İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DARPA DENİZALTI MODELİNDE DERİNLİĞE BAĞLI OLARAK DEĞİŞEN HİDRODİNAMİK MANEVRA TÜREVLERİNİN VE YATAY STABİLİTENİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Furkan ÇAVDAR

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Programı

NİSAN 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DARPA DENİZALTI MODELİNDE DERİNLİĞE BAĞLI OLARAK DEĞİŞEN HİDRODİNAMİK MANEVRA TÜREVLERİNİN VE YATAY STABİLİTENİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Furkan ÇAVDAR
(508191008)

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şakir BAL

NİSAN 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 508191008 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Furkan ÇAVDAR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "DARPA DENİZALTI MODELİNDE DERİNLİĞE BAĞLI OLARAK DEĞİŞEN HİDRODİNAMİK MANEVRA TÜREVLERİNİN VE YATAY STABİLİTENİN İNCELENMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Şakir BAL** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Muhsin AYDIN** Yıldız Teknik Üniversitesi	.....
	Doç. Dr. Uğur Oral ÜNAL İstanbul Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : 26 Mart 2022
Savunma Tarihi : 20 Nisan 2022

Eşime ve kardeşime,

ÖNSÖZ

Öncelikle tez danışmanım Prof. Dr. Şakir BAL'a yüksek lisans eğitim hayatıma kattıkları ve çalışma alanımda yol gösterdiği için teşekkür ederim. Bunun yanında beni sürekli araştırmaya yönlendiren ve teknik konularda motive eden iş arkadaşım sayın Fatih ARUK Bey'e teşekkür ederim.

Eğitim ve öğretim hayatımın ilk gününden beri benim için çabalayan, benden maddi ve manevi imkanlarını esirgemeyen biricik ögretmenlerim annem ve babama sonsuz teşekkürlerimi sunarım. İyi ve kötü günleri beraberce yaşadığımız en kıymetli hayat arkadaşım eşime ve biricik kardeşime teşekkür ederim.

Nisan 2022

Furkan ÇAVDAR
(Makina ve Elektrik 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 Tezin Amacı 1
1.2 Literatür Taraması 2
1.2.1 Doğrusal hidrodinamik türevler 4
1.2.2 Darpa denizaltı modeli analiz çalışmaları 5
2. HESAPLAMALI MODEL 7
2.1 Hesaplamalı Model Parametreleri 7
2.1.1 Hesaplamalı modelde kullanılan ağ yapısı modelleri 7
2.1.2 Hesaplamalı modelde kullanılan fizik modelleri 8
2.1.3 Hesaplamalı modelde kullanılan sınır koşulları 9
2.1.3.1 Hız girişi 9
2.1.3.2 Basınç çıkışı 9
2.1.3.3 Simetri 9
2.2 Fiziksel Model Parametreleri 10
2.2.1 C4 modeli 10
2.2.2 C2 modeli 11
2.2.3 Boyutsuzlaştırma Parametreleri 12
2.3 Vakalar 12
2.3.1 Statik sürüklenme vakaları 13
2.3.2 Saf sapma vakaları 15
3. ANALİZ DOĞRAMALARI VE GEÇERLEMELERİ 19
3.1 Analiz Doğrulama Planı 19
3.2 Analiz Hacmini Belirleme 20
3.3 Ağ Yapısı ve Ağdan Bağımsızlık Çalışması 20
3.4 Analiz Zaman Adımları Belirleme Çalışması 24
3.5 Analiz Süresi Belirleme Çalışması 24
3.6 Türbülans Modelleri Geçerleme Çalışması 25
3.7 Deney Verileri 26
3.8 C4 Takıntı Modeli 27
3.9 C2 Takıntı Modeli 29
4. HİDRODİNAMİK TÜREV ÇALIŞMALARI 31
4.1 Hidrodinamik Model 31

4.2 Hidrodinamik Türevlerin Derinliğe Göre Değişmesindeki Fizik 32
4.3 Farklı Derinliklerde Doğrusal Türevlerin Tespiti 35
4.3.1 X_0 35
4.3.2 X_v 35
4.3.3 X_d 36
4.3.4 X_δ 36
4.3.5 Y_v 37
4.3.6 Y_r 37
4.3.7 Y_δ 38
4.3.8 N_v 38
4.3.9 N_r 39
4.3.10 N_δ 39
4.4 Derinlikle Değişen Katsayılara Eğri Türetme 40
4.5 Yatay Stabilite Sayısı (G_h) 43
4.6 Katsayı Eğrilerinin Ve Gh Sayısının Doğrulanması 44
4.7 Derinliğe Bağlı Değişen Türevlerin ve Stabilitenin Değerlendirilmesi 46
5. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI 47
5.1 Üç Serbestlik Dereceli Hareket Denklemleri 47
5.2 Statik Stabilite Cevabı 49
5.3 Dinamik Sistem Manevra Çalışmaları 50
5.3.1 Doğrusal hız karakteristiği 51
5.3.2 Dönme çapı ve hız düşüş değeri 51
6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER 53
KAYNAKLAR 55
EKLER…… 59
ÖZGEÇMİŞ 63

KISALTMALAR

C2 **:** Gövde, Yelken ve Kıç Takıntılar Takıntı Modeli
C4 **:** Gövde ve Yelken Takıntı Modeli
CAD **:** Bilgisayar Destekli Tasarım
DARPA **:** The Defense Advanced Research Projects Agency
DSM **:** DARPA Suboff Modeli
DTRC **:** David Taylor Araştırma Merkezi
HAD **:** Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
LES **:** Büyük Eddy Simülasyonları
PMM **:** Düzlemsel Hareket Mekanizması
RANS **:** Reynolds Ortalama Navier Strokes Denklemleri
VOF **:** Hacmi Serbest Yüzey Modelleme Metodu

SEMBOLLER

D : DARPA denizaltı çapı

Gh : Yatay stabilite sayısı

Gv : Dikey stabilite sayısı

Iz : DARPA denizaltı savrulma eylemsizlik momenti

L : DARPA denizaltı modeli boyu

m : DARPA denizaltı kütlesi

N : Denizaltı savrulma moment bileşeni

$\mathbf{N_r}$: N momentinin r savrulma hızına göre birinci mertebe türevi katsayısı

