırılardan kaçmak amacıyla periyodik olarak suya dalan araçlara verilen isimdir. Gövdeleri iki katlıdır ve serbest su yüzeyinden su altına dalacakları zaman bölmelerine su alarak istenen derinlikte hareket edebilme kabiliyetine sahiptirler. Su yüzeyine çıkacakları zaman ise bölmelerdeki suyu boşalarak yüzeyde su üstü teknesi gibi yüzelebilmektedirler. Su yüzeyine yaklaşmaya ihtiyaç duyulan fakat tekne gibi su yüzeyinde yüzmemesi gereken durumlarda ise şnorkel derinliğinde hareket edebilmektedirler. Su yüzeyinde dizel motorlarla, suya dalmış haldeyken çoğunlukla bataryalarla sevk edilirler. Bunun sebebi dizel motorların yüksek gürültüyle çalışması ve su altında aracın hidroakustik imzasını bozarak denizaltının en önemli tasarım özelliği olan gizliliğine zarar vermesidir. Ayrıca nükleer enerji ile sevk edilen ve çok uzun süreler su altında kalabilen tipleri de mevcuttur fakat imal edilmesi hem pahalı olduğundan hem de yüksek teknoloji gerektirdiğinden az sayıda dünya ülkesinde bulunmaktadır (Baykal, 2011). Çağlar boyunca farklı hedefler ışığında su altına inmek için pek çok araç denenmiştir ve bunlardan bazıları denizaltı tasarımında kilometre taşı olmuştur.

1.2.1 Holland

John Philip Holland'ın buluşu olan USS Holland, 1900'de Birleşik Devletler Donanması tarafından resmi olarak kabul edilen ilk denizaltıdır.

Holland tasarımı denizaltı, yüzeyde 63.3 deplasman tonajında suya dalmış haldeyken 74 deplasman tonajında, 16.15 metre uzunluğunda ve 3.12 metre genişliğindeydi. Suya dalmış haldeyken bataryalar ile güç verilen 55 beygir gücü elektrik motoru ve su

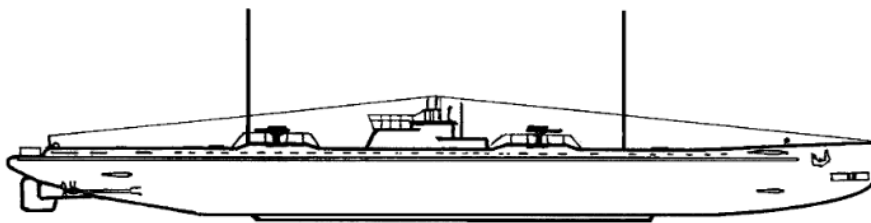
yüzeyinde de bataryaları şarj edebilen 45 beygir gücü benzinli motor kullanılmıştır. Bu aynı zamanda denizcilik sektöründe başarıyla uygulanan ilk hibrit sevk sistemini temsil etmektedir. Kontrol kanatları olan tek pervaneli bu tasarım su altında 5 knot hıza ulaşabilmekteydi ve 1500 deniz mili menzile sahipti. Denizaltı narinlik oranını temsil eden boy-genişlik oranı 5.05 idi (Karwatka, 2010). Holland sınıfı denizaltı Şekil 1.2’de gösterilmektedir.



Şekil 1.2 : Holland (Friedman, 1984).

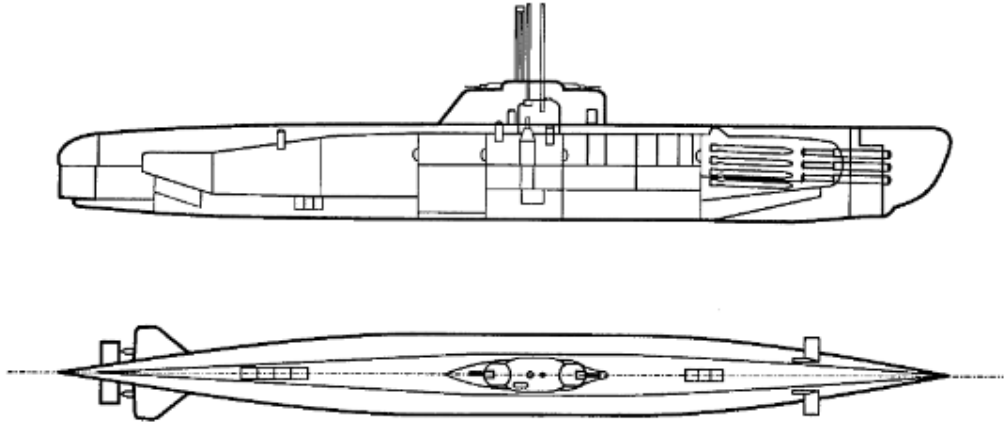
1.2.2 U-35 sınıfı ve tip XXI U-botları

I. Dünya Savaşı, denizaltı tasarımı sürecini tüm dünyada hızlandırmıştır. Almanlar uzun, ağır, uzun menzilli dizel makine ile çalışan U-botlarını iki dünya savaşı boyunca geliştirmişlerdir. Bu denizaltılar, yüzeyde 685 metreküp, suya dalmış haldeyken 844 metreküp deplasman hacminde, 64.7 metre uzunluğunda ve 6.32 metre genişliğinde, su altında 9.7 knot hıza ulaşabilmekte olup genelde yüzey gemisi gibi çalışmışlardır. Narin pruvaları, bir topları, geniş köprüüstü yapıları, çift pervaneleri ve hızlı dalıp çıkma özelliğini sağlamak için sayısız çıkıntıları ve havalandırma delikleri bulunmaktadır. U-35 sınıfı denizaltılarda su altı performansına dikkat edilmemiştir (Joubert, 2004). U-35 sınıfı denizaltı Şekil 1.3’te gösterilmektedir.



Şekil 1.3 : U-35 (Burcher ve Rydill, 1994).

1943 yılında Almanlar, sayısı artan U-bot kayıplarına karşılık olarak denizaltı araştırma merkezi kurup uzun süre batma yeteneğine sahip, yüksek operasyonel hızlı denizaltı tasarlamışlardır. Dizayn edilen tip XXI hidrojen peroksit ve deneysel aşamanın ötesine geçmeyen Walter sevk sistemini kullanarak havadan bağımsız sevk sistemini kullanmayı hedeflemekteydi. Hidrojen peroksit kıtlığı da çıkınca tasarımcılar geliştirilmiş dizel-elektrik sevk sistemini kullanmaya karar vermişlerdir. Gövde, açıkta kalan top kaldırılarak ve kontrol kulesinin gereğinden büyük olması gibi yüksek dirence sebep olacak fiziksel özellikler iyileştirilerek modernize edilmiştir. Bu denizaltılar, yüzeyde 1602 metreküp, suya dalmış haldeyken 1800 metreküp deplasman hacminde, 76.7 metre uzunluğunda ve 6.61 metre genişliğinde olup su altında 17 knot hıza ulaşabilmekteydi. U-35 botlarına göre menzil mesafesi, batarya dayanım süreleri ve dizayn dalış derinlikleri iyileştirildi (Burcher ve Rydill, 1994). Tip XXI sınıfı denizaltı Şekil 1.4'te gösterilmektedir.

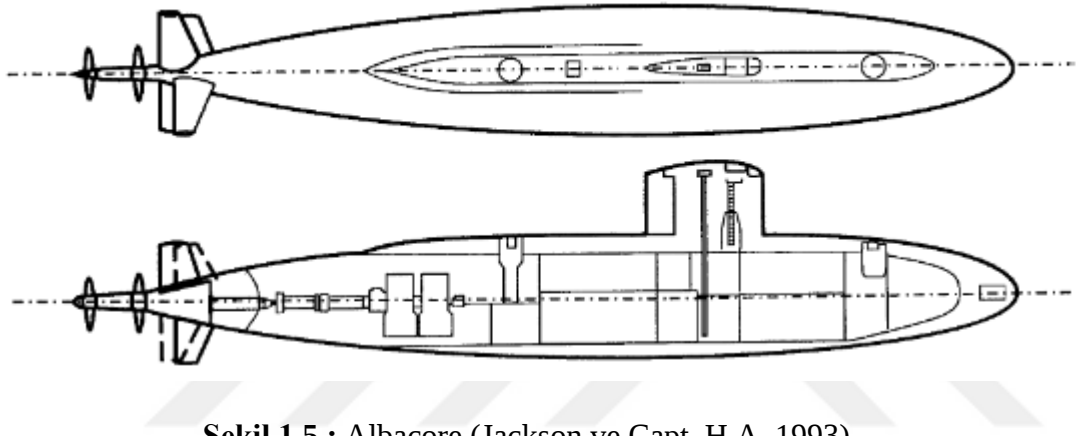


Şekil 1.4 : U21 (Gabler, 1986).

1.2.3 Albacore

II. Dünya Savaşı'nın sona ermesiyle Amerikan donanması tarafından Alman sınıfı tip XXI'lerin bazılarına el koyulmuş ve incelemeye alınmıştır. Alman sınıfı denizaltı teknolojisinin ilerleyişine oldukça şaşırان Amerika, kendi denizaltı formları üzerinde çeşitli iyileştirmeler yapmışlardır. Silahları ve gereksiz gördükleri takıntıları kaldırıp gövdeyi ve kontrol kulesini yeniden düzenlemişler, formun hızında da dikkate değer artışlar yapmışlar, bu sayede direnci düşürüp batarya ömrünü uzatmayı başarmışlardır. Alman yaklaşımlarını kopyalayarak tasarımda daha da ileri giden Amerikan donanması, Albacore'u yaparak damla gövde formu ile akıma tamamen uyumlu ilk

denizaltıyı elde etmişlerdir. Bu denizaltı, yüzeyde 1500 deplasman tonajında suya dalmış haldeyken 1850 deplasman tonajında, 64.16 metre uzunluğunda ve 8.38 metre genişliğinde olup su altında 33 knot hıza ulaşabilmekteydi. Daha büyük ve daha yavaş dönen tek pervane kullanarak sevk verimini artırıp çeşitli iyileştirmelerle dönme çapını minimumda tutmaya çalışmışlar, sonarı ise maksimum etkiyi alabilmek için akıma uyumlu burna yerleştirmişlerdir. Zamanına göre çok gelişmiş olan bu tasarımın, su altı hızı ve manevra kabiliyeti kapsamlı hidrodinamik ve rüzgar tüneli testleri sonucunda gözlenen bulgular ışığında elde edilmiştir (Largess ve Mandelblatt, 1999). Albacore sınıfı denizaltı Şekil 1.5’te gösterilmektedir.

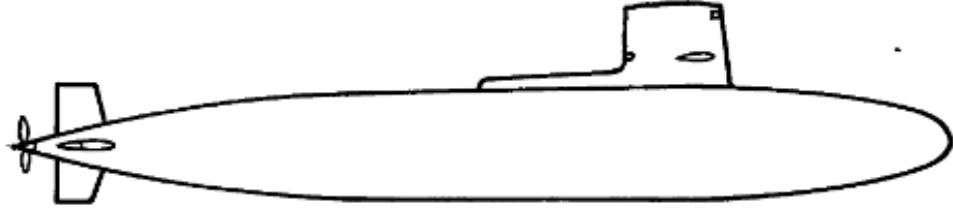


Şekil 1.5 : Albacore (Jackson ve Capt. H.A, 1993).

1.2.4 Skipjack

Shipjack, ilk nükleer denizaltı Nautilus’un geliştirilmesiyle ortaya çıkmış ve denizaltı tasarımında kilometre taşı haline gelmiştir. Nautilus, form tipi ve genel yerleşimi açısından geleneksel bir yapıya sahipti ve asıl amacı basınçlı su reaktörünün denizcilik hizmetine nasıl dayandığını göstermekti. Bu tasarım sonucunda menzil sınırsız hale gelmiştir ve denizaltının yüzeye çıkmaya ve oksijen almaya ihtiyacı kalmamıştır.

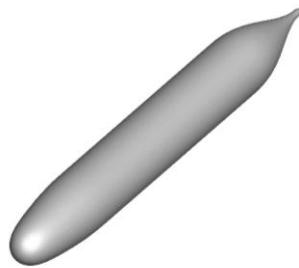
Skipjack, nükleer gücü Albacore’un damla şeklindeki akıma uyumlu formuyla birleştirmiştir. Daha yüksek su altı hızı ve daha iyi manevra kabiliyeti sağlayan Nautilus ile aynı itici güce sahip Skipjack’ın deplasman tonajı, Nautilus’tan önemli ölçüde azdı. Skipjack’ın kendisine iyi denizcilik özellikleri sağlayan oldukça büyük bir yelkeni vardı. Bu denizaltı, yüzeyde 3075 deplasman tonajında suya dalmış haldeyken 3513 deplasman tonajında, 76.75 metre uzunluğunda ve 9.63 metre genişliğindedir ve su altında 33 knot hıza ulaşabilmekteydi (Christley ve Bryan, 2007). Skipjack sınıfı denizaltı Şekil 1.6’da gösterilmektedir.



Şekil 1.6 : Skipjack (Burcher ve Rydill, 1994).

1.3 Jenerik Bir Denizaltı Formu: DARPA Suboff

Form optimizasyonu, özellikle limitli enerji ile görevlerini icra etmeye çalışan su altı araçlarında önemli bir dizayn kriteridir (Moonesun ve diğ, 2015). Bu konu, literatürde uzun süredir hem deneysel hem sayısal yöntemlerle incelenen konular arasında gelmektedir. Bu araçlar, sınıf bazında standartlaşmış olmalarına rağmen çoğunlukla askeri hedeflerle tasarlandıklarından geometrileri gizli tutulup toplum ile paylaşılmamaktadır. Birçok kuruluş, bu problemi çözmek amacıyla su altı araçlarının standart geometrik özelliklerini yansıtan jenerik geometriler sağlayarak bir literatür inşa etmek için çabalamışlar ve akademik dünyaya su altı araçları konusunda yapılacak bilimsel çalışmaların önünü açmışlardır. Bu sayede jenerik formlar bilimsel çalışmalarda sıklıkla kullanılır hale gelmiştir. Bunlara DRDC STR, ONR BODY-1, Joubert BB1/BB2, IHSS ve DARPA Suboff örnek olarak verilebilir (Kırıkbaş ve diğ, 2021b). DARPA çıplak gövde denizaltı formu Şekil 1.7’de gösterilmiştir.



Şekil 1.7 : DARPA Suboff çıplak gövde formu.

DARPA, nükleer enerjiyle çalışan bir saldırı denizaltısı olan SSN sınıfı denizaltı formunun geliştirilmesiyle elde edilmiştir. Eksenel simetrik çıplak gövde formu, sadece yelkenli gövde formu, sadece kontrol yüzeyleri olan gövde formu ve tam donanımlı hallerini içeren çeşitli konfigürasyonları mevcuttur ve her bir konfigürasyonla alakalı literatürde deneysel çalışma mevcuttur (Groves ve diğ, 1989).

Yine de araştırmacılara takıntısız (AFF-1) ve tam takıntılı (AFF-8) olan konfigürasyonlarının kullanılması tavsiye edilmiştir (ITTC Manoeuvring Committee, 2014). DARPA, su altı hidrodinamiği ile alakalı yapılmak istenen bilimsel çalışmalara ön ayak olmuş, ampirik ve sayısal yöntemler kullanarak yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçları karşılaştırma imkanı sağlamıştır. DARPA projesi kapsamında DTRC 5470 ve DTRC 5471 olmak üzere sensor yerleşimleri farklı iki eş model geliştirilmiş olup biri çekme tankı deneylerinde, diğeri rüzgar tüneli deneylerinde kullanılmıştır (Liu ve Huang, 1998). DARPA çıplak gövde formunun geometrik özellikleri Çizelge 1.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 1.1 : DARPA çıplak gövde formu geometrik özellikleri.

Parametre	Değer
Dikeyler Arası Boy (m)	4.261
Tam Boy (m)	4.356
Baş Boyu (m)	1.016
Paralel Orta Gövde Boyu (m)	2.229
Kıç Boyu (m)	1.111
Çap (m)	0.508
LCB (m)	2.008
VCB (m)	0.000
x_G (m)	0.0092
Islak Alan (m ²)	5.919
Deplasman Ağırlığı (kg)	697.482
Deplasman Hacmi (m ³)	0.699
Narinlik oranı (-)	8.575

1.4 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bilindiği gibi, bir gemiye etki eden kuvvetler ve momentler, Froude ve Reynolds sayılarının fonksiyonlarıdır. Geminin boyutu büyüdükçe, bu iki sayı da büyür ve bu da gövde etrafında farklı akış rejimlerine yol açar. Bununla birlikte, manevra hesaplamalarında, hidrodinamik katsayılar, model ve tam gemi ölçekleri için sabit olarak kabul edilmektedir. Suyu batık cisimler için, uzaktaki serbest su yüzeyi nedeniyle Froude sayısı önemsizdir; bu nedenle, bu kuvvetler yalnızca Reynolds sayısına bağlıdır. Su altı araçlarına etkiyen hidrodinamik kuvvetler gövdenin kendisinden kaynaklanmaktadır. Kontrol yüzeylerinin hareketinden kaynaklanan kuvvetler, manevranın yalnızca ilk aşamalarında çok önemlidir ve aracın sonraki

yörüngesi, büyük ölçüde gövde geometrisinden etkilenmektedir (Ray ve diğ, 2009). Bu sebeple, literatürde yoğun olarak çalışılan ve bir referans noktası niteliğindeki 'DARPA' Suboff formunun çıplak gövdesi ele alınmış ve ölçeğin hidrodinamik katsayılar üzerindeki etkileri Reynolds sayısına göre incelenmiştir. Denizaltı üzerinde sayısal çalışmalar yapılmış, RANS tabanlı HAD aracılığıyla statik sürüklenme ve dönen kol testleri kullanılarak statik sürüklenme ve safi savrulma simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Lineer hidrodinamik katsayılar, Reynolds sayısının fonksiyonları olarak logaritmik denklemlerle ifade edilmiş ve geminin model ölçeğine bağımlılığı açıkça gösterilmiştir. Böylece hidrodinamik katsayılar Reynolds sayısının bir fonksiyonu olarak ifade edilebilmektedir (Mostafapour ve diğ, 2018).

Öte yandan, model ölçeğinde elde edilen deneysel ve sayısal sonuçlar daha sonra Uluslararası Çekme Tankı Konferansı (International Towing Tank Conference, kısaca ITTC) tarafından önerilen uygun tahmin prosedürleri kullanılarak tam ölçeğe ekstrapole edilebilmektedir. Ancak, sonuçların model ölçeğinden tam ölçeğe ekstrapolasyonu akış özelliklerinin model ve tam ölçekli su araçları arasında gösterdiği farklılıklardan dolayı hala zordur. Bu farklılıklar, özellikle gemi hidrodinamiği sorunları için denizcilik camiasında yıllardır tartışılan ölçek etkisi olgusunu ortaya koymaktadır (Kahramanoglu, 2023).

Bu çalışmada, birinci bölümde, su altı araçları ve denizaltılarla ilgili genel bilgiler verilmiş, denizaltı tasarımında kilometre taşı niteliği taşıyan tasarımlardan ve bu tez kapsamında üzerinde çalışılan, jenerik bir form olan DARPA Suboff formundan bahsedilmiştir. Daha sonra tezin amacı ve kapsamı açıklanmıştır. İkinci bölümde su altı hidrodinamiği ele alınmış ve su altı hidrodinamiğinde kullanılan ampirik yöntemlerden, deneysel yöntemlerden ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yönteminin teorik altyapısından bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde matematik ve sayısal model tanıtılmış, kullanılacak olan denklem sistemleri tanımlanmıştır. Dördüncü bölümde statik sürüklenme analizi anlatılarak kullanılan sayısal yöntemlerden bahsedilmiştir. Beşinci bölümde safi savrulma analizi kullanılan sayısal yöntemler ve örnek verilerek anlatılmış, daha sonra da elde edilen sonuçlar verilmiştir. Altıncı bölümde kullanılan sayısal ağ örgüsünden bağımsızlık çalışması sunulmuştur. Yedinci bölümde ise çalışma özetlenerek elde edilen sonuçlar yorumlanmış ve değerlendirmeler sunulmuştur.



2. SU ALTI HİDRODİNAMİĞİ

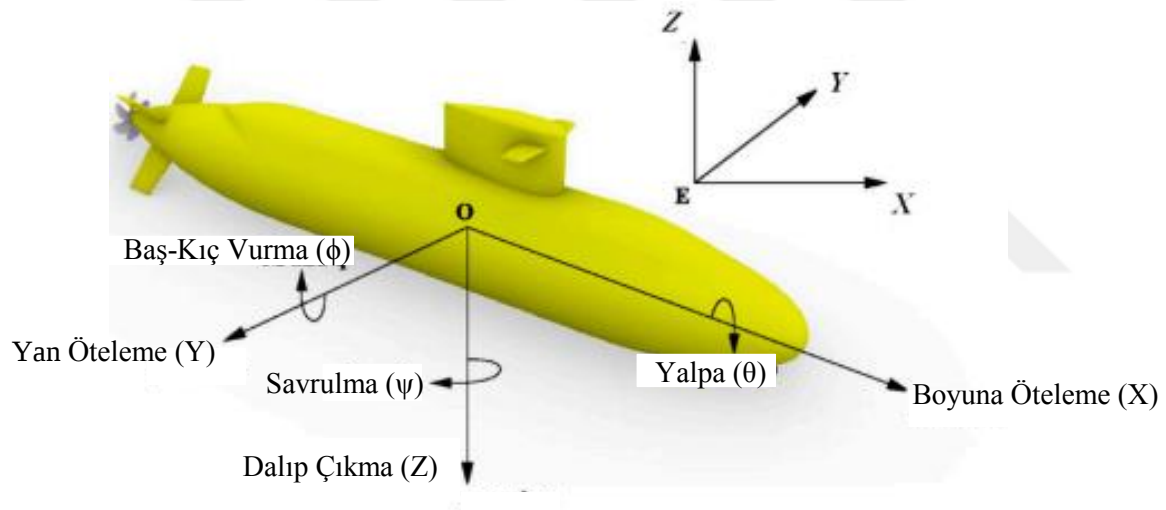
Bir su aracının hidrodinamik performansı genel olarak şu üç başlığa indirgenerek tahmin edilebilir (Bertram, 2011):

- Direnç ve sevk
- Denizcilik
- Manevra

Sakin bir suda hareketsiz duran bir su aracının suya batık yüzeyine hidrostatik basınç kuvvetleri etki etmektedir. Bunların gemi boyuna ve gemi enine doğrultularındaki bileşeni sıfır, düşey bileşeni ise sephiye merkezine etki eden gemi ağırlığına eşit bir kuvvettir. Su aracının akışkan içerisindeki hareketinde ise su altı yüzeyine suyun oluşturduğu dinamik basınçlar etki etmekte olup bu durum su aracı etrafındaki statik basınç dağılımını değiştirmektedir. Bu sebeple, geminin su içerisindeki hareketini engelleyen yüzeye dik bir kuvvet oluşmaktadır. Ayrıca su altı yüzeyi üzerinde akışkanın viskozitesi sebebiyle harekete ters yönde etki eden yüzeye teğet kuvvetler oluşmaktadır. Yüzeye teğet kuvvetler ıslak alana bağlı olan sürtünme direncini, yüzeye dik kuvvetlerin hareket doğrultusundaki yatay bileşenleri ise forma bağlı viskoz basınç direncisi temsil etmektedir. Dalga direnci yüzey gemilerinde baskın bir bileşen olmasına rağmen su altı araçlarında derin sulardaki operasyonlarında ihmal edilmektedir (Moonesun ve diğ., 2016). Sevk, su aracının hareketi sırasında, içinde bulunduğu ortam nedeniyle oluşan direnç kuvvetlerini yenmek üzere belirlenen gücü kullanarak su aracının istenen hareketlerinin sağlanmasına yönelik çalışmaları kapsamaktadır. Zaman içerisinde sevk sistemleri çeşitli değişimlere ve geliştirmelere uğramıştır. Geçmişten günümüze su aracının akışkan içerisindeki hareketi önce insan gücü vasıtasıyla küreklerle, ardından rüzgar kuvveti vasıtasıyla yelkenlerle, daha sonra ise kanatlı çarkla sevk, yandan çarklı sevk, kıçtan çarklı sevk, su jeti, tam batmış jetler, su yüzeyinde çalışan jetler, düşey eksenli pervaneler, Kirsten-Boeing tipi pervaneler, Voith-Schneider tipi pervaneler, klasik pervaneler, tam kavitasyon içinde çalışan pervaneler, nozullu pervaneler ve Z tipi sevk sistemi olmak üzere pek çok sevk sistemi

kullanılmıştır. Günümüzde sevk, çoğunlukla uskur pervaneler vasıtasıyla sağlanmaktadır. Bunların kanat kesitleri üzerinde kaldırma kuvveti oluştuğundan itme sağlamaktadırlar (Baykal ve Dikili, 2002).

Öte yandan, Şekil 2.1’de gösterildiği gibi bir denizaltının 6 serbestlik derecesi bulunmaktadır. Bunlardan yalpa, baş-kıç vurma ve dalıp çıkma dikey düzlem hareketleri içerisinde ve denizcilik alanı kapsamına girmektedir. Yüzen bir cismin dalgalar içerisindeki hareketleri ve bu hareketlerin yüzen cisim üzerindeki etkileri denizcilik alanı altında incelenmektedir. Dalgalar, denizcilik özellikleri kötü olan bir yüzen cismi, denizcilik özellikleri iyi olan bir yüzen cisimden daha fazla etkileyecektir. Genellikle dizayn edilen her tip su aracı için iyi denizcilik kabiliyetleri istense de çoğu durumda su araçları sakin deniz durumu göz önünde bulundurularak tasarlanmaktadır. Dalgalı deniz hali ise ön dizayn aşamasında ihmal edilmektedir.



Şekil 2.1 : Denizaltı 6 serbestlik derecesi (Han ve diğ, 2021).

Boyuna öteleme, yan öteleme ve savrulma ise yatay düzlem hareketleri içerisinde ve manevra alanı kapsamına girmektedir. Tüm su araçları için temel tasarım kriterlerinden biri de yeterli manevra kabiliyetine sahip olmalarıdır. Manevra, kısaca su aracının istenen yönde kontrollü olarak yön değiştirebilmesi ve yön değişimi sonrası sabit bir rota üzerinde yol alabilmesidir. Ayrıca su aracında yeterli ivmelenme, yavaşlama, durma ve torniston kabiliyetleri de mevcut olmalıdır. Gemi manevra kabiliyeti sorunu, hem ticari hem de askeri gemiler için son yıllarda giderek daha fazla dikkate alınmıştır. Tüm açık deniz gemilerine güvenlik sağlamak için minimum manevra kabiliyeti standartlarının IMO tarafından kabul edilmesiyle ticari gemiler için ve donanma gemilerinin manevra kabiliyeti için NATO ekibinin çalışmasıyla askeri

gemiler için sonuçlanmıştır. Böylece, belirli görev gereklilikleriyle başa çıkabilmek için ortak bir manevra yeteneği kazandırmak amacıyla NATO, savaş gemileri için bir dizi ön kriter belirlemiştir (Viviani ve diğ, 2007).

Su aracının manevra kabiliyeti birçok faktöre bağlı olmasına rağmen operatör kabiliyeti, su aracının boyutları, form ve takıntı özellikleri, sevk sistemi özellikleri, su aracının manevra yapmasını sağlayacak donanımın özellikleri ve yeterliliği, seyir yardımcıları, akıntı, dalga, rüzgar, kanal, liman gibi dış etmen koşulları ve deniz trafiği etmenleri örnek olarak gösterilebilir (TMMOB Gemi Mühendisliği El Kitabı, 2019).

2.1 Su Altı Araçlarının Manevrası

Manevra kabiliyetinin bir denizaltı projesi üzerindeki etkileri kısaca dönme kabiliyeti, derin suya dalma kabiliyeti ve kontrol edilebilirlik gibi “operasyonel kabiliyetler”, denizaltının kontrol yüzeyinde gerçekleşebilecek arıza veya su baskını gibi durumlardaki davranışlarını kapsayan “seyrüsefer güvenliği” ve hidrodinamik kuvvetlere dayanan yapısal tasarım ve aktüatörlerin kapasitesini etkileyen “kontrol yüzeyleri ve aktüatör tasarımı” olarak gruplandırılabilir (Petillon ve diğ, 2019). IMO’nun seyrüsefer güvenliğine daha fazla vurgu yapmaya başlamasıyla manevra teorik ve pratik anlamda daha ciddi ilgi görmeye başlamıştır (Janardhanan, 2014). Özellikle limitli enerji ile çalışan denizaltıların harp kabiliyetlerini ve ticari projelerden ziyade askeri projelerde daha kritik bir dizayn parametresi olan seyrüsefer güvenliklerini etkileyen manevra özelliklerinin ön dizayn aşamasından itibaren doğru olarak belirlenmesi, denizaltıların görevlerini yerine getirebilmesi ve görev sırasında belirlenen yörüngenin korunabilmesi açısından önemlidir.

Bir denizaltının üç adet operasyon modu bulunmaktadır. Bunlar su yüzeyinde operasyon modu, şnorkel derinliğinde operasyon modu ve derin suda operasyon modudur. Literatürde denizaltının tüm operasyon modları ile alakalı deneysel ve sayısal çalışmalar mevcut olsa da denizaltının derin suya dalmış haldeki manevrası, diğer iki çalışma moduna göre daha fazla incelenmektedir. Çünkü denizaltı, ana işlevlerini yerine getirdiği operasyon süresinin çoğunluğunu derin suya batmış halde geçirmektedir. Dolayısıyla, özellikle derin sudaki operasyonlarında yüksek manevra özelliklerine sahip olmaları hedeflenmektedir. Örnek olarak derin suda küçük dümen açılarında keskin dönüşler yaparak torpido hücumundan kaçmasının beklenmesi verilebilir (Kırıkbaş ve diğ, 2021a).

Denizaltının operasyon durumundan bağımsız olarak, manevra performansının incelenmesi için, katı cismin akışkan içerisindeki hareketinden dolayı oluşan ve manevra hareket denklemlerinde türevler veya katsayılar cinsinden görülen hidrodinamik kuvvet ve momentlerin ön dizayn aşamasında doğru bir şekilde hesaplanması gerekmektedir (Akram ve Guang, 2012).

Hidrodinamik kuvvetlerin doğru bir şekilde hesaplanması, doğrudan hareket denklemlerinin doğru bir şekilde çözülmesine bağlıdır. Son zamanlarda hidrodinamik katsayıları etkileyen iç ve dış etkenler araştırma konusu olmuş, iç etkenler içerisinde özellikle ölçek etkisi, araştırmacıların ilgi odağı haline gelmiştir. Ölçekli formun sonuçları etkilemesi her ne kadar istenmeyen bir durum olsa da ölçek etkisinden kurtulabilmek için geliştirilen bir yöntem bulunmamaktadır (Sukas ve diğ, 2017b).

2.2 Hidrodinamik Katsayılarının Hesaplanmasında Kullanılan Yöntemler

Günümüzde bir denizaltının hidrodinamik katsayılarının, dolayısıyla manevra performansının hesaplanmasında birçok farklı yöntem kullanılabilmektedir. Bunlar ampirik yöntemler, deneysel yöntemler, viskoz hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemleri, viskoz olmayan yöntemler ve sistem tanılama yöntemleridir. Fakat literatürde bu yöntemlerden hatta daha fazlası arasından üç tanesi diğerlerine göre daha aktif ve sık olarak kullanılmaktadır. Bunlar ampirik yöntemler, deneysel yöntemler ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleridir (Çavdar ve Bal, 2022).

Literatürde bu üç yöntemi kullanarak yapılan hidrodinamik analizler neticesinde elde edilen manevra türevlerinin gibi çalışmalar mevcuttur. Hangi yöntemin kullanılması gerektiği çeşitli parametrelere bağlı olmakla birlikte bütçe, zaman, kullanılan form özellikleri, su aracının hangi amaca hizmet edeceği gibi etmenler belirleyici rol oynamaktadır.

2.2.1 Ampirik yöntemler

Denizaltıların hidrodinamik katsayılarının hesaplanmasında bahsedilecek olan ilk yöntem ampirik yöntemlerdir. Ampirik yöntemlerde formülasyonlar genellikle form özellikleri, hız, ana boyutlar gibi parametrelerin bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Ampirik yöntemler, tahmine dayalı yöntemler olup deney-seyir tecrübelerine dayanmaktadır ve ön dizayn aşamasında kullanılabilmektedirler. Ön

dizayn aşamasında sıklıkla değişen formun hidrodinamik katsayılara etkilerini gözlemlemek için ampirik yöntemler uygun bir yöntemdir.

Ampirik yöntemlerde hesaplamalar, temelde ideal akış varsayımına dayansa da manevra yapan bir cismin etrafında oluşan ve ideal akış kabulü ile incelemenin yetersiz kalacağı akış türleri için deneye dayalı düzeltme prosedürü yönteme yansıtılmaktadır. Her bir düzeltme prosedürü, elde edilen sonuçları gerçeğe daha da yakınlaştırmaktadır ama bir yandan da en önemli özelliklerinden biri pratikliği olan ampirik yöntemlerin karmaşıklığını artırmaktadır. Bu sebeple bu düzeltmeler literatürde sıklıkla ihmal edilmektedir. Ampirik yöntemler, kullanımının hızlı, maliyetinin düşük olması, pratikliği ve kolayca uygulanabilir olması gibi avantajlarıyla hidrodinamik analiz yapmak isteyen kullanıcılar için cazip görünse de bu yöntemlerin sadece ön dizayn aşamasında yüzeysel bilgi verdiği ve hassasiyetlerinin düşük olduğu unutulmamalıdır. Yöntemin kullanıldığı sınırlar içinde kalınmadığı takdirde tamamıyla hatalı sonuçlar elde etme ihtimali yüksektir. Manevra katsayılarını ana boyutlar cinsinden elde etmeye yarayan ampirik formüller de mevcuttur fakat elde edilen sonuçlar genelde tatmin edici olmamaktadır (Sukas ve diğ, 2017a).

Ampirik yöntemler, deneysel yöntemler veya hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri gibi daha güvenilir yöntemler kullanılmadan önce sadece kabaca fikir edinmek amacıyla kullanılabilirler (Shenoi ve diğ, 2013). Denizaltı gibi bir su altı aracının hidrodinamik analizi yapılırken, ampirik yöntemlerden faydalanmak oldukça zordur çünkü denizaltı ile ilgili yapılan çalışmalar ve deney-seyir tecrübeleri genellikle gizli tutulmaktadır ve toplumla paylaşılmamaktadır. Dolayısıyla formülasyona uyarlamak için kullanılacak veri bulmak kolay değildir.

2.2.2 Deneysel yöntemler

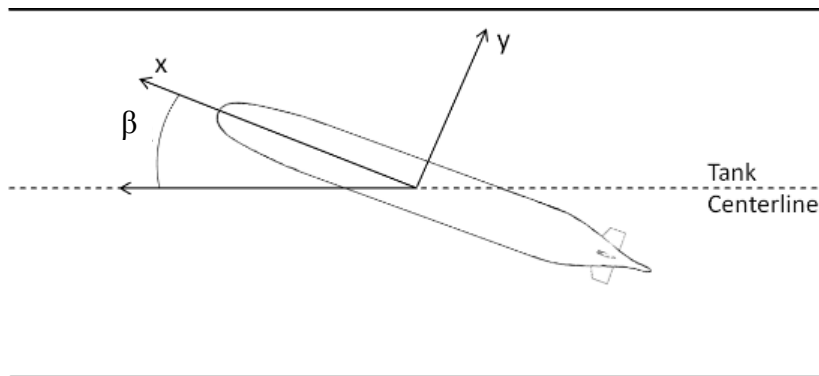
Hidrodinamik analiz yapmak amacıyla sık kullanılan yöntemler arasındaki deneysel yöntemlerin, diğer yöntemlere göre daha güvenilir olduğu ve akış dinamikleri hakkında ayrıntılı bilgiler sağladığı bilinen bir gerçek olsa da maliyetinin yüksek olması, sonuç almak için uzun süre gerekmesi ve deneyleri gerçekleştirecek personelin yeterli tecrübeye olması gerekliliği gibi kısıtlardan dolayı her zaman tercih edilememektedir (Mitra ve diğ, 2021). Deneysel yöntemlerin gerçeğe en yakın sonuçları verdiği kabul edilse de deneylerin kurulum aşamasında yapılan hataları,

ölçüm cihazlarından kaynaklanan hataları, tekrarlama hataları veya insan kaynaklı hataları içerebilmektedir (Suzuki ve diğ, 2013).

Manevra problemlerinde, hidrodinamik katsayıların elde edilmesi amacıyla kısıtlanmış deney metotları kullanılmaktadır. Bu metotlar, formun üzerinde oluşan hidrodinamik kuvvet ve momentleri elde etmek amacıyla belirli bir ölçekteki formun bir hareket mekanizmasına bağlı olarak önceden belirlenmiş hareketleri yapmak için zorlanmasını içermektedir. Deneyle sonucunda elde edilen hidrodinamik kuvvet ve momentler kullanılarak matematik model vasıtasıyla hidrodinamik katsayılar elde edilmektedir. Manevra problemlerinde statik sürüklenme deneyleri, düzlemsel hareket mekanizması, döner kol mekanizması, deforme model deneyleri, dinamik dalma-yunuslama-yalpa mekanizması, konik hareket mekanizması, MDTF gibi birçok deney tipi olsa da bunların arasından statik sürüklenme deneyleri ve döner kol mekanizması hem yaygın olarak kullanıldıklarından hem de bu tez kapsamında simülasyonu gerçekleştirilen deney tipleri olduğundan bu iki tipten bahsedilecektir.

2.2.2.1 Statik sürüklenme deneyleri

Statik sürüklenme deneyleri, aslında düzlemsel hareket mekanizmasının bir parçasıdır ve geminin manevra kabiliyetini tahmin etmek için gerekli katsayıların hesaplanmasına yardımcı olur. Manevra analizlerinde en temel deneysel yöntem statik sürüklenme deneyleridir ve zamandan bağımsız bir yöntemdir. Bu test sonucunda temel olarak belirli sürüklenme açılarındaki sabit hızda çekilen form üzerinde oluşan doğrusal hızlara bağlı yanal öteleme kuvveti ve savrulma momenti hesaplanmakta ve bu sayede statik manevra türevleri elde edilmektedir (Islam ve diğ, 2018). Statik sürüklenme deneylerinin şematik görünümü Şekil 2.2’de, gösterilmektedir.