$\mathbf{N_v}$: N momentinin v hızına göre birinci mertebe türevi katsayısı

$\mathbf{N_\delta}$: N momentinin dümen momenti etkisi katsayısı

r : Denizaltı savrulma açısal hızı

u : Denizaltı boyuna hızı

v : Denizaltı yanal hızı

X : Denizaltı boyuna kuvvet bileşeni

$\mathbf{X_0}$: X düzlemindeki denizaltı direnci katsayısı

$\mathbf{X_d}$: X düzlemindeki derinlik etkisi katsayısı

$\mathbf{X_v}$: X kuvvetinin v hızına göre birinci mertebe türevi katsayısı

$\mathbf{X_\delta}$: X düzlemindeki dümen kuvveti etkisi katsayısı

Y : Denizaltı yanal kuvvet bileşeni

$\mathbf{Y_r}$: Y kuvvetinin r savrulma hızına göre birinci mertebe türevi katsayısı

$\mathbf{Y_v}$: Y kuvvetinin v hızına göre birinci mertebe türevi katsayısı

$\mathbf{Y_\delta}$: Y düzlemindeki dümen kuvveti etkisi katsayısı

ρ : Deniz yoğunluğu

Δ : Derinlik

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: C2 modeli fiziksel parametreleri. 12
Çizelge 2.2: Boyutsuzlaştırma parametreleri. 12
Çizelge 2.3: DSM modeli için boyutsuzlaştırma terimleri. 12
Çizelge 2.4: Statik sürüklenme vakalarında hız ve ivmeler [18]. 13
Çizelge 2.5: C4 takıntı modeline ait derinliğe bağlı vakalar. 13
Çizelge 2.6: C2 takıntı modeline ait derinliğe bağlı vakalar. 14
Çizelge 2.7: Dümen türevlerinin belirlenmesi için kullanılan vakalar. 15
Çizelge 2.8: Saf sapma analizlerinde model koordinatında hız ve ivmeler [18]. 15
Çizelge 2.9: Saf sapma türevlerinin tespiti için vakalar. 18
Çizelge 3.1: Statik sürüklenme ağ yapısı oluşturma çalışması. 22
Çizelge 3.2: Saf Sapma ağ yapısı oluşturma çalışması. 23
Çizelge 3.3: Ağ modelleri X kuvvetlerinin karşılaştırma yüzde farkları. 23
Çizelge 3.4: Ağ modelleri x doğrultusu karşılaştırma yüzde farkları. 24
Çizelge 3.5: Analiz süreleri karşılaştırma tablosu. 25
Çizelge 3.6: Türbülans modelleri karşılaştırması. 26
Çizelge 3.7: C4 takıntı modeli için X boyutsuz kuvvet karşılaştırmaları. 27
Çizelge 3.8: C4 takıntı modeli için Y boyutsuz kuvvet karşılaştırmaları. 27
Çizelge 3.9: C4 takıntı modeli için N boyutsuz moment karşılaştırmaları. 28
Çizelge 3.10: C4 takıntı modelinde derinliğe bağlı direnç çizelgesi 28
Çizelge 3.11: C2 takıntı modeli için X boyutsuz kuvvet karşılaştırmaları. 29
Çizelge 3.12: C2 takıntı modeli için Y boyutsuz kuvvet karşılaştırmaları. 29
Çizelge 3.13: C2 takıntı modeli için N boyutsuz moment karşılaştırmaları. 30
Çizelge 4.1: X_0 boyutsuz kuvvet değeri. 35
Çizelge 4.2: Derinliğe ve sürüklenme açısına bağlı X_v boyutsuz kuvvet değerleri... 36
Çizelge 4.3: Derinliğe bağlı X_d boyutsuz kuvvet değerleri. 36
Çizelge 4.4: Derinliğe ve dümen açısına göre X_δ boyutsuz kuvvetleri. 37
Çizelge 4.5: Derinliğe ve sürüklenme açısına göre Y_v boyutsuz kuvvetleri. 37
Çizelge 4.6: Derinliğe ve savrulma açısına göre Y_r boyutsuz kuvvetleri. 38
Çizelge 4.7: Derinliğe ve dümen açısına göre Y_δ boyutsuz kuvvetleri. 38
Çizelge 4.8: Derinliğe ve sürüklenme açısına göre N_v boyutsuz momentleri. 39
Çizelge 4.9: Derinliğe ve savrulma açısal hızına göre N_r boyutsuz momentleri. 39
Çizelge 4.10: Derinliğe ve dümen açısına göre N_δ boyutsuz momentleri. 40
Çizelge 4.11: Boyutsuz katsayıların derinliğe göre sayısal değerleri. 41
Çizelge 4.12: Derinliğe bağlı Gh değerleri. 44
Çizelge 4.13: Derin su katsayılarının deney verisi ile karşılaştırması. 45
Çizelge 4.14: Derinliğe bağlı türevlerin deney verisi ile karşılaştırılması. 45
Çizelge 4.15: Derinliğe bağlı yatay stabilite değeri deney verisi ile karşılaştırması. 46
Çizelge 5.1: Denizaltı serbestlik derecelerine ait semboller. 47
Çizelge 5.2: DSM modeli için ek su kütleleri. 48
Çizelge 5.3: Derinliğe bağlı hız düşüm yüzdesi. 51
Çizelge 5.4: Derinlik ve dümen açısına göre dönme çapı (Dd/L) 51

Çizelge 5.5: 10 derece dümen açısı için v ve r boyutsuz büyüklükleri. 52
Çizelge 5.6: Dümen açısı ve derinliğe göre yüzde hız düşümü. 52

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Tez amacının özeti..... 2
Şekil 2.1: DSM gövde ve yelken geometrileri. 10
Şekil 2.2: C4 modeli 3D CAD görseli. 10
Şekil 2.3: C2 modeli ve dümen takıntısı 3D CAD görseli. 11
Şekil 2.4: C2 modeli fiziksel parametreleri 11
Şekil 2.5: Statik sürüklenme testi örnek görseli [18]. 13
Şekil 2.6: Saf sapma analizlerinin temsili görseli [18]. 15
Şekil 3.1: DSM derinlik tanımı görseli. 19
Şekil 3.2: DSM modeli örnek ağ yapısı 1.1D derinlik. 21
Şekil 4.1: 1.1D derinlikte 0 sürüklenme açılı DSM dalga profili. 33
Şekil 4.2: 2.2D derinlikte 0 sürüklenme açılı DSM dalga profili. 33
Şekil 4.3: 3.3D derinlikte 0 sürüklenme açılı DSM dalga profili. 34
Şekil 4.4: 1.1D derinlikte 4 sürüklenme açılı DSM dalga profili. 34
Şekil 4.5: Derinliğe göre değişen katsayılara türetilmiş eğriler. 40
Şekil 4.6: Katsayılar için derinlik değişim eğrileri. 42
Şekil 4.7: Derinliğe bağlı yatay stabilite eğrisi. 44
Şekil 5.1: Denizaltı için üç serbestlik dereceli sistem 48
Şekil 5.2: Boyutsuz 1 yanal hızı ile başlayan statik stabilite testi. 49
Şekil 5.3: Boyutsuz 1 savrulma açısal hızı ile başlayan statik stabilite testi. 50