Şekil 2.2 : Statik sürüklenme deneyi (Loh, 2004).

Şekilde gösterilen β sürüklenme açısını temsil etmektedir. Geminin servis hızının U , yanal hızının v ile temsil edildiği kabul edilirse yanal hız, denklem 2.1 kullanılarak elde edilebilir.

$$v = -U \cdot \sin\beta \quad (2.1)$$

Statik sürüklenme deneyleri çekme tankında gerçekleştirilmektedir. Örnek çekme tankı mekanizması Şekil 2.3'te gösterilmektedir.



Şekil 2.3 : Çekme tankı mekanizması (Delefortrie ve diğ, 2016).

2.2.2.2 Döner kol mekanizması

Kullanılan deneysel yöntemlerden biri de rotasyonel katsayıların hesaplanmasını sağlayan ve yine zamandan bağımsız bir yöntem olan döner kol mekanizmasıdır. Bu deneyde modele, bir çemberin merkezinden çember yayına doğru yerleştirilmiş döner bir kol vasıtası ile tutturularak çember etrafında rotasyonel hareket yaptırılır. Bu test sonucunda temel olarak sabit açısal hızda ve belirli dönme çaplarında rotasyonel hareket yaptırılan form üzerinde oluşan yanal öteleme kuvveti ve savrulma momenti hesaplanmakta ve bu sayede rotasyonel manevra türevleri elde edilmektedir. Döner kol mekanizmasında, dairesel bir yörüngeye ihtiyaç duyulduğundan statik sürüklenme testlerinde kullanılan tanklardan daha büyük çekme tankına ihtiyaç duyulmaktadır (Can, 2014). Geminin servis hızının U , yanal hızının v , açısal hızının ω ile temsil edildiği kabul edilirse açısal hız, denklem 2.2 kullanılarak elde edilebilir.

$$\omega = V \cdot R \quad (2.2)$$

The top part of the image shows a schematic diagram of a ship model in a circular water tunnel. The diagram includes a central pivot, a rotating arm, a console, a sub-carriage, a towing strut, and a model. The bottom part of the image is a photograph of the physical setup, showing a large yellow rotating arm in a circular tank with a blue ship model at the end.

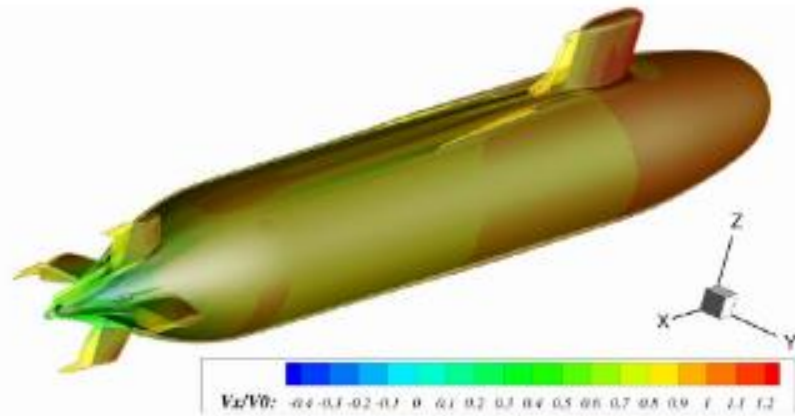
Döner kol mekanizmasında yapılacak deney sonucunda elde edilen rotasyonel manevra türevleri düzlemsel hareket mekanizması kullanılarak da elde edilebilmektedir. Fakat yapılan çalışmalar sonucunda, rotasyonel manevra türevleri hesaplanırken döner kol mekanizması kullanarak alınacak sonuçların, düzlemsel hareket mekanizması kullanarak alınacak sonuçlara göre daha iyi bir performans sergilediği tespit edilmiştir (Pan ve diğ, 2015).

18

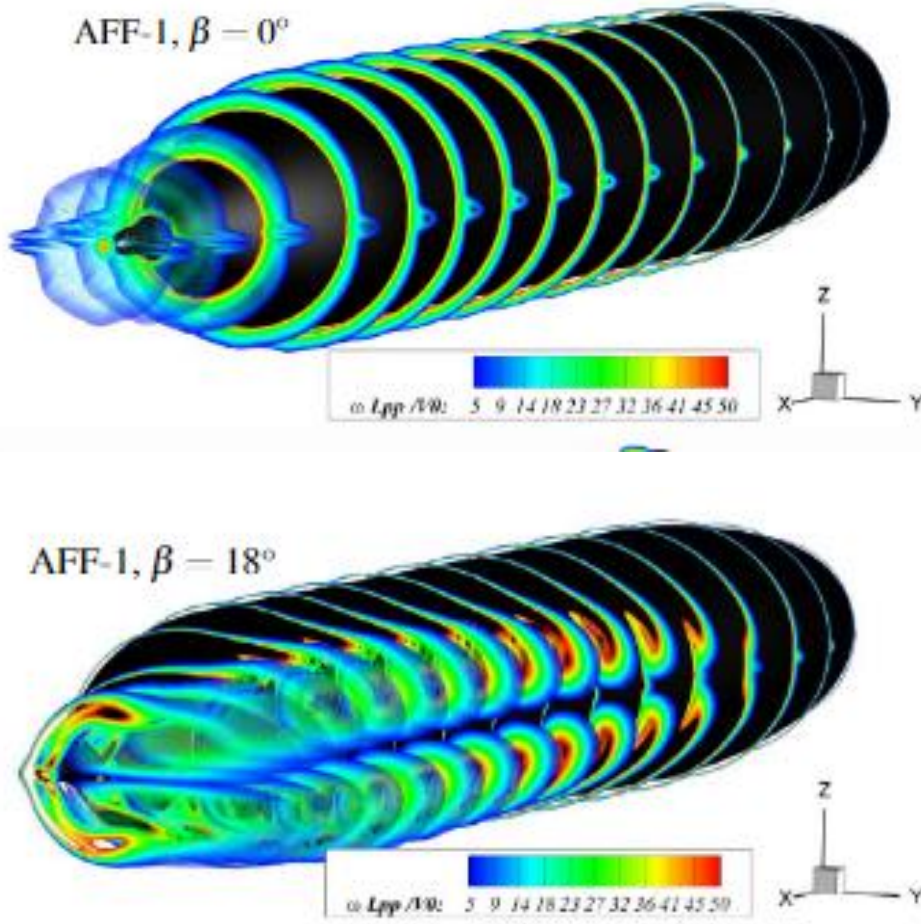
2.2.3 Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD)

Manevra analizlerinde bu tez kapsamında bahsedilecek son yöntem olan hesaplamalı akışkanlar dinamiği ya da bilinen adıyla HAD, son yıllarda oldukça popüler hale gelmiştir ve kullanımı yaygınlaşmaktadır. HAD temel olarak cisim-akışkan etkileşimi olan problemleri kütle, momentum ve enerji korunum denklemleri vasıtasıyla sayısal olarak modellemektedir. Çıktı olarak elde edilen temel parametreler hız-basınç ve türetilen parametreler direnç-kaldırma kuvvetleri, girdaplılık gibi sonuçlar yardımıyla form hakkında ön fikir sahibi olunup gerekli optimizasyonlar yapılabilmektedir.

HAD yönteminde çoğunlukla sonlu hacim metodu kullanılmaktadır. Bu metot yardımıyla akış hacmi daha küçük kontrol hacimlerine bölünmekte, akış problemleri için çözülecek olan Navier-Stokes denklemleri, oluşturulan ağ örgüsüne göre ayrıştırılmakta ve oluşan matrisler sayesinde denklemler sayısal olarak çözülmektedir. Sadece ampirik yöntemlere dayalı hidrodinamik analizlerin genellikle yeterli görünmemesi ve deneysel yöntemlerin pahalılığı ve uzun kurulum süresi gerektirmesi araştırmacıları sayısal yöntemlere teşvik etmektedir (Budak ve Beji, 2016). Buna paralel olarak HAD kapsamında kullanılan yazılımların kabiliyetleri de artmakta, modern HAD tekniklerinin ilerlemesiyle, yöntemin oldukça doğru tahminler verdiğine inanılmaktadır (He ve diğ, 2016). Bu yazılımlar, akademi dünyasına elde edilen bulguları deneyleri yapılarak elde edilen bulgularla kıyaslama yaparak doğruluğunu test etme avantajı da kazandırmıştır. HAD sayesinde araştırmacılar özellikle ön dizayn aşamasında önemli bilgiler edinebilmekte ve bu bilgiler yardımıyla tasarlanması planlanan araçlar hakkında fikir sahibi olabilmektedir (Budak, 2015). HAD yardımıyla hidrodinamik analizi yapılan bir denizaltı Şekil 2.5'te, gösterilmektedir.



Şekil 2.5 : HAD ile denizaltı hidrodinamik analizi (Vaz ve diğ, 2010).

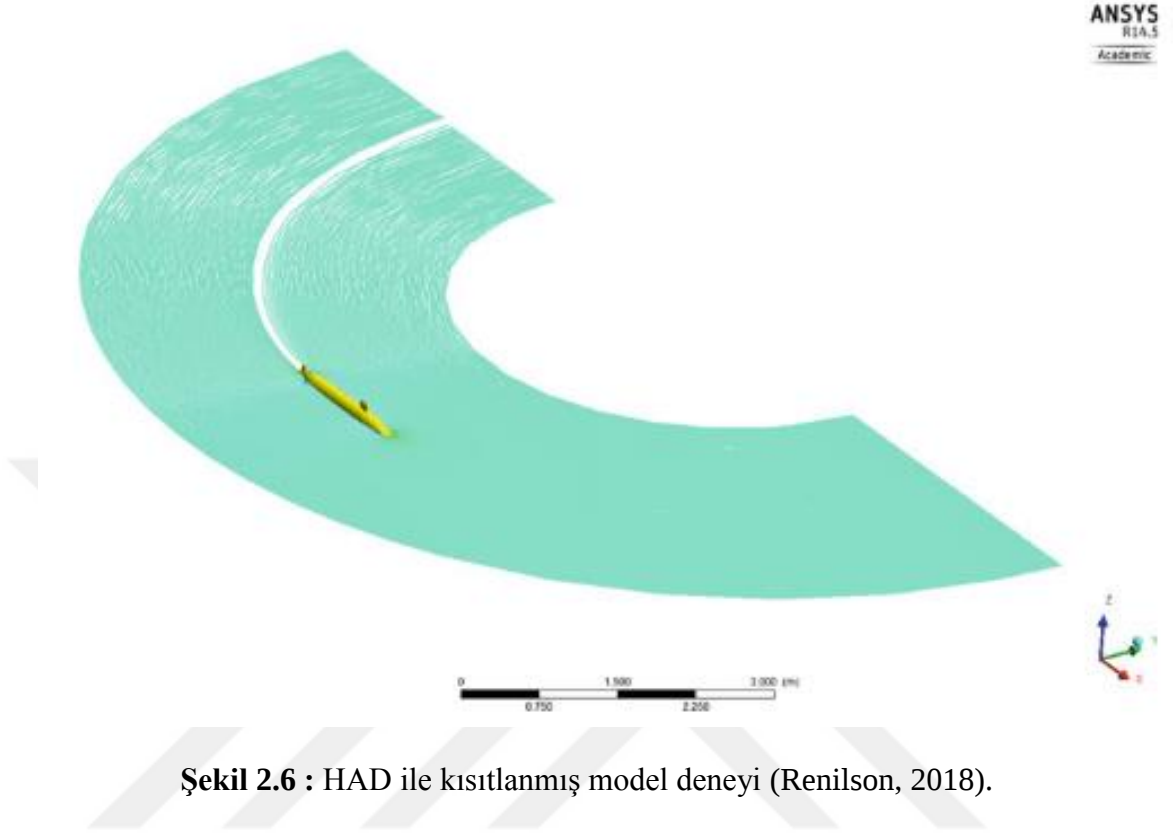


Şekil 2.5 (devam) : HAD ile denizaltı hidrodinamik analizi.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi kapsamında su araçlarının manevra problemlerinde hidrodinamik katsayılar belirlenirken bahsedilen hareketi kısıtlanmış deneysel yöntemlerin bilgisayar ortamında simülasyonunun yapılmasını içermektedir. Ampirik formüllere göre daha güvenilir, model deneylerine göre daha ucuz olmasının yanı sıra tam ölçekli Reynolds sayılarıyla analiz yapmak da HAD ile mümkündür. HAD'ın model deneylerine kıyasla bir başka avantajı da sabit model deneyleri için gerekli olan destek payandaları olmadan gerekli tahminleri gerçekleştirebilmesidir. Payandaların model üzerindeki etkilerini tahmin etmek ve model testlerinin sonuçlarını düzeltmek için HAD'dan faydalanmak da mümkündür. HAD yardımıyla kısıtlanmış deneysel yöntemlerin uygulandığı bir denizaltı Şekil 2.6'da, gösterilmektedir (Renilson, 2018).

Bir denizaltının performansını tahmin etmek için HAD tekniklerini kullanmanın en büyük zorluklarından biri, bu tür tekniklerin çok yüksek bir hızla ilerlemesidir. Bu, günümüzde mevcut teknikler kullanılarak yapılan bir tahminden elde edilen

sonuçların, yalnızca birkaç yıl önce yapılan aynı gövde formu için olanlardan farklı olabileceği anlamına gelmektedir.



Şekil 2.6 : HAD ile kısıtlanmış model deneyi (Renilson, 2018).

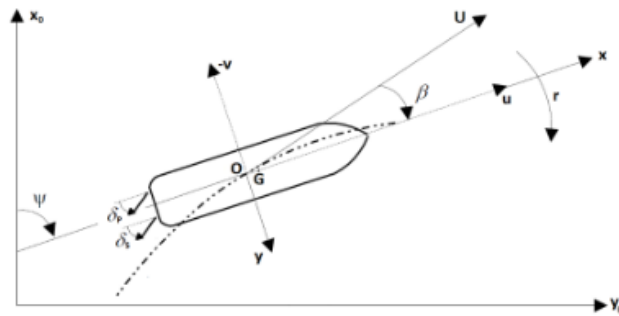


3. MATEMATİK MODEL

Manevra problemleri, herhangi bir yöntemle incelenirken içerdiği yoğun matematiksel ve fiziksel sistemler sebebiyle birçok farklı durumda birçok denklem takımını içinde barındıran karmaşık bir olgudur. Bu bölümde hesaplamalı akışkanlar dinamiği yardımıyla incelenecek olan manevra problemlerinde kullanılan matematiksel denklemler ve sayısal modeller açıklanmıştır.

3.1 Koordinat Sistemi

Manevra problemlerinde su araçlarının dinamiği modellenirken Dünya eksen takımı ve gövde eksen takımı olmak üzere iki farklı eksen takımı kullanılmaktadır (Racine ve Paterson, 2005). Dünya eksen takımının orijini genellikle manevra hareketinin başladığı nokta olarak kabul edilirken, gövde eksen takımı yani gemiye sabit koordinat sisteminin orijini geminin ortası olarak seçilmektedir (Matusiak, 2017). Su aracının 3 serbestlik derecesinde Dünya eksen takımı ($o_0 - x_0y_0z_0$) ve gövde eksen takımı ($o - xyz$) Şekil 3.1’de gösterilmektedir. Pruva açısı ψ , x ve x_0 eksenleri arasındaki açıdır. Çizgi-noktalı eğri aracın yörüngesini göstermektedir. Pruva ile esas rota yörüngesi arasındaki açı sürüklenme açısıdır. $\beta = \tan^{-1}(-v/u)$ bağıntısı ile temsil edilmektedir. u hızı boyuna öteleme hızını, v hızı yan öteleme hızını, r savrulma oranını, δ ise dümen açısını temsil etmektedir. Bileşke hız $U = \sqrt{u^2 + (-v^2)}$ bağıntısı yardımı ile elde edilmektedir (Sukas ve diğ, 2019).



Şekil 3.1 : Dünya ve gövde eksen takımları (Sukas ve diğ, 2019).

3.2 Hareket Denklemleri

Manevra kabiliyetleri incelenirken, genellikle 3 serbestlik dereceli eksen takımı kullanılmaktadır. Bunlar x ekseninde öteleme hareketini temsil eden boyuna öteleme, y ekseninde öteleme hareketini temsil eden yan öteleme ve z eksen etrafındaki dönmeyi temsil eden savrulma hareketleridir. İskele-sancak simetrisinin olduğu bir denizaltında kuvvet ve moment Dünya eksen takımında Newton'un ikinci yasasına göre en genel haliyle denklem 3.1, denklem 3.2 ve denklem 3.3'teki şekilde ifade edilebilir.

$$X_0 = m\ddot{x}_G \quad (3.1)$$

$$Y_0 = m\ddot{y}_G \quad (3.2)$$

$$N = I_Z\dot{r} \quad (3.3)$$

Gövede eksen koordinat sisteminin orijini, ağırlık merkezinde yer almıyorsa, hareket denklemleri denklem 3.4, denklem 3.5 ve denklem 3.6'daki gibi farklı bir biçime dönüşmektedir (Triantafyllou ve Hover, 2003) :

$$X = m(\ddot{u} - rv - x_G r^2) \quad (3.4)$$

$$Y = m(\ddot{v} + ru + x_G \dot{r}) \quad (3.5)$$

$$N = I_Z\dot{r} + mx_G(\dot{v} + ur) \quad (3.6)$$

Bir denizaltının hidrodinamik katsayılarını hesaplayarak manevra performansını tahmin edebilmek amacıyla en çok kullanılan üç yöntemden bahsedildi. Bunlar ampirik yöntemler, deneysel yöntemler ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleridir.

Bu katsayıların elde edilmesi temel olarak, deneysel yöntemlerde mekanizma vasıtasıyla deneyin uygulandığı form üzerindeki hidrodinamik kuvvet ve momentlerin, hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde simülasyonun uygulandığı form üzerindeki hidrodinamik kuvvet ve momentlerin elde edilmesiyle başlamaktadır. Daha sonra deney veya simülasyona uygun olarak kabul edilen matematik model yardımıyla hidrodinamik katsayılar hesaplanmaktadır. Literatürde manevra problemleri için kullanılacak olan matematik model hususunda genellikle iki farklı yöntem önerilmektedir. Bunlar hidrodinamik katsayı tabanlı bir model olan Abkowitz modeli (Abkowitz, 1964) ve modüler tabanlı bir model olan Manevra Modelleme Grubu

modeli (Ogawa ve Kasai, 1978) olarak tanımlanmaktadır. Bu iki matematik model arasında hangisinin daha doğru sonuçlar verdiği konusunda bir karara varılamamıştır.

3.2.1 Abkowitz modeli

Abkowitz modeli, hidrodinamik kuvvet ve momentlerin üçüncü dereceden Taylor serisi açılımına dayanmaktadır (Benzohra, 2017). Bu modelde su aracı bir bütün olarak ele alınmakta ve hidrodinamik kuvvet ve momentlerin hesabında lineer olmayan yaklaşım kullanılmaktadır. İskele-sancak simetrisinin olduğu bir su aracında aracın servis hızı zamana bağlı olarak değişmezse ve ivme terimlerinde birinci merteye dışındakiler modele dahil edilmezse model daha sade bir hal alabilmektedir. Abkowitz matematik modeli denklem 3.7, denklem 3.8 ve denklem 3.9'daki gibi ifade edilmektedir. Bu denklem sisteminde görülen terimler, çeşitli dereceden türevsel ifadeler barındıran ve su aracının manevra kabiliyetini tahmin etmeye yarayan hidrodinamik katsayılardır (Hajivand ve Mousavizadegan, 2015). Denklemlerde bulunan ifade $\Delta u = u - U$ şeklindedir ve pervane etkisi $(u-U)$ ifadesiyle hareket denklemlerine dahil edilmiştir.

$$\begin{aligned} X = X_0 + X_u \Delta u + \frac{1}{2} X_{uu} \Delta u^2 + \frac{1}{6} X_{uuu} \Delta u^3 + \frac{1}{2} X_{vv} v^2 + \left(\frac{1}{2} X_{rr} + m x_G \right) r^2 + \frac{1}{2} X_{\delta\delta} \delta^2 + \\ (X_{vr} + m) vr + X_{v\delta} v\delta + X_{r\delta} r\delta + \frac{1}{2} X_{vvu} v^2 \Delta u + \frac{1}{2} X_{rru} r^2 \Delta u + \frac{1}{2} X_{\delta\delta u} \delta^2 \Delta u + \\ X_{r\delta u} r\delta \Delta u + X_{rvu} rv \Delta u + X_{v\delta u} v\delta \Delta u + X_{r\delta v} r\delta v \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} Y = Y_0 + Y_u \Delta u + Y_{uu} \Delta u^2 + Y_v v + (Y_r - mU) r + Y_\delta \delta + Y_{\delta u} \delta \Delta u + Y_{vu} v \Delta u + \\ Y_{ru} r \Delta u + \frac{1}{2} Y_{vuu} v \Delta u^2 + \frac{1}{2} Y_{ruu} r \Delta u^2 + \frac{1}{2} Y_{\delta uu} \delta \Delta u^2 + \frac{1}{6} Y_{vvv} v^3 + \frac{1}{6} Y_{rrr} r^3 + \frac{1}{6} Y_{\delta\delta\delta} \delta^3 + \\ \frac{1}{2} Y_{rr\delta} r^2 \delta + \frac{1}{2} Y_{vrr} vr^2 + \frac{1}{2} Y_{rvv} rv^2 + \frac{1}{2} Y_{\delta vv} \delta v^2 + Y_{vr\delta} vr\delta + \frac{1}{2} Y_{\delta\delta r} \delta^2 r + \frac{1}{2} Y_{\delta\delta v} \delta^2 v \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} N = N_0 + N_u \Delta u + N_{uu} \Delta u^2 + N_v v + (N_r - m x_G U) r + N_\delta \delta + N_{\delta u} \delta \Delta u + N_{vu} v \Delta u + \\ N_{ru} r \Delta u + \frac{1}{2} N_{vuu} v \Delta u^2 + \frac{1}{2} N_{ruu} r \Delta u^2 + \frac{1}{2} N_{\delta uu} \delta \Delta u^2 + \frac{1}{6} N_{vvv} v^3 + \frac{1}{6} N_{rrr} r^3 + \\ \frac{1}{6} N_{\delta\delta\delta} \delta^3 + \frac{1}{2} N_{rr\delta} r^2 \delta + \frac{1}{2} N_{vrr} vr^2 + \frac{1}{2} N_{rvv} rv^2 + \frac{1}{2} N_{\delta vv} \delta v^2 + N_{vr\delta} vr\delta + \\ \frac{1}{2} N_{\delta\delta r} \delta^2 r + \frac{1}{2} N_{\delta\delta v} \delta^2 v \end{aligned} \quad (3.9)$$

3.2.2 Manevra modelleme grubu (MMG) modeli

MMG modeli, hidrodinamik kuvvetleri ve momentleri çıplak gövde, dümen ve pervane olmak üzere üç bileşene ayırmakta ve bu üç bileşen arasındaki etkileşimi de göz önünde bulundurmaktadır. Bu yaklaşımda su aracına etkiyen hidrodinamik kuvvetlerin zamana bağlı olarak değişmediği, yan öteleme hızının ileri öteleme hızına göre çok küçük olduğu, gemi hızının sabit ve dalga direncinin yüksek olmasına sebep olmayacak boyutta olduğu kabulleri yapılmıştır (Yasukawa ve Yoshimura, 2015). MMG modelinde su aracına etkiyen kuvvetler ve moment, denklem 3.10, denklem 3.11 ve denklem 3.12'deki şeklinde ifade edilebilmektedir.

$$X = X_H + X_P + X_R \quad (3.10)$$

$$Y = Y_H + Y_R \quad (3.11)$$

$$N = N_H + N_R \quad (3.12)$$

Denklemlerde yer alan H indisi tekneyi, P indisi pervaneyi, R indisi dümeni temsil etmektedir. Pervaneden dolayı oluşan kuvvet bileşeni denklem 3.13'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$X_P = (1 - t_p)T \quad (3.13)$$

Denklemden t_p itme azalmasını, T ise itmeyi sembolize etmektedir. Diğer iki serbestlik derecesinde de pervaneden dolayı oluşan Y_P ve N_P bileşenlerini hesaplamak mümkündür. Fakat bu iki bileşenin gemi hareketindeki etkisi küçük olduğundan ihmal edilebilmektedirler (Abdel-Latif ve diğ, 2013).

Dümenden dolayı oluşan kuvvet bileşenleri denklem 3.14, denklem 3.15 ve denklem 3.16'daki gibidir.

$$X_R = -(1 - t_R)F_N \sin \delta \quad (3.14)$$

$$Y_R = -(1 + a_H)F_N \cos \delta \quad (3.15)$$

$$N_R = -(x_R + a_H x_H)F_N \cos \delta \quad (3.16)$$

Burada F_N kuvveti dümene yüzeyin normali yönünde etkiyen kuvvettir, t_R dümen direnci azalma katsayısını, a_H dümen kuvveti artış faktörünü, x_R dümenin tekne üzerindeki boyuna konumunu ve x_H ek yanal kuvvet bileşeninin konumudur.

Tekneden dolayı oluşan kuvvet bileşenleri denklem 3.17, denklem 3.18 ve denklem 3.19'deki gibidir.

$$X_H = (1/2)\rho L_{pp} dU^2 X_H'(v', r') \quad (3.17)$$

$$Y_H = (1/2)\rho L_{pp} dU^2 Y_H'(v', r') \quad (3.18)$$

$$N_H = (1/2)\rho L_{pp} dU^2 N_H'(v', r') \quad (3.19)$$

Denklemlerdeki v' boyutsuz yan öteleme hızını, r' boyutsuz açısal hızı temsil etmektedir.

Gövdeye binen kuvvetler polinom olarak açılımı yapılırsa denklem 3.20, denklem 3.21 ve denklem 3.22 elde edilmektedir.

$$X'_H = -R'_0 + X'_{vv}v'^2 + X'_{vr}v'r' + X'_{rr}r'^2 + X'_{vvvv}v'^4 \quad (3.20)$$

$$Y'_H = Y'_v v' + (Y'_r - m' - m'_x)r' + Y'_{vv}v'^3 + Y'_{vvr}v'^2 r' + Y'_{vrr}v'r'^2 + Y'_{rrr}r'^3 \quad (3.21)$$

$$N'_H = N'_v v' + (N'_r - x'_G m')r' + N'_{vv}v'^3 + N'_{vvr}v'^2 r' + N'_{vrr}v'r'^2 + N'_{rrr}r'^3 \quad (3.22)$$

Bu denklem setinde R'_0 toplam direnç katsayısını, m' gemi kütlesi katsayısı, m'_x ise x yönündeki ek su kütlesi katsayısıdır. X'_{vv} , X'_{vvvv} , Y'_v , Y'_{vvv} , N'_v , N'_{vvv} katsayıları statik sürüklenme simülasyonları sonucunda elde edilebilmektedir. X'_{rr} , $(Y'_r - m' - m'_x)$, Y'_{rrr} , $(N'_r - x'_G m')$, N'_{rrr} katsayıları safii savulma simülasyonları sonucunda elde edilebilmektedir. X'_{vr} , Y'_{vvr} , Y'_{vrr} , N'_{vvr} , N'_{vrr} katsayıları ise sürüklenmeli savrulma bileşik simülasyonları sonucunda elde edilebilmektedir. Bu çalışmada farklı Reynolds sayılarında yapılan simülasyonlarda ölçek etkisinin Y'_v , N'_v , Y'_r ve N'_r lineer hidrodinamik katsayıları üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Yapılan tez çalışmasında Manevra Modelleme Grubu (MMG) matematik modeli baz alınmıştır. DARPA denizaltı modelinin çıplak gövdeli formu incelendiği için Manevra Modelleme Grubu'nun matematik modeline göre hidrodinamik kuvvet ve momenti oluşturan bileşenlerden sadece gövde bileşeni kullanılmıştır. Bir gemi manevrası sırasında önemli olan hidrodinamik kuvvetler, öncelikle yan öteleme kuvveti ve savrulma momentidir (Newman J., 2017). Boyuna öteleme kuvveti, gemi direncini temsil etmektedir ve genellikle direnç problemleri içerisinde incelenmektedir. Bu bağlamda tez kapsamında X'_H incelenmeyecektir.

3.3 RANS ve Türbülans Denklemleri

Günümüzde HAD simülasyonlarında DNS (Direct Numerical Simulation), DES (Detached Eddy Simulation), LES (Large Eddy Simulation) ve RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) gibi farklı yaklaşımlar kullanılsa da RANS bu yöntemler arasında en yaygındır. RANS denklemleri, akışkanın hareketi için zaman ortalamalı hareket denklemleridir ve viskozite ile türbülans etkilerini içerir. Böylece simülasyonlarda akış alanını daha iyi modellemeyi vaat eder (Griffin ve diğ, 2002). Yüzey etkilerinin ihmal edildiği, zamandan bağımsız, viskoz, sıkıştırılamaz bir Newton tipi akışkan için hareket denklemi, süreklilik denklemi adı altında denklem 3.23'deki gibi, Navier-Stokes denklemi ise denklem 3.24'teki gibidir.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (3.23)$$

$$(\vec{\nabla} \cdot \vec{V})\vec{V} = -\frac{1}{\rho}\vec{\nabla}P' + \nu\nabla^2\vec{V} \quad (3.24)$$

Denklem 3.23 korunum denklemi, denklem 3.24 hesaplama bölgesinde lineer momentum transferini sağlayan transfer denklemidir. Burada ρ akışkanın yoğunluğu, ν kinematik viskoziteyi, P' ise serbest yüzey etkilerinin ihmal edilmesi sonucu elde edilen modifiye basıncı temsil etmektedir (Cengel ve Cimbala, 2017).

Öte yandan bir su aracının etrafındaki akışın çeşitli sebeplerden dolayı laminar özellikte olması istense de günümüz teknolojisiyle pek mümkün değildir. Denizaltıda da baş tarafta sınır tabaka laminar olarak başlamaktadır ve toplam denizaltı boyunun küçük bir kısmını kapsayacak şekilde laminar özellikte devam etmektedir. Ancak kısa bir mesafe sonra sınır tabaka türbülanslı akışa geçmekte ve gövdeni büyük bir kısmı türbülanslı sınır tabaka etkisinde kalmaktadır. Dolayısıyla bir denizaltıdaki sınır tabaka yüksek Reynolds sayısından dolayı ağırlıklı olarak türbülanslıdır (Kukner ve diğ, 2016).

Türbülans modeli de denklemler içerisine dahil edildiğinde zamandan bağımsız Navier-Stokes denklemleri, Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemleri formuna dönüşmektedir. Zamandan bağımsız, sıkıştırılamaz ve türbülanslı bir akış için Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemi, denklem 3.25'teki gibi ifade edilebilmektedir.

$$(\vec{\nabla} \cdot \vec{V})\vec{V} = -\frac{1}{\rho}\vec{\nabla}P' + \nu\nabla^2\vec{V} + \vec{\nabla} \cdot (\tau_{ij,türbülans}) \quad (3.25)$$

Denklem 3.24'ten farklı olarak denklem 3.25'in sağ tarafında türbülans etkilerini hesaba katan ek bir terim bulunmaktadır. Bu terim özel Reynolds gerilme tensörüdür ve kartezyen koordinat sisteminde denklem 3.26'daki gibi ifade edilmektedir.

$$\tau_{ij,türbülans} = - \left(\begin{array}{ccc} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'^2} \end{array} \right) \quad (3.26)$$

HAD simülasyonlarında da seçilecek türbülans modeli etkin bir rol oynamaktadır. HAD analizlerinde ana türbülans modelleme teknikleri girdap viskozite modelleri, Reynolds gerilim modelleri, büyük girdap simülasyonları ve doğrudan sayısal simülasyonlardır.

Su altı araçları hidrodinamiği üzerinde çalışan araştırmacılar çoğunlukla iki denklem tabanlı olan $k - \epsilon$ ve $k - \omega$ türbülans modellerini kullanmaktadırlar (Panda ve diğ., 2021). Yaygın kullanılan $k - \omega$ türbülans modeli, $k - \epsilon$ türbülans modeline alternatif olarak ve $k - \epsilon$ türbülans modelinin eksikliklerini gidermek amacıyla sonradan geliştirilmiştir (Duman, 2016).

Bu çalışma kapsamında yapılan HAD analizlerinde kayma gerilmesi transferli $k - \omega$ ya da literatürdeki ismiyle SST $k - \omega$ türbülans modeli seçilmiştir. İki denklemlili bu türbülans modeli, türbülans kinetik enerjisi k ve özel disipasyon oranı ω için transfer denklemlerini içermektedir. Spesifik disipasyon oranı, birim türbülanslı kinetik enerji başına disipasyon oranı olarak tanımlanmaktadır (Menter, 1994).

SST $k - \omega$ türbülans modelinin seçilmesinin nedeni hem bu alanda yapılan çalışmalarda literatürde sıkça tercih edilmesi hem de akım ayrılmasını yakalama konusunda efektif bir türbülans modeli olduğunun düşünülmesidir (Atta ve diğ., 2019). SST modelinin türbülans kinetik enerjisi k için denklemi, denklem 3.27'de ifade edildiği gibidir.

$$U_i \frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + v_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho k \omega \quad (3.27)$$

SST modelinin özel disipasyon oranı ω için denklemi, denklem 3.28'de ifade edildiği gibidir.

$$U_i \frac{\partial(\rho U_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + a \frac{\omega}{k} v_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 \quad (3.28)$$

Burada v_t teriminin açılımı, denklem 3.29’da ifade edildiği gibidir.

$$v_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (3.29)$$

3.4 Boyutsuzlaştırma

Tez kapsamında hidrodinamik katsayılar elde edilirken boyutsuz olarak çalışmıştır. HAD yöntemi sonucunda elde edilen kuvvet ve momentler Çizelge 3.1’deki gibi boyutsuzlaştırılmıştır (Feldman J, 1979).

Çizelge 3.1 : Boyutsuzlaştırma.

Parametre	Boyutsuzlaştırma	Notasyon
v	v/U	v'
r	$r \cdot L_{pp}/U$	r'_{max}
X	$X/0.5 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot L_{pp}^2$	X'
Y	$Y/0.5 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot L_{pp}^2$	Y'
N	$N/0.5 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot L_{pp}^3$	N'

3.5 Eğri Çizdirme Metodu

Bu çalışmada hidrodinamik katsayılar eğri çizdirme metodu ile elde edilmiştir. Öncelikle statik sürüklenme ve safi savrulma simülasyonları farklı Reynolds sayılarında ve farklı fiziksel durumlarda gerçekleştirilmiştir. Her bir durumda simülasyon sonucunda elde edilen yan öteleme kuvvetleri ve savrulma momentleri kaydedilmiştir. Daha sonra statik sürüklenmede her bir sürüklenme açısındaki yan öteleme hızı, yan öteleme kuvveti ve savrulma momenti, safi savrulmada ise her bir savrulma oranında savrulma açısındaki yan öteleme hızı, yan öteleme kuvveti ve savrulma momenti boyutsuzlaştırılmıştır. Statik sürüklenmede yan öteleme hızı-yan öteleme kuvveti ve yan öteleme hızı-savrulma momenti, safi savrulmada savrulma açısındaki yan öteleme hızı-yan öteleme kuvveti ve savrulma açısındaki yan öteleme hızı-savrulma momenti eğrileri model denklemler kullanılarak çizdirilmiştir. Statik sürüklenme simülasyonlarında hidrodinamik katsayıları elde etmek amacıyla kullanılan denklemler, denklem 3.30 ve denklem 3.31’de ifade edilmiştir (Yoon, 2009).

$$Y' = Y_v' v' + Y_{vvv}' v'^3 \quad (3.30)$$

$$N' = N_v' v' + N_{vvv}' v'^3 \quad (3.31)$$

Safi savrulma simülasyonlarında hidrodinamik katsayıları elde etmek amacıyla kullanılan denklemler, denklem 3.32 ve denklem 3.33'te ifade edilmiştir.

$$Y' = (Y_r' - m_x') r_{\max}' + Y_{rrr}' r_{\max}'^3 \quad (3.32)$$

$$N' = N_r' r_{\max}' + N_{rrr}' r_{\max}'^3 \quad (3.33)$$



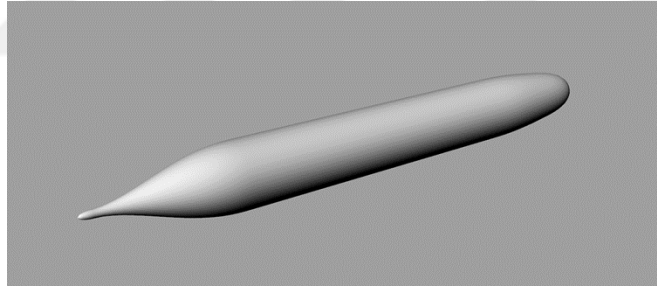
4. SONUÇLAR

4.1 Statik Sürüklenme Simülasyonları

Statik sürüklenmede, su içindeki araç farklı sürüklenme açılarında çekilmekte ve yan öteleme kuvveti ile savrulma momenti ölçülmektedir. Bu kısımda, bölüm 2.2.2.1’de bahsedilen deneysel yöntem statik sürüklenme deneylerinin HAD vasıtasıyla yapılan simülasyonu anlatılacaktır. Bahsedilen yöntem ve izlenen adımlar simülasyonların gerçekleştirildiği 12 farklı Reynolds sayısı durumu için geçerlidir.

4.1.1 Katı modelin oluşturulması

DARPA denizaltı modeli formu Rhinoceros ile modellenmiş ve IGES dosyası olarak kaydedilmiştir. Formun üç boyutlu modellenmiş hali Şekil 4.1’de gösterilmektedir.