DARPA DENİZALTI MODELİNDE DERİNLİĞE BAĞLI OLARAK DEĞİŞEN HİDRODİNAMİK MANEVRA TÜREVLERİNİN VE YATAY STABİLİTENİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu tezde DARPA Denizaltı geometrisinin derinliğe göre değişen hidrodinamik manevra türevleri tespit edilmiş ve derinliğe göre değişen yatay stabilitesi incelenmiştir. Denizaltılar, seyir halindeyken dip ve yüzey (serbest yüzey) etkilerinden kaçınılması tercih edilir. Denizaltıların genellikle radar tarafından tespit edilememe ve yakıt tasarrufu gibi nedenlerle derin sularda seyretmesi gerekir. Ancak denizaltılar her zaman bu koşullarda çalışamayacaklardır, çünkü taze hava gereksinimi ve bataryaların şarj edilmesi gibi sebeplerle şnorkel halde bulunmaları gerekmektedir. Bu nedenle denizaltıların derinliklerde yüzeye yakın hareket ve manevra kabiliyetlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada su yüzeyine yakın derinliklerdeki seyir hareketlerinde oluşacak ilave direncin denizaltı performansına olan etkileri araştırılmıştır. Havuz ve direnç testleri ile deneysel ve HAD analiz çalışmaları doğrulanmış, daha sonra DSM (DARPA SUBOFF MODEL) üzerinde yatay eksende gövde ve dümen geometrilerinin hidrodinamik katsayıları hesaplanmıştır.

Bilindiği üzere, DARPA Denizaltı modeli derin suda yatay stabiliteye sahip değildir. Bu çalışmada, denizaltı modelinin periskop (şnorkel) seyri esnasında veya su yüzeyine yakın hareket ederken yatay stabilitesi 3 serbestlik dereceli olarak tespit edilmiştir. Öncelikle, sistemin matematik modeli hakkında bilgi verilmiş ve denizaltı için ana büyüklükler ve boyutsuzlaştırma terimleri paylaşılmıştır. Denizaltı modeli, üç boyutlu olarak takıntılarıyla birlikte oluşturulmuştur. Üç boyutlu modellerde DARPA tarafında geliştirilen geçen kıç takıntısız model ve kıç takıntılı model kullanılmıştır.

Denizaltı stabilitesi ve hidrodinamik manevra türevleri tespit edilirken farklı yüksekliklerde yanal öteleme kuvvetine ait doğrusal katsayılar ve savrulma açısal momentine ait doğrusal katsayılar kullanılmıştır. Farklı derinlikler 1.1D, 2.2D, 3.3D ve 6D olarak seçilmiştir. Bahsi geçen katsayılar hesaplamalı akışkanlar dinamiği programıyla çeşitli sistematik analizler yapılarak elde edilmiştir. Hesaplamalı analizlerde gerekli doğrulama ve geçerleme çalışmaları da yapılmıştır. Doğrulama çalışmalarında ağdan bağımsızlık çalışması, hacim belirleme çalışması, ortalama Reynolds Navier-Strokes türbülans modelleri karşılaştırması, analiz adımı karşılaştırması, analiz süresi karşılatırması gibi çeşitli analizler yapılmıştır.

Analiz doğrulamaları yapılırken üç boyutlu geometrik modele ait manevra deneysel verileri kullanılmış ve yukarıda da belirtilen takıntısız ve takıntılı kıç olmak üzere iki farklı geometri modeline göre analizler değişik derinliklerde karşılaştırılmış, yüzde farklar olarak ifade edilmiştir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinde elde edilmesi planlanan hidrodinamik türevler boyuna kuvvet katsayıları, yanal kuvvet katsayıları ve savrulma moment katsayıları olarak belirlenmiş olup doğrusal modelde X_0, X_v, X_d, X_δ, Y_v, Y_r, Y_δ, N_v, N_r ve N_δ katsayılarının belirlenmesi amaçlanarak hidrodinamik model oluşturulmuştur. Farklı derinliklere göre elde edilen hidrodinamik

türevler ile yatay stabilitenin tespiti yapılmıştır. Yatay stabilite tespiti dışında dümen kuvvetlerinin etkisini modele eklemek için dümen kuvvet ve moment katsayıları tayin edilmiştir.

Denizaltı modelinin, su yüzeyine yakın seyir durumlarında yatay stabiliyete sahip olduğu ve 4.6D derinlikten itibaren ise yatay stabilitesini kaybettiği bulunmuştur. Daha sonra denizaltı modelinin su yüzeyine yakın manevra performansını anlamak için denizaltı modelinin farklı derinliklerde elde edilen hidrodinamik türevlerine eğriler türetilerek üç serbestlik dereceli manevra simülasyonuna adapte edilmiştir.

Denizaltı modelinde yatay stabilite için bu düzlemdeki kararlılık derecesi gereklidir. Bu problem doğrusal sistem için sayısal olarak çözülmüştür. Tasarlanan model için geçmişte yapılmış uygun çalışmalar mevcuttur. Bu tezde de bu çalışmalar kullanılarak doğrulama ve gerçekleme analizleri yapılmıştır. Doğrusal modelin hidrodinamik katsayı seti, HAD analizlerinden elde edilmiş ve üç serbestlik dereceli manevra simülasyon yönüne bağlı olarak işlenmiştir. Denizaltı modelinin değişen derinliklerine göre farklı katsayılara sahip olduğu görülmektedir.