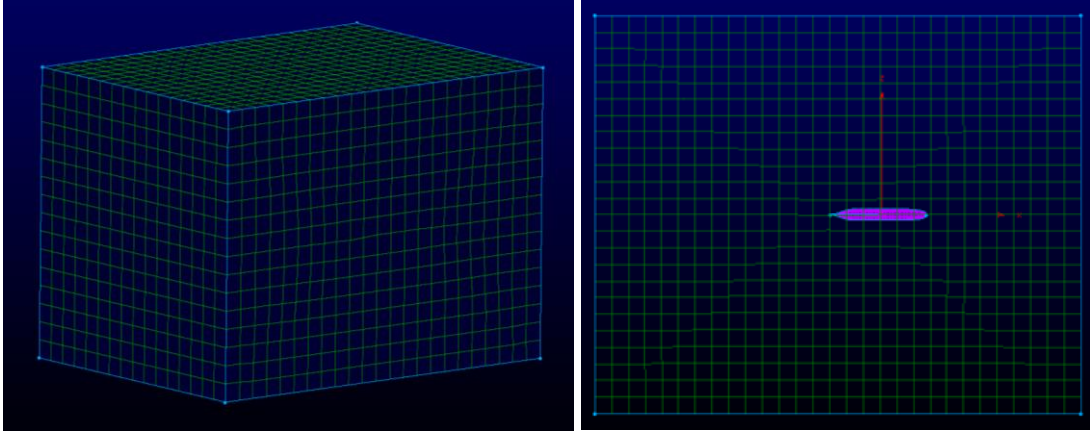


Şekil 4.1 : DARPA takıntısız gövdesi.

4.1.2 Ağ örgüsünün kurulumu

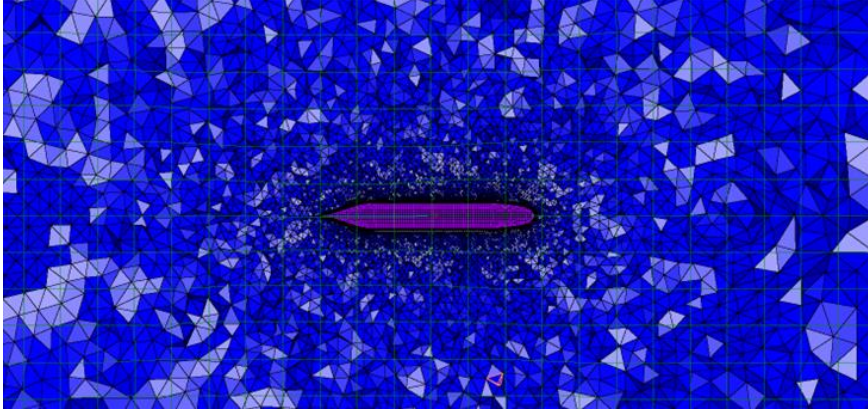
IGES dosya türünde kaydedilen form, ağ örgüsü örülmek üzere Pointwise paket programına aktarılmıştır. Ağ örgüsü tekniği, hidrodinamik analizler için RANS denklemlerinin çözüleceği geniş bir hacmi, simülasyonun yürütülebileceği ve aralarında bilgi alışverişi yapacak küçük hacimlere ayırmaya dayanmaktadır. Akış hacmi oluşturulurken, akışkanın sınırlardan etkilenmesini engellemek amacıyla cismin önünden yaklaşık 1.5L, arkasından yaklaşık 2.5L, diğer yönlerde ise 2L mesafe bırakılmıştır. Burada L gemi boyunu temsil etmektedir. Cismin etrafındaki ağ örgüsü yoğunluğunun daha sık oluşturulmasına dikkat edilmiştir. Sınır tabaka oluştururken

boyutsuz $y^+=30$ kabul edilmiştir ve düzensiz ağ örülmüştür. Simülasyonlarda kullanılan örnek bir akış hacminin görünümü ve Şekil 4.2’de gösterilmektedir.



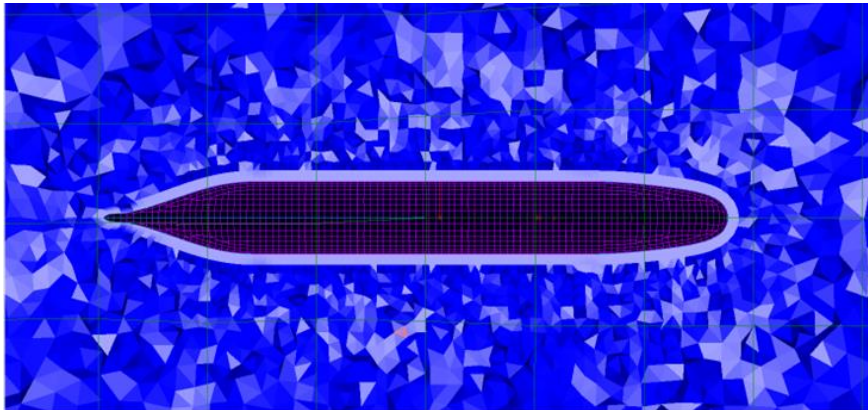
Şekil 4.2 : Akış hacmi görüntüsü.

Cismin etrafındaki örnek bir ağ örgüsü Şekil 4.3’te gösterilmektedir.



Şekil 4.3 : Cismin etrafındaki ağ örgüsü.

Cismin etrafındaki örnek bir sınır tabaka Şekil 4.4’te gösterilmektedir.



Şekil 4.4 : Cismin etrafındaki sınır tabaka.

4.1.3 Problemin kurulumu

Ağ örgüsü oluşturulduktan sonra geometri HAD analizi yapılmak üzere ANSYS Fluent paket programına aktarılmıştır. Önceki bölümde belirtildiği üzere türbülans modeli olarak SST $k - \omega$ modeli tercih edilmiştir. Programda akışkan olarak deniz suyu yoğunluğu (ρ) 997.51 kg/m^3 ve akışkanın kinematik viskozitesi (ν) $1.10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak tanımlanmış, hücre bölgesi şartı kısmından akışkan olarak tanımlanan deniz suyu seçilmiştir. Akış hacminde akışkanın giriş yapacağı yüzey, hız girişi olarak düzenlenip analizden önce boyuna öteleme hızları ve yanal öteleme hızları bileşen olarak girilmiştir. Akışkanın çıkış yapacağı yüzey basınç çıkışı olarak düzenlenmiştir. Denizaltının yüzeylerini kapsayan cidar kısımları ise kaymazlık şartı sağlanacak şekilde duvar olarak belirlenmiştir.

Çözüm şeması olarak Navier-Stokes denklemlerini çözmek için yaygın olarak kullanılan SIMPLE algoritması seçilmiştir. SIMPLE, Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations'ın kısaltmasıdır ve birçok araştırmacı tarafından farklı türde sıvı akışı ve ısı transferi problemlerini çözmek için yaygın olarak tercih edilmektedir (Asyikin, 2012). SIMPLE algoritmasında süreklilik denklemi, basınç için ayrı bir Poisson denklemine dönüştürülmektedir. Bu yöntemde öncelikle ayrıklaştırılmış momentum denklemleri ve sonuçta ortaya çıkan hız bileşenlerini çözebilmek amacıyla diferansiyel denklemler doğrusallaştırılmakta ve basınç alanı tahmin edilmektedir. Ardından momentum denklemleri ve basınç denklemi için düzeltici aşama gelmektedir. Bu iteratif sürecin ardından doğru hız alanı hesaplanmaktadır (Iaccarino, 2001). Türevlerin hesaplanması için en küçük kareler yöntemi, basınç alanı hesaplamaları için ikinci dereceden denklemlerde çözüm seçilmiştir. Momentum, türbülans kinetik enerjisi ve özel disipasyon oranı için ikinci derece yukarı yönlü şema tercih edilmiştir.

Rapor kısmında denizaltının iskele-sancak eksenini belirten y ekseninde denizaltına binen yan öteleme kuvveti (Y) ve denizaltının dip-tepe eksenini belirten z ekseninde denizaltına binen savrulma momenti (N) tanımlanmıştır. Çözülecek olan diferansiyel denklemlerin yakınsamasında bu iki temel parametrenin yakınsaması özellikle göz önünde bulundurulmuştur.

Bölüm 3.1'de anlatıldığı gibi manevra problemlerinde Dünya-eksen takımı ve gövde-eksen takımı olmak üzere iki tip koordinat sistemi bulunmaktadır. Hidrodinamik

kuvvet ve momentlerin gövde eksen takımına göre hesaplanması ve manevra türevlerinin yine bu eksen takımına göre belirlenmesi büyük önem arz etmektedir. Yapılan statik sürüklenme simülasyonlarında koordinat sistemi cismin üzerine konumlandırılmış ve cisim hareketsiz kalacak şekilde üzerine akış gönderilmiş olduğu için elde edilen hidrodinamik kuvvetler ve momentler otomatik olarak gövde eksen takımında elde edilmiştir.

Denizaltının boyu ve servis hızı ölçeklendirilerek 12 farklı Reynolds sayısında statik sürüklenme analizi yapılmıştır. Bu 12 farklı durum Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. 12 farklı durumun her birinde akış denizaltıya 0°, 3°, 6°, 9°, 12° ve 15° sürüklenme açısında akış gönderilmiş ve yan öteleme kuvveti ve savrulma momenti çıktı olarak alınmıştır.

Çizelge 4.1 : Statik sürüklenme analizi durumları.

Parametre	1.Durum	2.Durum	3.Durum	4.Durum	5.Durum	6.Durum
L_{pp} (m)	4.261	2.130	8.522	4.261	2.130	8.522
U_0 (m/s)	1.50	1.50	1.50	2.50	2.50	2.50
Re	6.36E+06	3.18E+06	1.27E+07	1.06E+07	5.30E+06	2.12E+07

Parametre	7.Durum	8.Durum	9.Durum	10.Durum	11.Durum	12.Durum
L_{pp} (m)	4.261	2.130	8.522	1.065	2.130	2.130
U_0 (m/s)	4.00	4.00	4.00	1.00	0.25	0.75
Re	1.70E+07	8.48E+06	3.39E+07	1.06E+06	5.30E+05	1.59E+06

4.1.4 Hidrodinamik katsayıların elde edilme örneği

Bu bölümde, HAD vasıtasıyla statik sürüklenme analizlerinin gerçekleştirildiği durumlar arasında 1. durum için analiz sonuçları neticesinde hidrodinamik katsayıların kabul edilen matematik model yardımıyla nasıl elde edileceğinden bahsedilecektir. Katı modelin oluşturulması, ağ örgüsünün örülmesi, problemin kurulması aşamalarının ardından farklı sürüklenme açılarında yapılan çözüm sonucunda elde edilen yan öteleme kuvveti ve savrulma momenti değerleri Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 : 1.durum için kuvvetler ve momentler.

β (deg)	β (rad)	v (m/s)	Y (N)	N (N.m)
0	0	0	0	0
3	0.0524	-0.0785	7.616	61.923
6	0.1047	-0.1568	18.567	119.504
9	0.1571	-0.2347	36.445	168.915
12	0.2094	-0.3119	64.011	208.230
15	0.2618	-0.3882	101.270	240.418

Burada β sürüklenme açısını temsil etmektedir ve yanıl hız v, denklem 2.1 yardımı ile hesaplanabilmektedir. Daha sonra hız, kuvvet ve moment değeri boyutsuz hale getirilmektedir. 1. Durum için boyutsuz değeri Çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

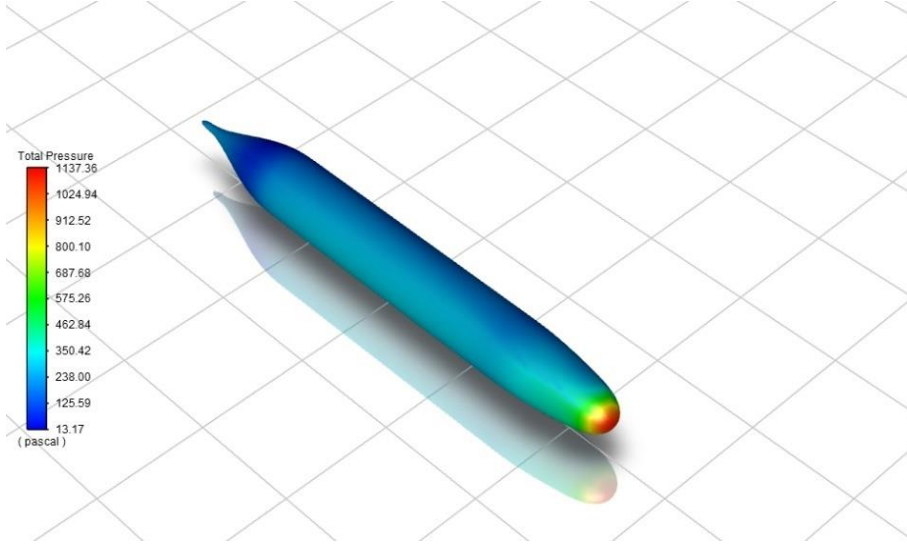
Çizelge 4.3 : 1.durum için boyutsuz kuvvetler ve momentler.

v'	Y'	N'
0	0	0
-0.0523	0.00037	0.00071
-0.1045	0.00091	0.00138
-0.1564	0.00179	0.00195
-0.2079	0.00314	0.00240
-0.2588	0.00497	0.00277

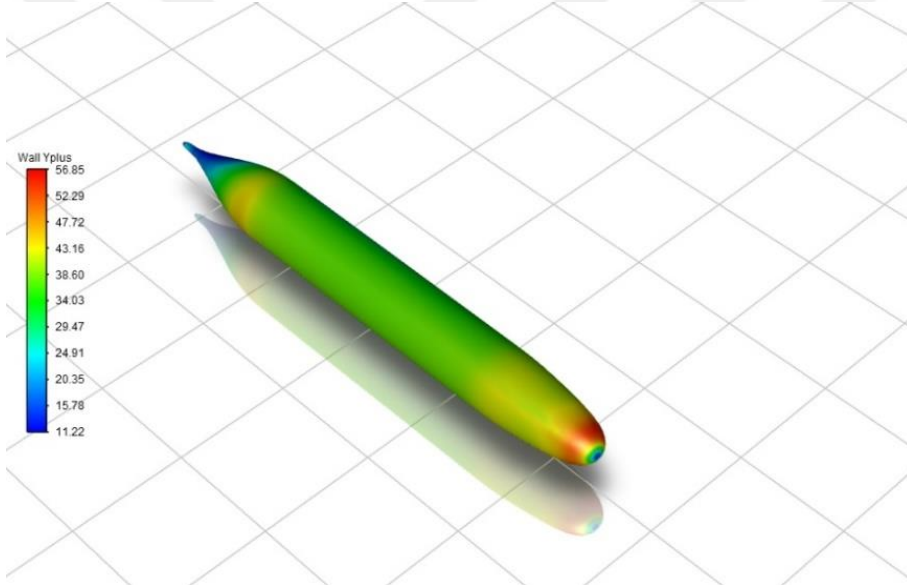
Bunun ardından, denklem 3.30 ve denklem 3.31'de kabul edilen matematiksel modeller yardımıyla yan öteleme kuvvetinin yan öteleme hızına dayalı ve savrulma momentinin yan öteleme hızına dayalı optimum eğrii çizdirilmektedir. Böylece lineer hidrodinamik katsayılar Y_v ve N_v , lineer olmayan hidrodinamik katsayılar Y_{vv} ve N_{vv} elde edilebilmektedir. Bu tez kapsamında ölçek etkisinin lineer hidrodinamik katsayılara olan etkisi incelenmiş, lineer olmayan hidrodinamik katsayılar değerlendirilmemiştir. Katsayılar, bölüm 4.1.6'da toplu olarak verilecektir.

4.1.5 Sonuçların görüntülenmesi

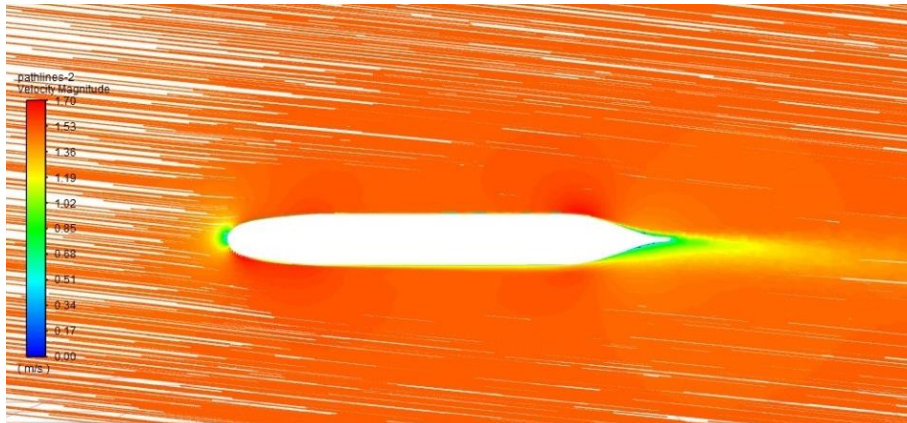
Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yönteminin kullanıcılar tarafından belki de en sevilen kısmı elde edilen sonuçların göze hitap edecek şekilde ve oldukça estetik olarak görüntülenebilmesidir. Bu bölümde statik sürüklenme analizlerinin gerçekleştirildiği 1.durumda 6° sürüklenme açısında elde edilen sonuçlar paylaşılacaktır. Gövde üzerindeki toplam basınç dağılımı Şekil 4.5'te, gövde üzerindeki y^+ dağılımı Şekil 4.6'da, akım hatları Şekil 4.7'de gösterilmektedir.



Şekil 4.5 : Gövde üzerindeki basınç dağılımı.



Şekil 4.6 : Gövde üzerindeki y^+ dağılımı.



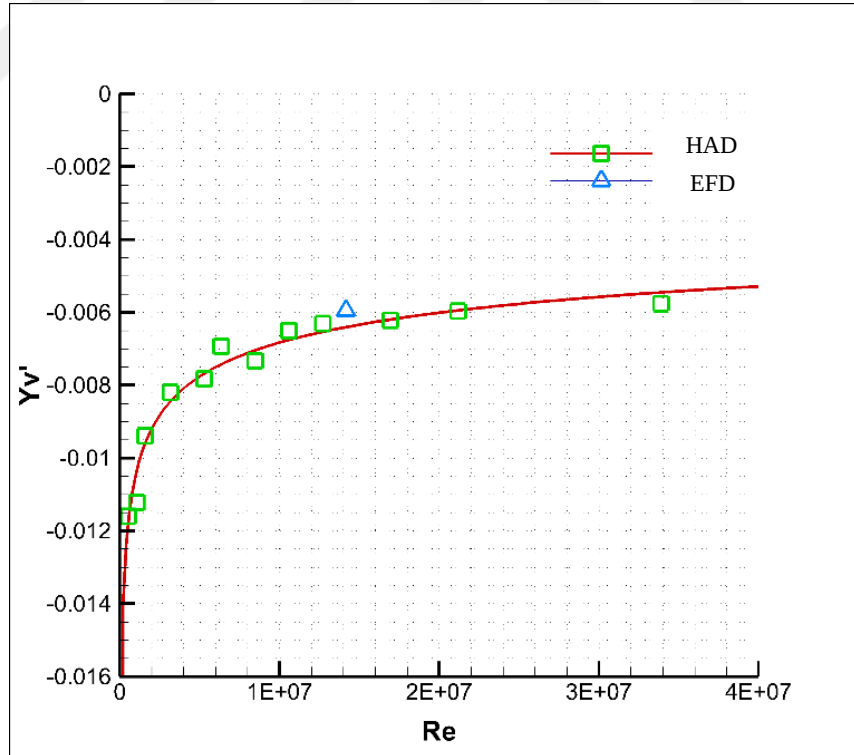
Şekil 4.7 : Akım hatları.

4.1.6 Hidrodinamik katsayılar

Hesaplanan manevra türevleri ve David Taylor Araştırma Merkezi (DTRC) tarafından yayınlanan deneysel sonuçlar (Roddy, 1990) Çizelge 4.4'te sunulduğu gibidir.

Çizelge 4.4 : Statik sürüklenme ile elde edilen lineer hidrodinamik katsayılar.

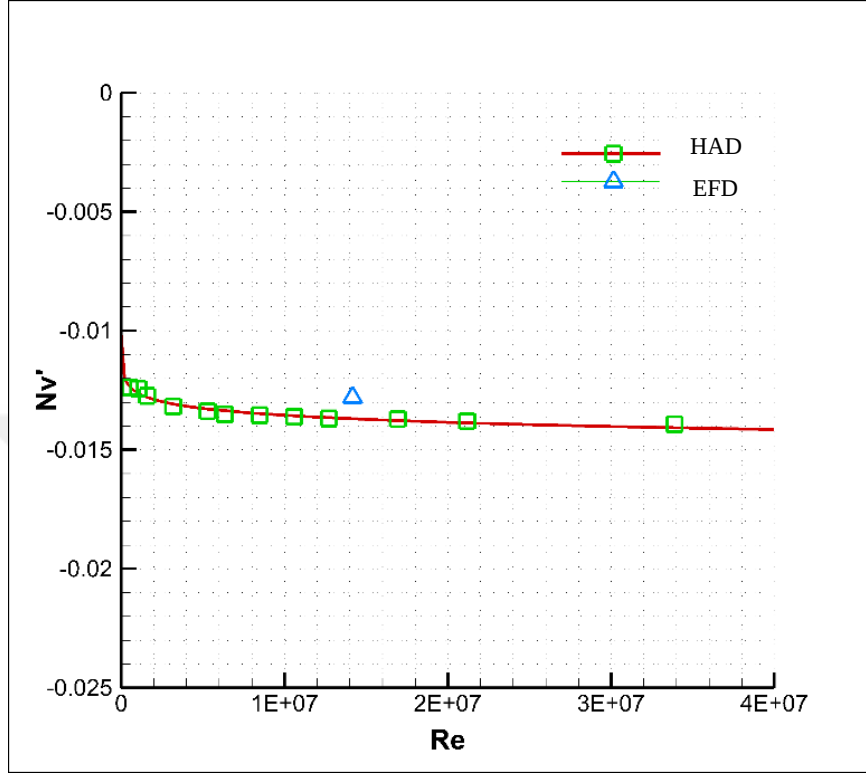
	L_{pp}	U_0	Re	Y_v'	N_v'
1.Durum	4.261	1.50	6.36E+06	-0.006930	-0.013508
2.Durum	2.130	1.50	3.18E+06	-0.008198	-0.013187
3.Durum	8.522	1.50	1.27E+07	-0.006306	-0.013691
4.Durum	4.261	2.50	1.06E+07	-0.006504	-0.013615
5.Durum	2.130	2.50	5.30E+06	-0.007829	-0.013385
6.Durum	8.522	2.50	2.12E+07	-0.005964	-0.013798
7.Durum	4.261	4.00	1.70E+07	-0.006217	-0.013720
8.Durum	2.130	4.00	8.48E+06	-0.007335	-0.013552
9.Durum	8.522	4.00	3.39E+07	-0.005768	-0.013927
10.Durum	1.065	1.00	1.06E+06	-0.011218	-0.012429
11.Durum	2.130	0.25	5.30E+05	-0.011604	-0.012380
12.Durum	2.130	0.75	1.59E+06	-0.009394	-0.012737
EFD	4.261	3.34	1.42E+07	-0.005948	-0.012795



Şekil 4.8 : Statik sürüklenmede Re- Y_v' dağılımı.

Y_v' -Reynolds sayısı grafiği Şekil 4.8'de ve N_v' -Reynolds sayısı grafiği Şekil 4.9'da gösterildiği gibidir. 12 Reynolds sayısında ayrı ayrı yapılan analizler sonucunda bölüm

4.4’de anlatılan yöntem her bir durum için uygulanarak yan öteleme hızına bağlı boyutsuz lineer hidrodinamik katsayılar Y_v' ve N_v' elde edilmiştir. Çizelgenin son satırında ise deneysel sonuçlardan alınan veriler (EFD) sunulmuştur.



Şekil 4.9 : Statik sürüklenmede $Re-N_v'$ dağılımı.

Veriler eğri çizdirme tekniği kullanılarak en uygun denklemlere oturdulduğunda denklem 4.1 ve denklem 4.2 elde edilmiştir. Bu iki denkleme dayanarak, DARPA'nın çıplak gövde formunun Reynolds sayısı mevcutsa, Y_v' ve N_v' hesaplanabilmektedir.

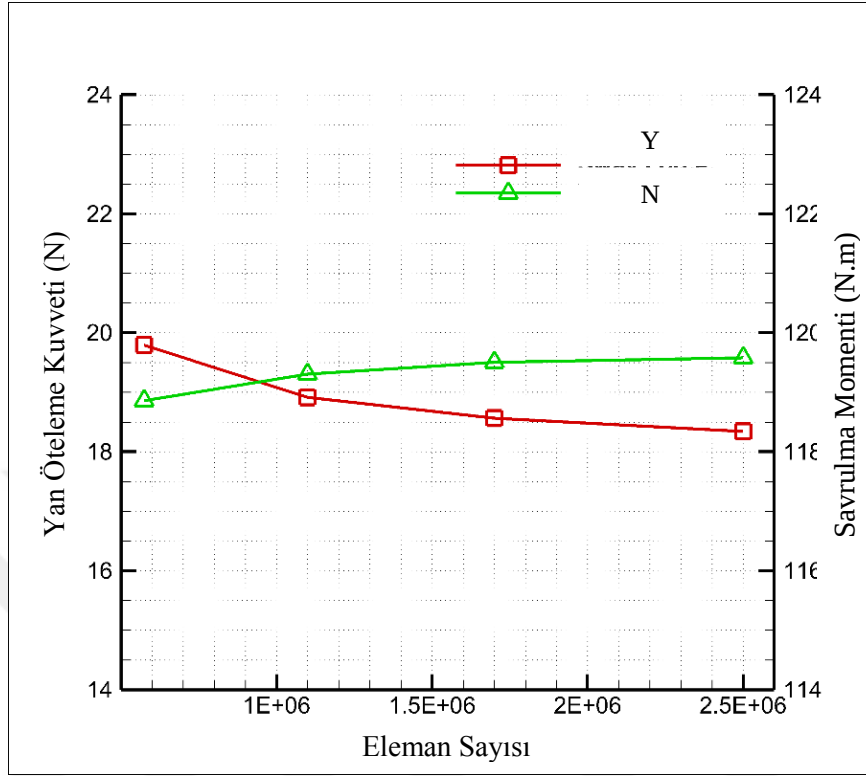
$$Y_v' = 0.001527353 \ln(Re) - 0.03154784 \quad (4.1)$$

$$N_v' = -0.000410797 \ln(Re) - 0.006932722 \quad (4.2)$$

4.2 Ağdan Bağımsızlık Çalışması

HAD analizlerinde kilit bir faktör olarak ağ sıklığı, kullanıcının karar vermesi için en önemli unsurlardan biridir. Günümüzde çoğu bilimsel çalışma ve simülasyon, ilk ve temel kural olarak ağdan bağımsız HAD çözümleri gerektirmektedir. Farklı ağ yoğunluklarındaki sayısal çözümler arasındaki fark önemsiz olduğunda, ağdan bağımsız bir HAD çözümü elde edilir. Test edilecek ağ yoğunluklarının seçimi ve

ağdan bağımsız çözümün belirlenmesi HAD kullanıcısının takdirindedir (Wang ve Zhai, 2012).



Şekil 4.10 : Ağ yakınsaması.

Ağ yakınsama çalışması, 1.durumda 6 derece sürüklenme açısındaki statik sürüklenme simülasyonu için seyrek, orta, orta-yoğun ve yoğun ağlar olmak üzere dört farklı ağ yoğunluğu geliştirilerek gerçekleştirildi. Yan öteleme kuvveti ve savrulma momentinde elde edilen değerlerin ağ yoğunluğuna bağlılığını göstermek için hücre sayıları $5.75 \cdot 10^5$ ile $2.50 \cdot 10^6$ arasında değiştirildi. Yan öteleme kuvveti ve savrulma momenti yakınsaması Şekil 4.10'da ve Çizelge 4.5'te gösterildiği gibidir. "Orta-yoğun" ağ yoğunluğunun ötesinde yan öteleme kuvvetinde ve savrulma momentinde önemli bir değişiklik olmadığı bulundu. Bu nedenle, mevcut çalışma için, tüm simülasyonlarda "orta-yoğun" ağ yoğunluğu kullanılmıştır.

Çizelge 4.5 : Y ve N değerlerinin farklı ağ yoğunluklarında karşılaştırması.

Ağ	Eleman	Y (N)	N (N.m)
Seyrek	575000	19.792	118.861
Orta	1100000	18.915	119.308
Orta-Yoğun	1700000	18.567	119.504
Yoğun	2500000	18.342	119.579

4.3 Safi Savrulma Simülasyonları

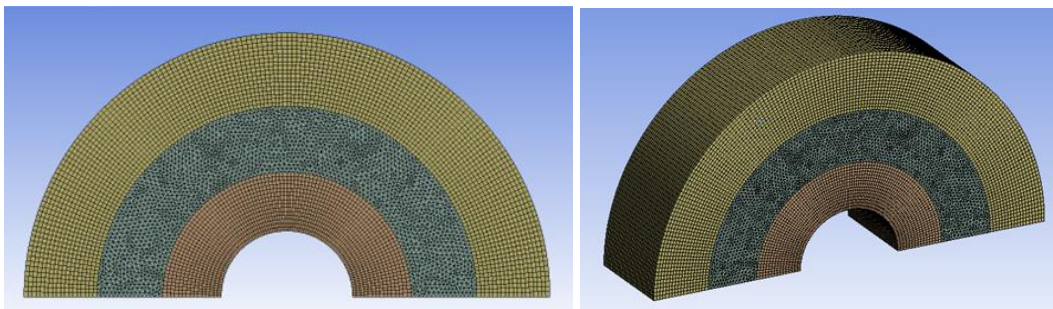
Safi savrulmada araç r hızıyla R uzunluğunda bir kol etrafında dönmekte ve bu hareket sonucunda araca etki eden yan öteleme kuvveti ve savrulma momenti hesaplanmaktadır . Bu kısımda, bölüm 2.2.2.2’de bahsedilen deneysel yöntem döner kol mekanizması deneylerinin HAD vasıtasıyla yapılan simülasyonundan bahsedilecektir. Bahsedilen yöntem ve izlenen adımlar simülasyonların gerçekleştirildiği 12 Reynolds sayısı durumu için geçerlidir.

4.3.1 Katı modelin oluşturulması

Statik sürüklenme analizlerinde kullanılmak üzere daha önce üç boyutlu olarak modellenen DARPA denizaltı modeli çıplak gövde formu STEP dosyası olarak kaydedilmiştir.

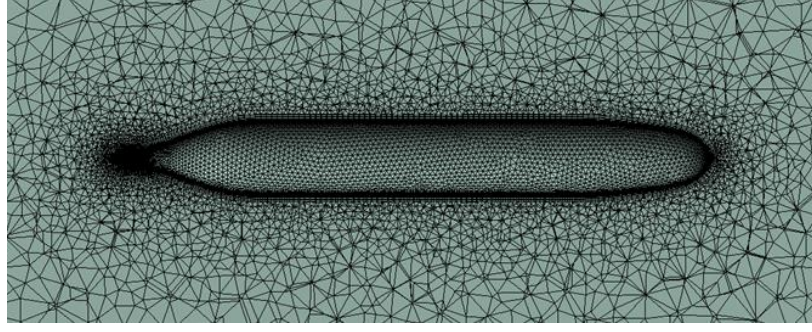
4.3.2 Ağ örgüsünün kurulumu

STEP dosya türünde kaydedilen DARPA Suboff formu, ağ örgüsü örülmek üzere ANSYS paket programına aktarılmıştır. Döner kolun uzunluğu 12 farklı durumun içinde farklı dönme hızlarının her birinde değiştiği için akış hacmi oluşturulurken bırakılan mesafeler standartlaştırılamamıştır ancak araç etrafındaki akışı bozmamak ve elde edilen değerlerin etkilenmemesi için uygun bir mesafe bırakılmasına özen gösterilmiştir. Cismin etrafındaki ağ örgüsü yoğunluğunun daha sık oluşturulmasına dikkat edilmiştir. Sınır tabaka oluştururken boyutsuz $y^+=30$ kabul edilmiştir. Seçilen türbülans modelinde y^+ değeri 30 ile 300 arasında olmalıdır. Çünkü viskoz alt katmanın etkisi duvar fonksiyonlarıyla bu değerde yaklaşık olarak hesaplanabilir (Kim ve diğ., 2014). Akışın gerçekleşeceği kısımda yani rotasyonel bölgede düzensiz ağ örülmüştür. Simülasyonlarda kullanılan örnek bir akış hacminin görünümü ve Şekil 4.11’de gösterilmektedir.



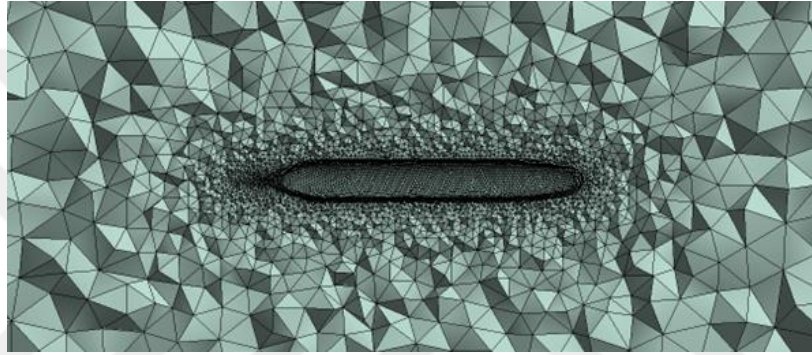
Şekil 4.11 : Akış hacmi görüntüsü.

Cismin etrafındaki örnek bir ağ örgüsü Şekil 4.12’de gösterilmektedir.



Şekil 4.12 : Cismin etrafındaki ağ örgüsü.

Cismin etrafındaki örnek bir sınır tabaka Şekil 4.13’te gösterilmektedir.



Şekil 4.13 : Cismin etrafındaki sınır tabaka.

4.3.3 Problemin kurulumu

Ağ örgüsü oluşturulduktan sonra geometri HAD analizi yapılmak üzere ANSYS Fluent paket programına aktarılmıştır. Türbülans modeli olarak yine SST $k - \omega$ modeli tercih edilmiştir. Programda akışkan olarak deniz suyu yoğunluğu (ρ) 997.51 kg/m^3 ve akışkanın kinematik viskozitesi (ν) $1.10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak tanımlanmış, hücre bölgesi şartı kısmından akışkan olarak tanımlaman deniz suyu seçilmiştir. Şekil 4.11’de görülen ağ örgüsüne göre, denizaltı ortadaki akış hacmine konumlandırılmıştır. Bu orta bölgenin diğer iki bölge ile temas eden yüzeyleri ağ örgüsü ara yüzeyi olarak ayarlanmıştır. Daha sonra hücre bölgesi şartı kısmında bu orta bölge rotasyonel hareket bölgesi olarak tanımlanmış, dönme hızı girilmiş ve dönme eksenini merkezi dönme kolu uzunluğu olarak ayarlanmıştır. Akış hacminde akışkanın giriş yapacağı yüzey, hız girişi ,akışkanın çıkış yapacağı yüzey basınç çıkışı olarak düzenlenmiştir. Denizaltının yüzeylerini kapsayan cidar kısımları ise kaymazlık şartı sağlanacak şekilde duvar olarak belirlenmiştir.

Çözüm şeması olarak SIMPLE algoritması seçilmiştir. Türevlerin hesaplanması için en küçük kareler yöntemi, basınç alanı hesaplamaları için ikinci dereceden denklemlerde çözüm seçilmiştir. Momentum, türbülans kinetik enerjisi ve özel disipasyon oranı için ikinci derece yukarı yönlü şema tercih edilmiştir.

Rapor kısmında denizaltının iskele-sancak eksenini belirten y ekseninde denizaltına binen yan öteleme kuvveti (Y) ve denizaltının dip-tepe eksenini belirten z ekseninde denizaltına binen savrulma momenti (N) tanımlanmıştır. Çözülecek olan diferansiyel denklemlerin yakınsamasında bu iki temel parametrenin yakınsaması özellikle göz önünde bulundurulmuştur.

Yapılan safi savrulma simülasyonlarında koordinat sistemi cismin üzerine konumlandırılmış ve cisim hareketsiz kalacak şekilde üzerine akış gönderilmiş olduğu için elde edilen hidrodinamik kuvvetler ve momentler statik sürüklenme simülasyonunda olduğu gibi yine otomatik olarak gövde eksen takımında elde edilmiştir.

Denizaltının boyu ve servis hızı ölçeklendirilerek 12 farklı Reynolds sayısında safi savrulma analizi yapılmıştır. Bu 12 farklı durum Çizelge 4.6'da gösterilmiştir. 12 farklı durumun her birinde savrulma oranı r'_{max} 0.1, 0.2, 0.4, 0.6 ve 0.8 kabul edilmiştir. Dönme hızı denklem 4.3, dönme kolu uzunluğu ise denklem 4.4 yardımıyla hesaplanmıştır. Analizler sonucunda yan öteleme kuvveti ve savrulma momenti çıktı olarak alınmıştır.

$$r'_{max} = rL/U_0 \quad (4.3)$$

$$U_0 = rR \quad (4.4)$$

Çizelge 4.6 : Safi savrulma analizi durumları.