Manevra simülasyonunda statik ve dinamik manevra cevapları farklı derinliklere göre incelenmiştir. Dinamik manevra analizleri neticesinde hız azalması ve dönme çapı test değerleri elde edilmiştir. Bahsi geçen testler sabit itki kuvveti altında yapılmıştır. Testler sonucunda görülmektedir ki denizaltı su yüzeyine yaklaştıkça hidrodinamik direnç artmakta ve sabit itki altında daha fazla hız azalması ile karşılaşmaktadır. Ayrıca yüzeye yakın seyir halinde yanal öteleme hızına bağlı olarak denizaltının manevra performansında farklılık gözlenmektedir. Testler sonucunda denizaltı su yüzeyine yaklaştıkça hidrodinamik direncinin arttığı ve sabit itme altında daha fazla hız düşüşü ile karşılaştığı görülmüştür. Ayrıca, yüzeye yakın seyir sırasındaki yanal öteleme hızına bağlı olarak denizaltının manevra performansında da bir fark gözlemlenmektedir.

Bu durum, su üstü platformlarının manevra performansı ile kıyaslanmamalıdır. Ancak bu tez çalışmasında bilgi vermek amacıyla denizaltı modeli su üstü platformlarının kriterlerine göre karşılaştırılmıştır. Denizaltı modelinin bu kriterlerden bazılarına uyduğu, bazılarıyla uyumlu olmadığı görülmektedir.

Tezin eklerinde matematiksel modelin türetilmesi verimiştir. Ayrıca tezde deney verilerinde kullanılan ancak tezde yer almayan Y ve N eksenleri ile ilgili değerler de ekler bölümünde paylaşılmıştır. Daha sonra tez çalışması tamamlanmıştır.

Yatay stabilite sayısının kararlı olduğu bölgede, denizaltı manevra performansı ile ters ilişki içinde olduğu bilinmektedir. Bu sebeple çalışmada artan yatay stabilite katsayısına göre yatay stabilitenin kararlı olduğu bölgede manevra performansı değerlendirilmiş olup daha önceki çalışmalara uygun, yatay stabiliye sayısı ve manevra performansı arasındaki ilişki gösterilmiştir. Yatay stabilitenin aşırı kararlı ve kararsız olduğu bölgelerdeki durumların değerlendirilmesi de çalışmanın konularındandır.

Sonuç olarak, DARPA denizaltı modeline ait farklı derinliklerde üç serbestlik dereceli sistem için doğrusal manevra türevleri ve dümen katsayıları belirlenmiştir. DARPA denizaltı modeli için yatay stabilite katsayısı hesaplanmış ve yüzeye yakın seyir halinde yatay stabilitenin mevcut olduğu bulunmuştur. Ayrıca, nodelin yüzeye yakın derinliklerde seyir halindeyken manevra performansı incelenmiş ve farklı derinliklere göre gerekli karşılaştırılmalar verilmiştir.

INVESTIGATION OF HYDRODYNAMIC COEFFICIENTS AND HORIZONTAL STABILITY IN DARPA SUBMARINE MODEL DEPENDING ON DEPTH

SUMMARY

In this thesis, hydrodynamic maneuver derivatives of DARPA Submarine moving at different depths were determined and horizontal stability with different depths was investigated. Submarines generally need to navigate in deep waters for reasons such as not being able to be detected by radar and saving fuel. It should avoid free water surface effects while cruising. However, submarines will not always be able to operate in these conditions. Therefore, it is necessary to determine the movement and maneuvering capabilities of submarines at depths near the surface.

The effects of additional wave resistance (resistance due to the free water surface effects) on the submarine and rudder performance, which will occur during cruising movements at depths close to the free surface, were investigated. The experimental and CFD analysis studies in the literature were confirmed. Then the hydrodynamic coefficients of the submarine hull and rudder geometries were calculated on the horizontal axis on the DSM.

As it is known, the DARPA Submarine model does not have a horizontal stability in deep water. In this study, the horizontal stability of the submarine model during the periscope (snorkel) depth course or while moving close to the free water surface was determined as 3 degrees of freedom.

First, information about the mathematical model of the system has been given and the main dimensions and non-dimensionalization terms for the submarine have been shown in the thesis. The submarine model was created with its appendages in three dimensions. In three-dimensional models, the model with and without the stern appendages were used in the simulations.

While determining the submarine stability and hydrodynamic maneuvering derivatives, linear coefficients of lateral translational force and linear coefficients of yaw angular moment were used at different depths. These depths were chosen as 1.1D, 2.2D, 3.3D and 6D in the analysis. The maneuver derivatives were obtained by performing various systematic analyzes with the computational fluid dynamics program. Necessary validation studies were also carried out in computational analysis. In the validation studies, various analyzes such as network independence study, volume determination study, average Reynolds Navier-Strokes turbulence models comparison, analysis step comparison, analysis time comparison were all made.

While verifying the analysis, the maneuvering experimental data of the model obtained from literature were used, and the analyzes were compared at different depths according to the two different geometry models with and without stern appendages. They were also expressed as percentage differences.

The hydrodynamic derivatives planned to be obtained in computational fluid dynamics analyzes were determined as longitudinal force coefficients, lateral force coefficients and yaw moment coefficients, as well as X_0, X_v, X_d, X_δ, Y_v, Y_r, Y_δ in the linear model. A hydrodynamic model was created with the aim of determining the N_v, N_r and N_δ coefficients. Horizontal stability was determined with the hydrodynamic derivatives obtained according to the different depths. In addition to the horizontal stability, rudder force and moment coefficients were determined to include the effects of rudder forces into the model.

It has been found that the submarine model has a horizontal stability when cruising close to the water surface and loses its horizontal stability for depths greater than 4.6D. Then, in order to understand the maneuvering performance of the submarine model near the water surface, curves were derived (fitted) from the hydrodynamic derivatives of the submarine model obtained at different depths and adapted to the three-degrees-of-freedom maneuvering simulation.

For the horizontal stability in the submarine model, the degree of stability in the horizontal plane is necessary. It should be numerically solved for the correct system. For the designed model, studies were carried out in accordance with those given in the literature. Validation studies were carried out. The hydrodynamic coefficient set of the linear model was checked out and processed by CFD and detected by the directional coefficients. It is found that the submarine model has different coefficients versus its varying depts.

In maneuvering simulation, static and dynamic maneuvering responses were investigated for different depths. Dynamic maneuvering responses can be listed as the speed reduction and turning radius formation tests. The aforementioned tests were carried out under constant thrust. As a result of the tests, it is seen that the hydrodynamic resistance increases as the submarine approaches to the water surface and it has more speed reduction under constant thrust. In addition, a difference has been observed in the maneuvering performance of the submarine, depending on the lateral translational speed in the course of cruising close to the free surface.