Parametre	1.Durum	2.Durum	3.Durum	4.Durum	5.Durum	6.Durum
L_{pp} (m)	4.261	2.130	8.522	4.261	2.130	8.522
U_0 (m/s)	1.50	1.50	1.50	2.50	2.50	2.50
Re	6.36E+06	3.18E+06	1.27E+07	1.06E+07	5.30E+06	2.12E+07

Parametre	7.Durum	8.Durum	9.Durum	10.Durum	11.Durum	12.Durum
L_{pp} (m)	4.261	2.130	8.522	1.065	2.130	2.130
U_0 (m/s)	4.00	4.00	4.00	1.00	0.25	0.75
Re	1.70E+07	8.48E+06	3.39E+07	1.06E+06	5.30E+05	1.59E+06

4.3.4 Hidrodinamik katsayıların elde edilme örneği

Bu bölümde, HAD vasıtasıyla safi savrulma analizlerinin gerçekleştirildiği durumlar arasında 1. durum için analiz sonuçları neticesinde hidrodinamik katsayıların kabul edilen matematik model yardımıyla nasıl elde edileceğinden bahsedilecektir. Katı modelin oluşturulması, ağ örgüsünün örülmesi, problemin kurulması aşamalarının ardından farklı savrulma oranlarında yapılan çözüm sonucunda elde edilen yan öteleme kuvveti ve savrulma momenti değerleri Çizelge 4.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7 : 1.durum için kuvvetler ve momentler.

r'max (rad)	r (rad/s)	R (m)	Y (N)	N (N.m)
0.1	0.0352	42.609	1.584	-8.824
0.2	0.0704	21.305	3.448	-18.421
0.4	0.1408	10.652	9.017	-40.624
0.6	0.2112	7.102	15.734	-65.423
0.8	0.2816	5.326	24.895	-96.693

Daha sonra hız, kuvvet ve moment değerleri boyutsuz hale getirilmektedir. 1. Durum için boyutsuz değerler Çizelge 4.8’de gösterilmiştir.

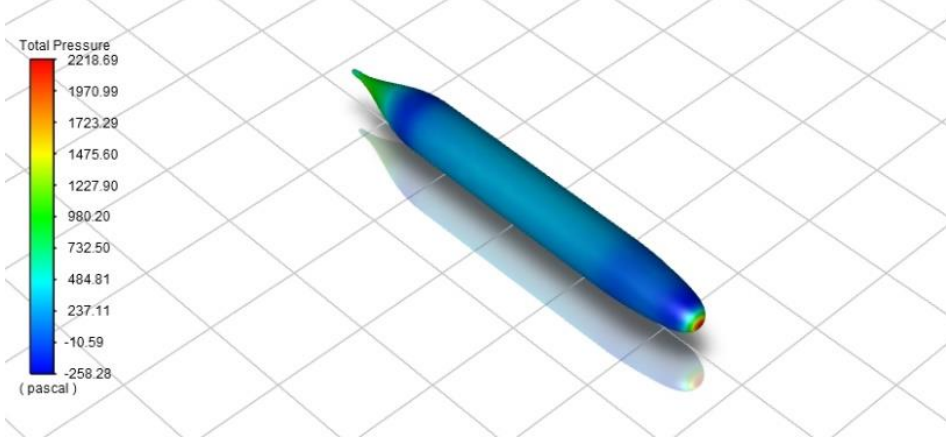
Çizelge 4.8 : 1.durum için boyutsuz kuvvetler ve momentler.

r'max	Y'	N'
0.1	0.00008	-0.00010
0.2	0.00017	-0.00021
0.4	0.00044	-0.00047
0.6	0.00077	-0.00075
0.8	0.00122	-0.00111

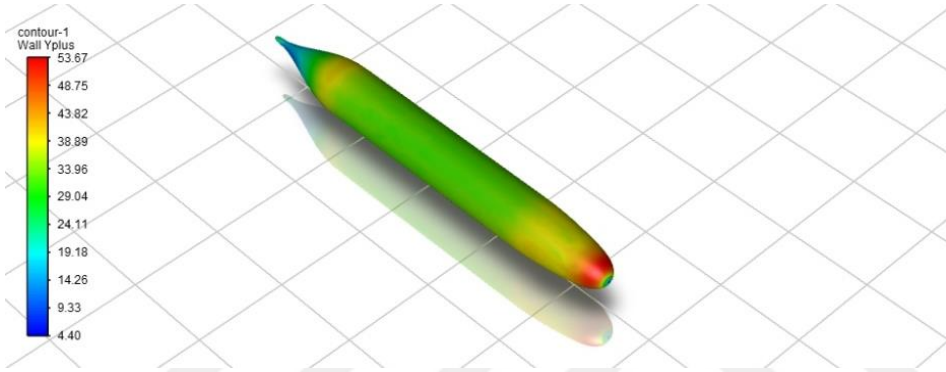
Bunun ardından, denklem 3.32 ve denklem 3.33’te kabul edilen matematiksel modeller yardımıyla yan öteleme kuvvetinin savrulma hızına dayalı ve savrulma momentinin savrulma hızına dayalı optimum eğrileri çizdirilmektedir. Böylece lineer hidrodinamik katsayılar Y_r ve N_r , lineer olmayan hidrodinamik katsayılar Y_{nr} ve N_{nr} elde edilebilmektedir. Katsayılar, bölüm 4.3.6’da toplu olarak verilecektir.

4.3.5 Sonuçların görüntülenmesi

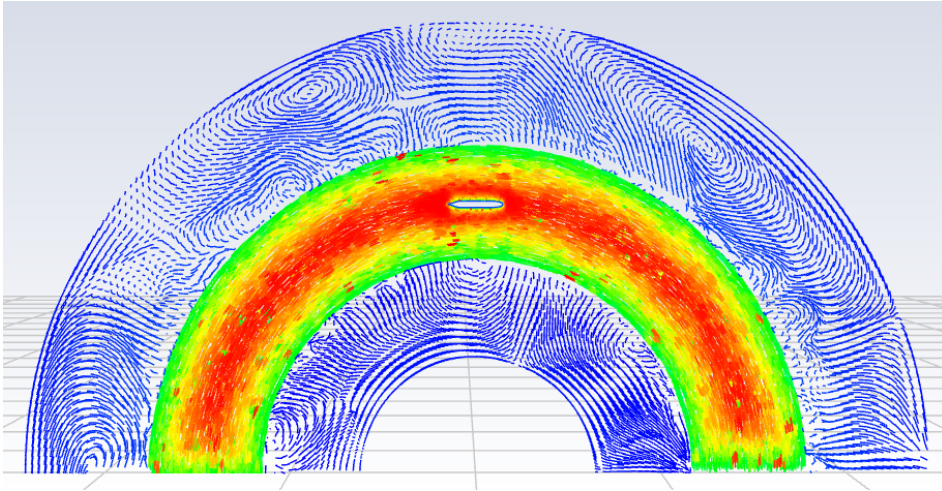
Bu bölümde safi savrulma analizlerinin gerçekleştirildiği 1.durumda 0.2 savrulma oranında elde edilen sonuçlar paylaşılacaktır. Gövde üzerindeki toplam basınç dağılımı Şekil 4.14’te, gövde üzerindeki y^+ dağılımı Şekil 4.15’te, akım hatları Şekil 4.16’da gösterilmektedir.



Şekil 4.14 : Gövde  zerindeki basınç dağılımlı.



Şekil 4.15 : Gövde  zerindeki y^+ dağılımlı.



Şekil 4.16 : Akım hatları.

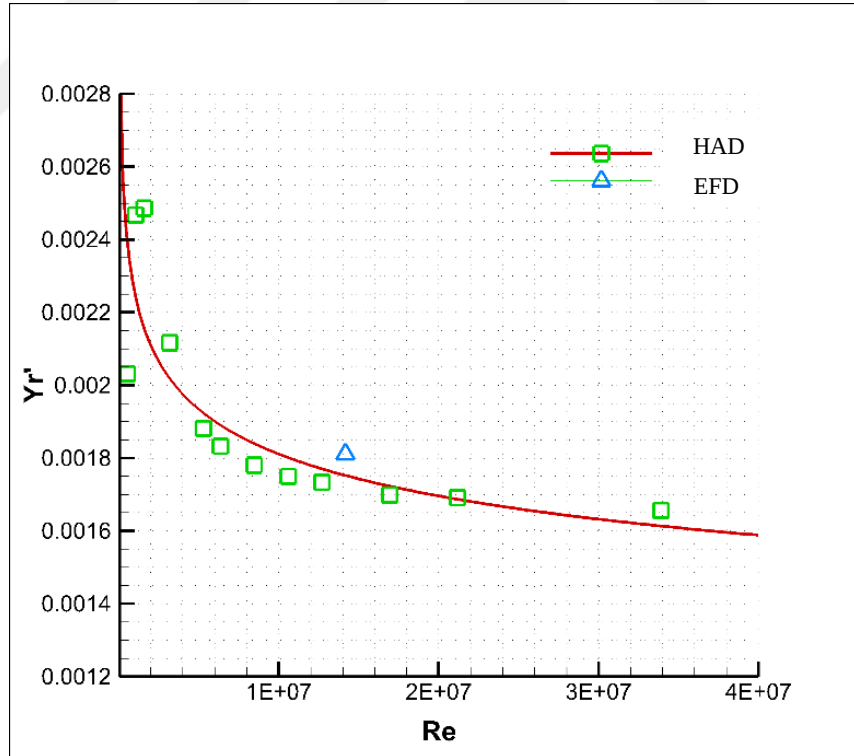
4.3.6 Hidrodinamik katsayılar

Hesaplanan manevra türevleri ve DTRC tarafından yayınlanan deneysel sonuçlar (Roddy, 1990)  izelge 4.9’da sunulduğu gibidir. Statik sürüklenme ile aynı 12 Reynolds sayısını içeren durumda analizler yapılmıştır. Y_r -Reynolds sayısı grafiği

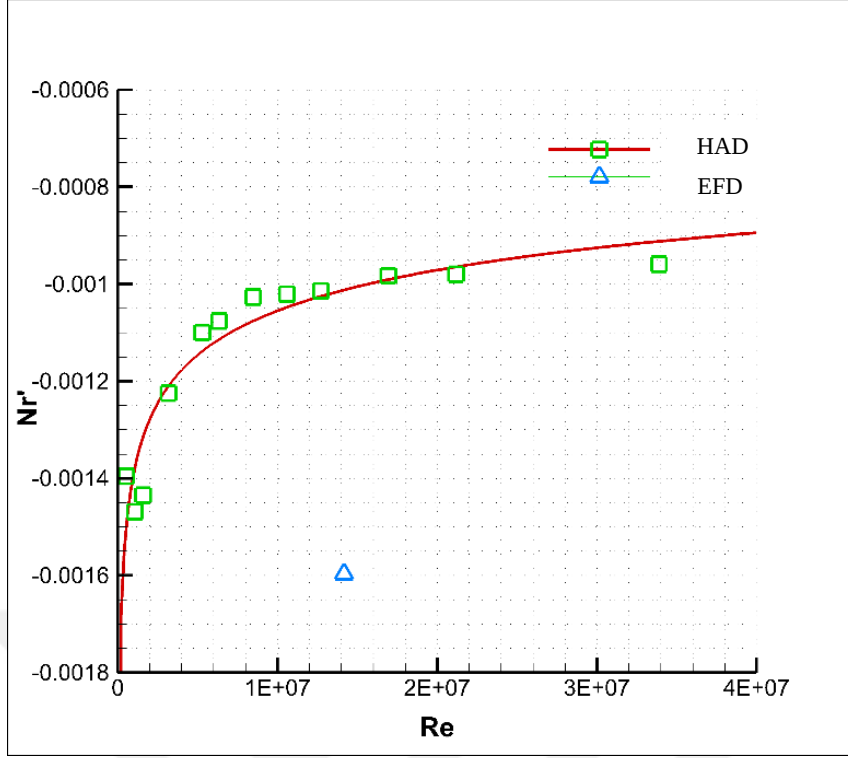
Şekil 4.17’de ve N_r' -Reynolds sayısı grafiği Şekil 4.18’de gösterildiği gibidir. Bu şekillerde ayrıca deneysel veriler de işaretlenmiştir.

Çizelge 4.9 : Safi savrulma ile elde edilen lineer hidrodinamik katsayılar.

	L_{pp}	U_0	Re	Y_r'	N_r'
1.Durum	4.261	1.50	6.36E+06	0.001832	-0.001076
2.Durum	2.130	1.50	3.18E+06	0.002116	-0.001225
3.Durum	8.522	1.50	1.27E+07	0.001733	-0.001014
4.Durum	4.261	2.50	1.06E+07	0.001749	-0.001021
5.Durum	2.130	2.50	5.30E+06	0.001881	-0.001100
6.Durum	8.522	2.50	2.12E+07	0.001691	-0.000980
7.Durum	4.261	4.00	1.70E+07	0.001698	-0.000983
8.Durum	2.130	4.00	8.48E+06	0.001780	-0.001027
9.Durum	8.522	4.00	3.39E+07	0.001656	-0.000959
10.Durum	1.065	1.00	1.06E+06	0.002467	-0.001469
11.Durum	2.130	0.25	5.30E+05	0.002031	-0.001396
12.Durum	2.130	0.75	1.59E+06	0.002486	-0.001435
EFD	4.261	3.34	1.42E+07	0.001811	-0.001597



Şekil 4.17 : Safi savrulmada Re - Y_r' dağılımı.



Şekil 4.18 : Safi savrulmada Re-N_r' dağılımı.

Veriler eğri çizdirme tekniği kullanılarak en uygun denklemlere oturdulduğunda denklem 4.5 ve denklem 4.6 elde edilmiştir. Bu iki denkleme dayanarak, DARPA'nın çıplak gövde formunun Reynolds sayısı mevcutsa, Y_r' ve N_r' hesaplanabilmektedir.

$$Y_r' = -0.0001890118 \ln(\text{Re}) + 0.004868874 \quad (4.5)$$

$$N_r' = 0.0001419491 \ln(\text{Re}) - 0.003349958 \quad (4.6)$$

5. DEĞERLENDİRME

Askeri projeler içerisinde denizaltılar, şüphesiz sahip oldukları özgün tasarım özellikleriyle hem diğer askeri su araçlarından hem de çeşitli amaçlarla kullanılan diğer su araçlarından pek çok noktada ayrılmaktadır. Denizaltılar özellikle I. Dünya Savaşı'ndan itibaren caydırıcı güç amacıyla yoğun olarak kullanılmıştır. Holland, U-35 sınıfı ve tip XXI U-botları, Albacore, Skipjack gibi denizaltı tasarımında kilometre taşı olmuş denizaltılar, geçmişte birçok tasarıma ilham kaynağı olsalar da günümüzde modern tip denizaltılara ihtiyaç duyulmaktadır.

Su altı performansının kritik bir öneme sahip olduğu denizaltıların optimum su altı performansını sağlamak amacıyla hidrodinamik katsayıların belirleneceği hidrodinamik analizlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Geleneksel olarak, bu hidrodinamik katsayılar bir dizi statik sürüklenme testi ve döner kol testi ile belirlenmektedir (Go ve Ahn, 2019). Hidrodinamik analizler içerisinde manevra kabiliyeti, özellikle su altı araçları için, aracın uygun şekilde idare edilmesini ve güvenliğini sağlamak için en önemli tasarım parametrelerinden biridir.

Hidrodinamik analizlerin gerçekleştirilmesi amacıyla kullanılan bazı yöntemler bulunsa da ampirik yöntemler, deneysel yöntemler ve HAD yöntemi literatürde en yaygın olarak kullanılan üç yöntem olarak ifade edilebilir. Ampirik yöntemler ön dizayn aşamasında fikir vermesi amacıyla kullanılan formülasyona dayalı yüzeysel bir yöntemdir. Bu yöntemin uygulanabilmesi için yöntemin önerdiği sınırlar içerisinde kalınmalıdır. Aksi takdirde doğru sonuçlar elde etme ihtimali çok düşüktür. Denizaltı gibi spesifik tasarımların hidrodinamik analizleri için ise ampirik formülasyonlar bulmak zordur. Deneysel yöntemler hidrodinamik analizler için oldukça kullanışlıdır ve hidrodinamik katsayıların belirlenmesine yönelik yöntemler arasında en güvenilir yöntem olarak özellikle kısıtlanmış model test yöntemi kabul edilmektedir. Kısıtlanmış model testinin avantajı, matematiksel modeldeki tüm doğrusal ve doğrusal olmayan hidrodinamik katsayıları elde edebilmesidir (Liu ve diğ, 2018). Fakat sonuç almanın uzun sürmesi, fiyatlandırma ve deneyleri gerçekleştirecek yetişmiş personel

ihtiyacı en azından ön dizayn aşamasında deneysel yöntemlerin tercih edilmesini zorlaştırmaktadır. Son yöntem olan HAD ise son zamanlarda gelişim göstermiş ve hesaplama kabiliyetleri ve güvenilirliği artmıştır. İlk ortaya çıktığında sadece havacılık ve uzay ile alakalı mühendislik uygulamalarında kullanılsa da günümüzde birçok modern mühendislik uygulamalarında karşılaşılan karmaşık problemlerin çözümü için yaygın olarak kullanılmaktadır (Tu ve diğ., 2018). Akışkanlar mekaniği ve ısı transferinden türeyen bu yöntem imalat, kimya, inşaat, çevre, makine ve gemi inşa mühendisliği alanlarında kullanılmaktadır. Gemi inşa içerisinde form optimizasyonu, direnç bileşenlerinin bulunması, takıntı ve pervane tasarımı, akustik analiz, yumru baş tasarımı, boru devrelerindeki akışlar gibi birçok amaçla kullanılmaktadır (Özdemir, 2007). Öte yandan manevra kabiliyetlerinin tespit edilebilmesi amacıyla hidrodinamik katsayıları tahmin etmek ve hem modelde hem de tam ölçekte serbest çalışan simülasyonlar için deneysel verilerin yerini alma konusunda büyük umut vaat etmektedir (Yoon ve diğ., 2015). HAD kabiliyetleri ve hesaplama gücündeki son gelişmelerle birlikte araştırmacılar, HAD kullanarak manevra kabiliyeti ile ilgili sorunları araştırmaya büyük ilgi göstermişlerdir.

Gerçekleştirilecek olan HAD analizleri vasıtasıyla gövde eksen takımında elde edilen değerlerin kullanılıp hidrodinamik katsayıların tahmin edilebilmesi için bir matematik model kabulü yapmak gerekmektedir. Literatürde Abkowitz modeli ve Manevra Modelleme Grubu modeli olmak üzere iki tip matematik model kullanılmaktadır. Abkowitz modelinde su aracı bir bütün olarak ele alınmakta ve hidrodinamik kuvvet ve momentlerin hesabında lineer olmayan yaklaşım kullanılmaktadır. MMG modeli, hidrodinamik kuvvetleri ve momentleri çıplak gövde, dümen ve pervane olmak üzere üç bileşene ayırmakta ve bu üç bileşen arasındaki etkileşimi de göz önünde bulundurmaktadır (Chen ve diğ., 2022). Tez kapsamında MMG matematik modeli kullanılmış ve hidrodinamik katsayılar bu model yardımıyla hesaplanmıştır.

Bu tez çalışmasında literatürde daha önce birçok çalışması bulunan AFF-1 konfigürasyonu olarak adlandırılan ve jenerik bir denizaltı formu olan DARPA geometrisinin çıplak gövde formu incelenmiştir. Çalışma, ölçeğin manevra türevleri üzerindeki etkilerini çeşitli Reynolds sayıları kullanarak araştırmaktadır. Bu formun uzunluğu ve hızı ölçeklendirilerek, HAD yardımıyla 12 farklı Reynolds sayısında statik sürüklenme ve safi savrulma simülasyonları yapılmıştır. Bu simülasyonlardan

lineer hidrodinamik katsayılar hesaplanmış ve Reynolds sayısı ile manevra türevleri arasında logaritmik bağıntılar kurmak amacıyla kullanılmıştır. Son olarak, HAD yardımıyla hesaplanan lineer hidrodinamik katsayılar daha önce yayınlanmış deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. HAD sonucunda belirlenen hidrodinamik katsayıların ve DTRC tarafından yayınlanan deneysel sonuçların karşılaştırması Çizelge 5.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 : EFD ve HAD sonuçlarının karşılaştırması.