The maneuvering results of submarine studies should not be compared with those of surface platforms. However, in this study, the submarine model was compared to the criteria of the surface platforms to provide an insight, there is nothing more than. It is seen that the submarine model complies with some of these criteria and is not compatible with others.

The appendices of the thesis contain the derivation of the mathematical model. In addition, the information about the Y and N axes, which were used in the verification data in the thesis but not included in the thesis, are also presented in the appendices section. Later, the thesis work was completed.

It is known that in the region where the horizontal stability number is stable, it is inversely related to the maneuvering performance of the submarine. For this reason, in the study, the maneuver performance in the region where the horizontal stability is stable according to the increasing lateral stability coefficient was evaluated and the relationship between the number of horizontal stabilizers and the maneuver performance was shown, in accordance with previous studies. Evaluation of the situations in the regions where the horizontal stability is extremely stable and unstable is also one of the subjects of the study.

As a result, linear coefficients and rudder coefficients were determined for the three-degree-of-freedom system at different depths of the DARPA submarine model. The horizontal stability number has been calculated for DARPA submarine model and it has been found that there is a horizontal stability when cruising near to the free surface. The maneuvering performance of the model while cruising at depths close to the surface has been examined and given comparatively according to different depths.

1. GİRİŞ

Denizaltı manevra performansı, acil satıh, dalış, denizaltı yatay ve özellikle şnorkel durumunda yatay ve düşey rota tutabilme yetenekleri açısından çok kritiktir. Özellikle yüzeye yakın hareketlere denizaltılarda hava temini, yakıt bataryalarının şarj edilmesi, GPS konumunun tespiti ve karargah ile haberleşme gibi sebeplerle ihtiyaç duyulmaktadır [1]. Denizaltı hidrodinamik türev/katsayılarının doğru ve hassas tespiti, manevra performans kriterleri hakkında bilgi verici olduğu için önemli hale gelmiştir. Bu sebeple gemi mühendisliğinde sualtı platformlarının hidrodinamik türevlerinin ve katsayılarının hesaplanması çalışmaları birçok çalışmaya konu olmuştur ve artarak devam etmektedir [2].

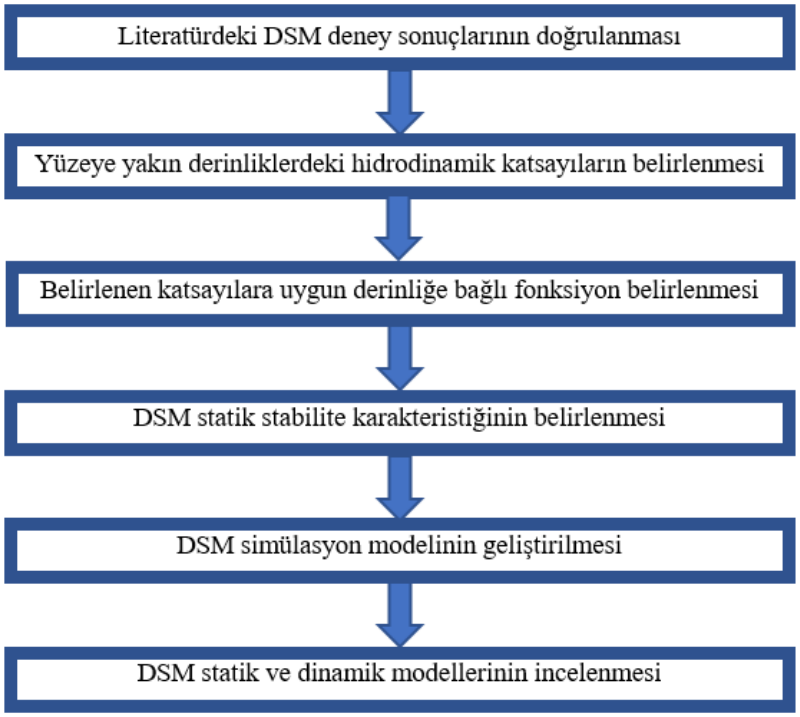
Hesaplanan manevra performans değerlerinin doğrulanması için bazı kurum ve kuruluşların sualtı platform modelleri mevcutur. Amerikan Savunma İleri Araştırma Projeleri Ajansı'nın geliştirmiş olduğu DARPA SUBOFF (The Defense Advanced Research Projects Agency Submarine) projesi bunlardan biridir. Programın amaçlarından biri de, geliştirilen takıntılı ve takıntısız modellerin eksenel simetrik su altı araçlarından DARPA Suboff Modeli (DSM)'ne ait yapılacak havuz deney testlerinin ve/veya HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analizlerinin doğrulama veri havuzunu oluşturmaktır. DSM ile ilgili denizaltı geometri modeli bilgileri ve yine DSM'ye ait deney sonuçları açık kaynak olarak mevcuttur ve birçok çalışmada kullanılmıştır.

Denizaltıların radarla tespit edilememesi, yakıt tasarrufu sağlaması gibi sebeplerle genel olarak derin sularda seyretmesi gerekmektedir. Seyir halinde dip ve satıh (serbest yüzey) etkilerinden kaçınması gerekmektedir. Fakat denizaltılar her zaman bu koşullarda operasyon halinde olamayacaklardır. Bu sebeple, denizaltılar için satıha veya dibe yakın derinliklerdeki hareket/manevra yeteneklerinin belirlenmesi gerekir.

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmada, satıha yakın derinliklerdeki seyir hareketlerinde ortaya çıkacak olan ek direncin (serbest su yüzeyi etkisinden dolayı ortaya çıkan direnç) denizaltı ve dümen

performansına olan etkileri incelenmiştir. Öncelikle, yapılmış olan deney ve HAD analiz çalışmalarının geçerleme çalışmaları yapılmış, daha sonra DSM üzerinde yatay eksende denizaltı gövdesine ve dümen geometrilerine ait hidrodinamik katsayılar hesaplanmıştır. Bu çalışmada hidrodinamik türevler DSM'nin satıha yakın (şnorkel) derinliklerindeki hidrodinamik parametre değişimlerini de göz önüne almaktadır. Bu hidrodinamik katsayılara göre derin suda yatay stabiliteye sahip olmayan DSM'nin yüzeye yakın derinliklerdeki yatay stabilite karakteristiği incelenmiştir. Daha önceki çalışmalarda geliştirilmiş olan denizaltı manevra simülasyon programlarına, DSM için açık kaynak olarak verilen ve derinliğe göre değişen katsayılar kullanılarak DSM özelinde bir simülasyon oluşturulmuştur. Sonuçlar mevcut deney verilerinden elde edilen manevra hareketlerine göre incelenmiştir. Tezin amacı Şekil 1.1'de özetlenmiştir.