	Y_v'	N_v'	Y_r'	N_r'
EFD	-0.005948	-0.012795	0.001811	-0.001597
HAD	-0.006398	-0.013697	0.001756	-0.001013
Sapma	7.6%	7.1%	3.0%	36.6%

Y_v' , N_v' ve Y_r' manevra türevlerinde sonuçlar deneysel sonuçlara çok yakın olmasına rağmen, N_r' katsayısı için EFD ve HAD ve test sonucu arasında fark bulunmaktadır. N_r' 'nin teknenin ağırlık merkezine çok duyarlı olduğu bilinmektedir; bu değerdeki herhangi bir küçük değişiklik, bu hidrodinamik katsayıda büyük bir fark olarak yansıyabilmektedir. Sapmaların, ağırlık merkezi ve atalet momenti gibi geometrik problemlerden kaynaklanıyor olması da mümkündür (Lin ve diğ, 2018). Buna rağmen, bu çalışma hidrodinamik katsayıların Reynolds sayısına bağımlılığını ortaya koymaktadır. Bu nedenle, ölçekli model manevra testlerinden tam ölçeği tahmin ederken dikkatli olunmalıdır. Ölçek etkilerini hesaba katmak için korelasyon teknikleri gerekmektedir. Bazı matematiksel modellerdeki hız değişimi testleri, en son teknolojinin bu eksikliğini gidermeye çalışır, ancak hidrodinamik katsayıların Reynolds sayısının bir fonksiyonu olarak kullanılmasının manevra simülasyonlarının doğruluğunu artıracağına inanılmaktadır.



KAYNAKLAR

- Abdel-latif, S. ve Abdelgeliel, Mostafa ve Zakzouk, E..** (2013). Simulation of ship maneuvering behavior based on the modular mathematical model. 2013 21st Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2013 - Conference Proceedings. 94-99. 10.1109/MED.2013.6608704.
- Abkowitz, M.A.,** (1964). Lectures on ship hydrodynamics – Steering and maneuvering, *Hydro- and Aerodynamics Laboratory Report Hy-5, Lyngby, Denmark.*
- Adegboye, Mutiu ve Fung, Wai-keung ve Karnik, Aditya.** (2019). Recent Advances in Pipelines Monitoring and Oil Leakage Detection Technologies: Principles and Approaches. 10.20944/preprints201905.0041.v1.
- Akram, M. S., ve Guang, P.** (2012). CFD Simulations for Hydrodynamic Derivatives of High Speed Underwater Vehicle. *Applied Mechanics and Materials*, 232,857–862.<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.232.857>
- Arslan S.** (2013). *Su altı araçları için yeni geliştirilen hidrodinamik modelleme yöntemleri kullanılarak otonom bir su altı aracının hidrodinamik karakteristiğinin incelenmesi* (Master's thesis). Istanbul Technical University.
- Asyikin, M. T.** (2012). *CFD Simulation of Vortex Induced Vibration of a Cylindrical Structure* (Master's thesis). Norwegian University of Science and Technology.
- Atta, Talha ve Ali, Zaib ve Ali, Syed ve Uddin, Emad.** (2019). Hydrodynamic design and performance analysis of underwater vehicles using CFD. *AIP Conference Proceedings*. 2116. 030009. 10.1063/1.5113993.
- Azarsina, F.** (2009). Experimental hydrodynamics and simulation of manoeuvring of an axisymmetric underwater vehicle.
- Baykal, R.** (2011). *Gemiler ve Açık Deniz Yapıları*. Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Baykal, R., ve Dikili, A. Cemil.** (2002). *Gemilerin Direnci ve Makina Gücü*. İTÜ Yayınevi, İstanbul.
- Benzohra, A.** (2017). *Numerical Prediction of the Static Hydrodynamic Derivatives using CFD Techniques*. (Unpublished master's thesis). Université de Liège, Liège, Belgique. Retrieved from <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/4413>
- Bertram, V.** (2011). *Practical Ship Hydrodynamics* (2nd ed.). Elsevier Science. Retrieved from <https://www.perlego.com/book/1836083/practical-ship-hydrodynamics-pdf> (Original work published 2011).

- Budak, G.** (2015). *DARPA suboff denizaltı modeli ile bu modelden yeni türetilen formların hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile sayısal direnç hesabı*. (Master's thesis). Istanbul Technical University.
- Budak, G., ve Beji, S.** (2016). Computational resistance analyses of a generic submarine hull form and its geometric variants. *The Journal of Ocean Technology* , 76-86.
- Burcher, R., ve Rydill, L.** (1994). *Concepts in Submarine Design (Cambridge Ocean Technology Series)*. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781107050211.
- Can, M.** (2014). *Numerical simulation of hydrodynamic planar motion mechanism test for underwater vehicles* (Master's thesis). Middle East Technical University.
- Cengel, Y. A., ve Cimbala, J. M.** (2017). *Fluid mechanics: Fundamentals and applications* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Chen, C., Zou, L., Zou, Z., ve Guo, H.** (2022). Assessment of CFD-Based Ship Maneuvering Predictions Using Different Propeller Modeling Methods. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(8), 1131. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/jmse10081131>.
- Christley J, ve Bryan T.** (2007). *US Nuclear Submarines: The Fast Attack*. Osprey Publishing, USA.
- Çavdar, F. ve Bal, Ş.** (2022). An investigation of hydrodynamic maneuvering derivatives and horizontal stability of DARPA suboff depending on depth. *Gemi ve Deniz Teknolojisi* , (221) , 42-58 . DOI: 10.54926/gdt.1084413
- Delefortrie, G., Geerts, S., ve Vantorre, M.** (2016). The towing tank for manoeuvres in shallow water (K. Uliczka, C.-U. Böttner, M. Kastens, K. Eloot, G. Delefortrie, M. Vantorre, E. Lataire, Eds.). https://doi.org/10.18451/978-3-939230-38-0_27
- Duman, S.** (2016). *Investigation of turning performance of a surface combatant with URANS* (Master's thesis). Istanbul Technical University.
- Feldman, J.** (1979). DTNSRDC revised standard submarine equations of motion.
- Friedman, N.** (1984). *Submarine Design and Development*. UK, Conway Maritime.
- Gabler, U.** (1986). *Submarine Design*. Bernard ve Graefe, Germany.
- Go, Gwangsoo ve Ahn, Hyung.** (2019). Hydrodynamic derivative determination based on CFD and motion simulation for a tow-fish. *Applied Ocean Research*. 82. 191-209. 10.1016/j.apor.2018.10.023.
- Griffin, M.J.** (2002). *Numerical prediction of the maneuvering characteristics of submarines operating near the free surface*. (Doctoral thesis). Massachusetts Institute of Technology
- Groves, N.C., Huang, T.T., ve Chang, M.S.** (1989). Geometric Characteristics of DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) SUBOFF Models (DTRC Model Numbers 5470 and 5471).

- Hajivand, Ahmad ve Mousavizadegan, S.** (2015). Virtual simulation of maneuvering captive tests for a surface vessel. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 7. 10.1515/ijnaoe-2015-0060.
- Han, J.-H., Jeong, J.-H., Lee, S.-B., Jang, K.-Y., ve Lee, S.-K.** (2017). Dynamic Stability Analysis of a Submarine by Changing Conning Tower Position and Control Planes. *Journal of Navigation and Port Research*, 41(6), 389–394. <https://doi.org/10.5394/KINPR.2017.41.6.389>
- Han, Kunyu ve Cheng, Xide ve Liu, Zuyuan ve Huang, Chenran ve Chang, Haichao ve Yao, Jianxi ve Tan, Kangli.** (2021). Six-DOF CFD Simulations of Underwater Vehicle Operating Underwater Turning Maneuvers. *Journal of Marine Science and Engineering*. 9. 1451. 10.3390/jmse9121451.
- He, S., Kellett, P., Yuan, Z., Incecik, A., Turan, O., ve Boulougouris, E.** (2016). Manoeuvring prediction based on CFD generated derivatives. *Journal of Hydrodynamics*, 28, 284-292.
- Iaccarino, Gianluca.** (2001). Predictions of a Turbulent Separated Flow Using Commercial CFD Codes. *Journal of Fluids Engineering-transactions of The Asme - J FLUID ENG.* 123. 10.1115/1.1400749.
- Islam, Hafizul ve Rahaman, Md ve Afroz, Laboni ve Akimoto, Hiromichi.** (2018). Estimation of linear hydrodynamic derivatives of a VLCC using static drift simulation. *AIP Conference Proceedings*. 1980. 040021. 10.1063/1.5044331.
- ITTC Manoeuvring Committee.** (2014). Final report and recommendations to the 27th ITTC. *Proceedings of the 27th International Towing Tank Conference, Copenhagen, Denmark*.
- Jackson, Capt. H.A.** (1993), The Influence of the USS Albacore on Submarine Design, Paper 2, *Int. Symp. on Naval Submarines, Warship '93, RINA, London*.
- Janardhanan, Sheeja ve Poojari, Deepti ve R, Kar.** (2014). Maneuverability Assessment of a Container Ship using Steady RANS Method.
- Joubert, P.N.** (2004). *Some Aspects of Submarine Design Part 1. Hydrodynamics*.
- Kahramanoglu, E.** (2023). Numerical investigation of the scale effect on the horizontal maneuvering derivatives of an underwater vehicle. <https://ssrn.com/abstract=4280314>
- Karwatka.** (2010). John Holland and the U.S. Navy's First Submarine. *Technology's Past*.
- Kırıkbaş, O., Kınacı, Ö. K., ve Bal, Ş.** (2021a). Su Altı Araçlarının Manevra Karakteristiklerinin Değerlendirilmesi-II: Akışkan Sınırlarının Etkileri. *Gemi ve Deniz Teknolojisi* , vol.0, no.220, 135-174.
- Kırıkbaş, O., Kınacı, Ö. K., ve Bal, Ş.** (2021b). Sualtı Araçlarının Manevra Karakteristiklerinin Değerlendirilmesi-I: Manevra Analizlerinde Kullanılan Yaklaşımlar. *Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi* , vol.219, 6-58.

- Kim, M.-G., Ahn, H. T., Lee, J.-T., ve Lee, H.-G.** (2014). Fully Unstructured Mesh based Computation of Viscous Flow around Marine Propellers. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea. The Society of Naval Architects of Korea*. <https://doi.org/10.3744/snak.2014.51.2.162>
- Kükner, A. , Duran, A. ve Çınar, T.** (2016). Investigation of Flow Distribution Around A Submarine. *Journal of Naval Sciences and Engineering* , 12 (2) , 1-26. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/jnse/issue/26764/281644>
- Largess, R.P., ve Mandelblatt, J.L.** (1999). *U.S.S. Albacore: Forerunner of the Future*. Portsmouth, NH: The Portsmouth Marine Society.
- Le, T.-L., ve Hong, D.-T.** (2021). Computational Fluid Dynamics Study of the Hydrodynamic Characteristics of a Torpedo-Shaped Underwater Glider. *Fluids*, 6(7), 252. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/fluids6070252>
- Lin, Yu-Hsien ve Tseng, Shao-Huang ve Chen, Yen-Hung.** (2018). The experimental study on maneuvering derivatives of a submerged body SUBOFF by implementing the Planar Motion Mechanism tests. *Ocean Engineering*. 170. 120-135. 10.1016/j.oceaneng.2018.10.015.
- Liu, H.L., ve Huang, T.T.** (1998). Summary of DARPA Suboff Experimental Program Data.
- Loh, S. P.** (2004). *Hydrodynamic coefficients of manoeuvring for small vessels* (Master's thesis). Universiti Teknologi Malaysia.
- Matusiak, Jerzy.** (2021). *Dynamics of a Rigid Ship - with applications*, 3rd edition.
- Menter, F.R.** (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, Vol. 32, pp. 1598-1605.
- Mitra, A., Panda, J. P., ve Warrior, H. V.** (2021). The hydrodynamic characteristics of Autonomous Underwater Vehicles in rotating flow fields.<http://arxiv.org/abs/2104.13328>
- Moonesun, M. ve Korol, Yuriy ve Nikrasov, Valeri ve Brajhko, Anna ve Ursolov, Aleksandr.** (2016). CFD analysis of the bow shapes of submarines. *The Journal of Scientific and Engineering Research*. 3. 1-16.
- Moonesun, M., Korol, Y.M., ve Dalayeli, H.** (2015). CFD Analysis on the Bare Hull Form of Submarines for Minimizing the Resistance. *International Journal of Maritime Technology*. http://ijmt.ir/browse.php?a_code=A-10-450-1&sid=1&slc_lang=en
- Mostafapour, Karim ve Nouri, N. ve Zeinali, Marhamat.** (2018). The Effects of the Reynolds Number on the Hydrodynamics Characteristics of an AUV. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 11. 343-352. 10.29252/jafm.11.02.28302.
- Newman J.** (2017). *Marine Hydrodynamics*. The MIT Press, USA.
- Ogawa, A., ve Kasai, H.** (1978). On the mathematical model of manoeuvring motion of ships. *International shipbuilding progress*, 25, 306-319.

- Özdemir Y.** (2007). *Gemi Etrafındaki Akışın Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi Kullanılarak İncelenmesi* (Master's thesis). Yıldız Technical University.
- Pan, Yu-cun ve Zhou, Qi-Dou ve Zhang, Huai-Xin.** (2015). Numerical simulation of rotating arm test for prediction of submarine rotary derivatives. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B.* 27. 10.1016/S1001-6058(15)60457-7.
- Panda, J. ve Mitra, Arindam ve Warrior, Hari.** (2020). A review on the hydrodynamic characteristics of autonomous underwater vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M Journal of Engineering for the Maritime Environment.* 10.1177/1475090220936896.
- Petillon, Francois ve Bordier, Luc ve Dauce, Frederic ve Maisonneuve, Jean Jacques ve Nedellec, Alain.** (2019). Underwater vehicle manoeuvring: integration of CFD in the design process. 1-10. 10.1109/OCEANSE.2019.8867522.
- Racine, B., ve Paterson, E.** (2005). CFD-based method for simulation of marine-vehicle maneuvering. 10.2514/6.2005-4904.
- Ray, A., ve Singh, S., ve Seshadri, V.** (2009). Evaluation of linear and nonlinear hydrodynamic coefficients of underwater vehicles using CFD. 10.1115/OMAE2009-79374.
- Renilson, Martin.** (2018). *Submarine Hydrodynamics*. 10.1007/978-3-319-79057-2. Springer, Cham.
- Roddy, R.F.** (1990). Investigation of the stability and control characteristics of several configurations of the DARPA suboff model (DTRC Model 5470) from captive-model experiments.
- Sedini, Aicha ve Saidi, Fethi ve Abdellah, Mokhtari ve Laffane, Zakarya.** (2019). Optimization and Analysis of the Hydrodynamic Coefficients for an Underwater Vehicle (UV). *WSEAS Transactions on Fluid Mechanics.* 14. 154-161.
- Shenoi, R., ve Krishnankutty, P. ve Selvam, Panneer.** (2013). Prediction of maneuvering coefficients of a container ship by numerically simulating HPMM using RANSE based solver.
- Sukas, Ö. F., Kınacı, Ö. K., ve Bal, Ş.** (2017a). Gemilerin manevra performans tahminleri için genel bir değerlendirme 1. *Gemi ve Deniz Teknolojisi* , vol.23, no.210, 37-75.
- Sukas, Ö. F., Kınacı, Ö. K., ve Bal, Ş.** (2017b). Gemilerin manevra performans tahminleri için genel bir değerlendirme 2. *Gemi ve Deniz Teknolojisi* , vol.23, 76-105.
- Sukas, O. F., Kinaci, Ö. K., ve Bal, Ş.** (2019). System-based prediction of maneuvering performance of twin-propeller and twin-rudder ship using a modular mathematical model. *Applied Ocean Research* , vol.84, 145-162.
- Suzuki, H., Sakaguchi, J., Inoue, T., Watanabe, Y., ve Yoshida, H.** (2013). Evaluation of methods to Estimate Hydrodynamic Force Coefficients

of Underwater Vehicle based on CFD. *IFAC Proceedings Volumes*, 46, 197-202.

- TMMOB Gemi Mühendisliği El Kitabı.** (2011). Gemi Mühendisleri Odası Yayınları, İstanbul
- Triantafyllou S., ve Hover S.** (2003). *Manoeuvring and control of marine vehicles*, Department of Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts USA.
- Tu, J., Yeoh, G.H., ve Liu, C.** (2018). *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*. UK, Butterworth-Heinemann.
- Uşar, D.** (2007). *Manevra Simülasyonları İle Yarı Ampirik Tahmin Yöntemlerinin Karşılaştırılması* (Master's thesis). Istanbul Technical University.
- Vaz, G., ve Toxopeus, S., ve Holmes, S.** (2010). Calculation of manoeuvring forces on submarines using two viscous-flow solvers. *Proceedings of the international conference on offshore mechanics and arctic engineering - OMAE*. 6. 10.1115/OMAE2010-20373
- Viviani, Michele ve Bonvino, C. ve Depascale, R. ve Conti, F. ve Soave, M.** (2007). Identification of hydrodynamic coefficients from standard manoeuvres for a series of twin-screw ships. *Proceedings, 2nd International Conference on Marine Research and Transportation (ICMRT)*. 99-108.
- Wang, H., ve Zhai, Z.** (2012). Analyzing grid independency and numerical viscosity of computational fluid dynamics for indoor environment applications. *Building and Environment*. 52. 107-118. 10.1016/j.buildenv.2011.12.019.
- Yasukawa, H., ve Yoshimura, Y.** (2015). Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions. *Journal of Marine Science and Technology*, 20, 37-52.
- Yi Liu, Lu Zou, Zaojian Zou ve Haipeng Guo** (2018) Predictions of ship maneuverability based on virtual captive model tests, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 12:1, 334-353, DOI: 10.1080/19942060.2018.1439773
- Yoon, H.** (2009). *Phase-averaged stereo-PIV flow field and force/moment/motion measurements for surface combatant in PMM maneuvers*. (Doctoral thesis). The University of Iowa
- Yoon, H., Simonsen, C.D., Benedetti, L., Longo, J., Toda, Y., ve Stern, F.** (2015). Benchmark CFD validation data for surface combatant 5415 in PMM maneuvers – Part I: Force/moment/motion measurements. *Ocean Engineering*, 109, 705-734.
- Zheng, H., Wang, X., ve Xu, Z.** (2017). Study on hydrodynamic performance and CFD simulation of AUV. *2017 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*, 24-29.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Furkan KIYÇAK

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2020, İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2021 Yılı Haziran ayı itibari ile Kuasar Marin bünyesinde Gemi İnşa Mühendisi olarak çalışmaktadır.
- 2020 yılında lisans bölümünü ikincilik derecesiyle tamamlamıştır.

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Kıyçak, F. ve Kınacı, Ö. K. (2023).** Scale effect on the linear hydrodynamic coefficients of DARPA suboff . *Journal of Naval Sciences and Engineering* , 19 (1) , 53-76 . DOI: 10.56850/jnse.1250094