Şekil 1.1: Tez amacının özeti.

1.2 Literatür Taraması

DSM, geçmişte ve yakın zamanda birçok çalışmada üzerinde durulan bir modeldir ve deney verilerinin olması, HAD çalışmalarının önünü açmaktadır. Bu bölümde, DSM modeli hidrodinamik türev çalışmaları üzerine literatür çalışmalarında mevcut olan bilgiler özetlenmiştir.

Geçmişte denizaltıların hidrodinamik katsayılarının belirlenmesinde kullanılan yöntemler incelendiğinde ampirik yöntemler, deneysel yöntemler ve HAD yöntemleri olarak sınıflandırmak mümkündür. Farklı denizaltı ve suüstü platformların ampirik yaklaşımların doğrulanmasında kullanılan test sonuçları ve HAD analizleri çalışmaları bulmak mümkündür [3]. Ortak çalışmalarının oluşturulması ve standartların belirlenmesi için bir çok çalışma yapılmıştır. Ortak çalışmalarda kullanılan denizaltı modelleri tanıtılmış (DRDC STR ve DTMB 5484 gibi) ve standart manevra testleri tanımlanmıştır [4]. Denizaltıların kullanımının artması, resif madenciliği ve petrol arama gibi uygulamalarla birlikte denizaltı manevra performanslarının belirlenmesine yönelik bazı düzenlemeler de yapılmıştır [5]. Denizaltı çalışmalarında hidrodinamik türevlerin tespiti için yaygın olarak kullanılan bir ampirik yöntem mevcut değildir, fakat suüstü platformlar için bir çok ampirik yaklaşım geliştirilmiş ve bu ampirik yaklaşımlar bir kaynakta toplanmıştır [6]. Denizaltılar ve suüstü platformlar için HAD uygulamaları farklı alanlarda birlikte gelişmektedir. Örneğin DARPA denizaltı modelinin tahrik sistemini ve pervane analizlerini sayısal olarak incelenmiştir [7]. Başka bir çalışmada HAD kullanılarak gemilerinin manevra performansları belirlenmiştir [8]. Bir diğer çalışmada çift pervaneli bir su üstü platformun itki parametreleri belirlenmiş ve manevra türevleri hesap edilmiştir [9]. Bu çalışmalar ve benzerleri, denizaltı modellerine de uygulanabilir ve test edilebilirdir. Darpa Suboff denizaltı modeline farklı takıntı tiplerinde ve farklı sürüklenme açılarında manevra testleri de uygulanmış ve modele ilişkin hidrodinamik türevler verilmiştir [10]. Bu doğrusal hidrodinamik türevler derin sular için testlerle belirlenmiştir [11]. Aynı deney sonucunda denizaltının derin su koşullarında yatay stabilitesinin olmadığı da bildirilmiştir. Aynı zamanda farklı derinlik Froude sayıları ve dümen açıları ile dümen kaldırma ve sürükleme kuvveti grafikleri verilmiştir. Yatay stabilitesinin olmaması da DARPA geometrisi için yelken kaynaklı ve dümen kaynaklı girdapların çok büyük olduğu ve sistemi fiziksel olarak hızlı bir şekilde kararsız hale getirdiği, özellikle RANS yöntemi için belirtilmiştir [12]. Önce sistemin sitabilite olarak kararlılığı kontrol edilmelidir ve hidrodinamik türevler ile simülasyon modeli gelıştirme çalışması ancak o zaman anlamlı olur [13]. Bu nedenle bu çalışmada, denizaltının farklı derinliklerdeki yatay stabilitesi kontrol edildikten sonra hidrodinamik türevlerin simülasyon modeline uygulanması üzerine bir çalışma yapılmıştır [14].

1.2.1 Doğrusal hidrodinamik türevler

Hidrodinamik türevler, suüstü ve denizaltı platformlarının tasarım kriterlerini belirlemek için stabilite hesabı, manevra performansı belirleme ve kontrol uygulamalarında kullanılmaktadır. Hidrodinamik kuvvet/momentlerin doğru ve hassas tahmini, hidrodinamik katsayıların belirlenmeleri için gereklidir. Doğrudan hesap edilebilecek bir yöntem, bir yüzey üzerindeki basınç ve viskoz kuvvetleri hesaplamaktır. Bu yüklerin (kuvvet ve momentlerin) elde edilmesi model ölçekli bir platform üzerinde belirli testlerin gerçekleştirilmesi ile mümkün olabildiği gibi, son zamanlarda sayısal yöntemlerden de yararlanılmaktadır. Hidrodinamik yükleri tahmin etmek için geliştirilen metodlardan birinde hesaplanan kuvvetlerin Taylor seri açılımlarına başvurulmuştur [15]. Bu Taylor seri açılımları platformların üzerine gelen hidrodinamik yükleri belirleyen ve hareket özelliklerini ifade eden fonksiyonlar olarak tanımlanabilir. Taylor seri açılımında yüklere (kuvvet ve momentlere), hızlara ve dümenlere etki eden sabit yük katsayıları hidrodinamik türevler ve ek su kütleleri olarak adlandırılmaktadır. Denizaltı çalışmalarında doğrusal olmayan hidrodinamik katsayıların hesaplandığı ve hareket denklemlerinde kullanılan yaklaşım sık kullanılan bir modelidir [16]. Daha sonra geliştirilen hidrodinamik modeller, denizaltı modelinin geometri parametrelerini de içerecek şekilde düzenlenmiştir [17]. Bu yüklere, hızlara ve dümenlere etki eden katsayıların basitleştirilmiş doğrusal formda olması hassas bir yaklaşıma sebep olmamaktadır fakat model hakkında yaklaşık bilgi vermektedir [15]. Bu çalışmada yukarıdaki sebeplerin yanında yatay stabilite sayısının tespitinde de yeterli olduğu için doğrusal hidrodinamik model kullanılmıştır.

Hidrodinamik yüklerin belirlenmesinde genellikle PMM (Düzlemsel Hareket Mekanizması) testleri kullanılmaktadır. PMM testleri deney ortamında şartlandırılmış şekilde deniz aracına belirli manevra test hareketlerinin yaptırılması ile icra edilir ve gerekli eksenlerde gerekli kuvvetler hesaplanarak modele girdi oluşturur [18]. PMM testleri standart testlerden oluşmuştur. Statik sürüklenme (drift) testleri ve saf savrulma (yaw) testleri buna örnektir. Bu çalışmada da hidrodinamik türevlerin tespit edilmesinde statik sürüklenme ve saf sapma PMM testleri uygulanacaktır. PMM testlerinde bir platform modeline ihtiyaç duyulmaktadır ve deney ortamında manevra testleri yapılmaktadır. Model tasarımı tamamladıktan sonra üretilmesi ve tekrar edilebilir manevra testleriyle sonuçların irdelenmesi gerekir. Eğer platform tasarımı, tasarım isterlerini karşılayamamışsa, yeniden tasarım yapmak ve yeniden model gemi

üreterek tekrarlanabilir manevra testlerinin yapılması gerekir ki bu silsile çok uzun zaman, emek ve ekonomik kayıplara sebep olabilmektedir. Metoda harcanan zaman, emek ve maliyet ne kadar artarsa test sonuçlarının belirsiz olma riski o kadar azalacaktır. Bunun yerine akademik çalışmalar, enstitüler ve işletmeler deneysel çalışmak yerine daha az maliyetli içeren diğer yöntemlere başvururlar. Bu yöntemler ampirik yaklaşımlar, HAD analizleri ve sistem tanımlama olarak sıralanabilir [19]. HAD analizleri çözümlenirken, PMM testleri yüksek kapasiteli bilgisayarlar ile sayısal olarak çözülmeye çalışılır. Elde edilen kuvvet bilgileri hidrodinamik katsayıların belirlenmesinde kullanılır. Hidrodinamik katsayılar, daha sonra mevcut olan belirli benzetim programlarına uygun şekilde modellenmelidir. Böylece tasarımın, gerekli performans isterlerine sahip olup olmadığı daha hızlı bir şekilde tespit edilmiş olur. Fakat HAD analizlerinde sayısal çözümlerden kaynaklı belirli bir hata payı oluşmaktadır. Bu hata payının kabul edilebilir mertebede olduğunun belirlenmesi için yine havuz testlerinden elde edilen geçerleme verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Havuz deneyleriyle elde edilen sonuçlar ve HAD analiz sonuçları karşılaştırıldığında bir sapma ve belirsizlik olduğu anlaşılabilir. Çalışmanın ne mertebede doğruluk içerdiği ancak belirsizlik analizi yapılarak tespit edilebilir.

1.2.2 Darpa denizaltı modeli analiz çalışmaları

DSM, DTRC (David Taylor Araştırma Merkezi) tarafından üretilmiş ve modelin havuz testleri yine aynı kurum tarafından derin suda yapılmıştır. Daha sonra, DSM modelinin incelendiği çalışmalarda, DSM modeli için yüzeye yakın derinliklerde direnç deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sonucu doğrusal hidrodinamik türevlerin ve yatay stabilite sayısının tespiti yapılmıştır. Darpa Suboff denizaltı modeline farklı derinliklerde ve farklı sürüklenme açılarında ve farklı açısal savrulma hızlarında saf sapma havuz testleri uygulanmıştır ve modele ilişkin katsayılar verilmiştir [10]. Bu doğrusal hidrodinamik türevler derin su için bellidir [11]. Aynı çalışmada denizaltının derin su şartlarında yatay stabilitesinin olmadığını da bildirmektedir. Platform stabilite hesabında denizaltı modelinin stabiliteye sahip olduğunun söylenebilmesi için sırasıyla yatay stabilite ve düşey stabilite (Gh ve Gv) sayıları 0 ile 1 arasında olmalıdır. Stabilite sayıları sıfırın altında ise stabilite şartını sağlamıyor, 1'in üstü ise aşırı stabiteye sahip olarak tanımlanmaktadır. DSM için yatay stabilite sonucu yüzde 43 belirsizlikle -0.44 olarak bildirilmiştir [11]. Sonuç olarak DSM için yatay stabilite sonucu 0'dan küçük olduğu için derin sularda yatay stabilitesi yoktur.

Ayrıca, derinliğe bağlı olarak doğrusal hidrodinamik türevler PMM testleri ile deneysel olarak elde edilmiş ve denizaltının derinliğine bağlı olarak yatay stabilitesi tespit edilmiştir. Sonuç olarak denizaltı serbest su yüzeyinden 4.7 çap derinliğe kadar yatay stabiliteye sahip olmakta ve daha derin operasyon koşullarında yatay stabiliteye sahip olmamaktadır [10]. Aynı çalışmada derinlik Froude sayısına ve dümen açılarına göre dümen kaldırma ve sürüklenme kuvvet grafikleri de verilmiştir. Bu, dümen açılarının ürettiği kuvvetlerin doğrulanmasını sağlayacaktır. Derinlik Froude sayısının 0.7'den büyük olduğu durumlarda, derinlik miktarının denizaltı direnci üzerinde kayda değer bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Buna göre bu tez çalışması için derinlik sınırı belirlenecektir [20].

2. HESAPLAMALI MODEL

Sayısal yöntemlerin hesaplanmasında ticari bir yazılım olan Star CCM+ programı kullanılmıştır. Bu program içerisinde kullanılan metodlar, hesaplamalar, çözücüler ve fiziksel yapı ile ilgili bilgiler ayrıca analizlerdeki hidrodinamik türevlerin tespiti için belirlenen vakalar bu bölümde tanıtılacaktır.

2.1 Hesaplamalı Model Parametreleri

Program içerisinde kullanılan yöntemler, hesaplamalar, çözücüler ve fiziksel yapı ile ilgili bilgiler bu bölümde verilecektir.

2.1.1 Hesaplamalı modelde kullanılan ağ yapısı modelleri

Akışkan hacmindeki ağ yapısı belirlenirken paragraf içinde tanıtımları yapılan ağ yapısı modelleri kullanılmıştır. İlk olarak, Sınır tabaka ağ oluşturucu (prism layer mesh) model kullanılmıştır. Sınır tabaka, akışkan viskozitesinden kaynaklanan katı ve akışkan arasındaki etkileşimin gerçekleştiği ince tabakadır. Akışkanlar dinamiğinde öneme sahip olmasının nedeni sınır tabakanın duvar üzerinde taşıma ve sürüklemeyi belirleyen ince bir tabaka olmasıdır [21]. Sınır tabaka ağı ise, çeşitli akış özelliklerinin (örneğin, sürükleme veya basınç düşüşü) yüksek mertebeden belirlenmesi için kullanılmalıdır [22]. Duvara normal olan hız gradyentlerinin çözülmesine bağlı olduğundan, bu hücre tabakaları, akış çözümünün doğruluğunu artırmak için duvar sınırlarının yanında oluşturulur. Bu tabakaların sıklığına bağlı olarak bahsi geçen özellikler ve gradyanler daha doğru şekilde belirlenebilir. Sınır tabakaya ait hücreler akışa dik doğrultuda çok sık, akışa paralel yönde ise dik doğrultuya göre görece olarak daha uzun yapılıdır, yani sınır tabaka ağ yapısının en boy oranları bozuktur fakat genel olarak duvar geometrisine dik ağ yapılarıdır. Düz levhada Reynolds sayısının artışına bağlı olarak sınır tabaka kalınlığı artmaktadır. Buna göre sınır tabakaya ait ağ yükseklikleri de Reynolds sayısına göre hesaplanmalıdır. Reynolds sayısına ait formül, denklem 2.1'de paylaşılmıştır.

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (2.1)$$

Burada, ρ akışkan yoğunluğunu, V akışkan hızını, L cisim boyutunu ve μ ise akışkanın dinamik viskozitesini temsil etmektedir. Bu çalışmada Denklem 1'deki formüle göre hesaplanan Reynolds sayısı $13.8*10^6$'dır. Hesaplanan Reynolds sayısına ve 50 olarak belirlenen Y+ değerine göre sınır tabaka kalınlığının 0.06 metre olduğu belirlenmiştir. Buna göre 0.06 metre yüksekliği olan, 15 adet ağ tabakası ve 1.2 büyüme oranına sahip bir sınır tabaka ağ yapısı oluşturulmuştur. Y+ değerinin manevra çalışmalarının dinamik modeller olması sebebiyle 30 ve 100 arasında seçilmesi yeterlidir. İkinci olarak ağ yapısı modellerinden yüzey ağlayıcı (surface remesher) kullanılmıştır. "Surface remesher" hesaplamalı akışkan yöntemlerinin uygulanabilmesi için uygun kaliteli bir ağ yapısının oluşturulması için kullanılır [22]. Son olarak, ağ yapısı modellerinden kırpıcı ağ oluşturucu (trimmer) model kullanılmıştır. Trimmer model, geometrilerin fonksiyonel eğri yüzeylerini parçalara ayırarak duvar geometrilerinin uygun ağ oluşturmasına katkı sunar. Ayrıca, sınır tabakası ayrılmasının neden olduğu durağan olmayan ve türbülanslı akış içeren bir iz bölgesinde hücreyi kırpma yeteneği nedeniyle dış aerodinamik akışların modellenmesinde yararlıdır.

2.1.2 Hesaplamalı modelde kullanılan fizik modelleri

Sayısal yöntemlerin uygulanabilmesi için kullanılan fizik modellerine ait bilgiler ve kısa tanımları paylaşılmıtır. İlk olarak "Eulerian Multiphase" fiziksel modeli uygulanmıştır. Model her bir faz için bir dizi momentum ve süreklilik denklemini çözer. Ortak yüzeylerin koşulları, basınç ve fazlar arası değişim katsayıları ile sağlanır. İki veya daha çok faz içeren akışların çözümünde kullanılmaktadır. İkinci fiziksel model, Implicit Unsteady çözücüdür. Bu çözücü, eliptik denkleme sahip fiziksel akış problemleri ile parabolik denklemler içeren zamana bağlı problemleri birlikte çözmek için kullanılmaktadır. Üçüncü fiziksel model, segregated flow fiziksel modelidir. Ayrılmış ve türbülanslı akışların hesaplanması konusunda geliştirilmiş bir çözücüdür. VOF fiziksel modeli, serbest su yüzeyinin belirlenmesinde kullanılan bir sayısal tekniktir ve Eulerian çözücüleri ile kullanılmaktadır.

Hesaplamalarda Reynolds ortalama Navier Strokes (URANS) denklemleri kullanılmaktadır ve akışın zaman ortalamalı ve dalgalanan bileşenlerine ayrıştırıldığı türbülanslı bir akışı modellemek için kullanılan sayısal bir yöntemdir. RANS

denklemleri 3 adet momentum ve 1 adet süreklilik denkleminden oluşmaktadır. Sıkıştırılamaz akışlar için momentum korunumu denklemi denklem 2.2'de ve kütlenin korunumu denklemi denklem 2.3'te verilmiştir.

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla}p + \mu\nabla^2\vec{V} + \rho\vec{g} \tag{2.2}$$

$$\nabla\vec{V} = 0 \tag{2.3}$$

Burada, ρ akışkan yoğunluğunu, $\frac{D\vec{V}}{Dt}$ zamana göre hız değişimini, $\vec{\nabla}p$ basınç gradyenini, $\mu\nabla^2\vec{V}$ viskoz etkilerinden kaynaklanan kuvvetleri ve $\rho\vec{g}$ ise yerçekimi gibi dış kaynaklı kuvvetleri temsil etmektedir. Sıkıştırılamaz akışlarda yoğunluğun sabit kabul edilmesi ile denklemlerdeki bilinmeyen terimler x, y ve z doğrultularındaki hız bileşenleri ve basınç değeridir. Yukarıdaki denklemlerde bilinmeyen hız bileşenleri ve basınç değerleri, yine yukarıda bahsedilen fiziksel modeller ile birlikte sayısal yöntemleri kullanılarak hesaplanmaya çalışılmaktadır.

2.1.3 Hesaplamalı modelde kullanılan sınır koşulları

Analiz parametrelerinde sonucu etkileyecek parametrelerden biri de sınır koşullarıdır. Sayısal hesaplamalar için kullanılan sınır koşulları aşağıda tanımlanmıştır.

2.1.3.1 Hız girişi

Hız girişi sınır koşulları, akış girişlerinde akışın ilgili tüm skaler özellikleriyle birlikte akış hızını tanımlamak için kullanılır. Analiz hacminde akışın girdiği giriş bölgesi "velocity inlet" olarak tanımlanmıştır.

2.1.3.2 Basınç çıkışı

Basınç çıkışı sınır koşulu, çıkıştaki akış basıncına (P) dayalı bir çıkış akış koşulunu tanımlar. Bu genellikle bir akış hızı (veya hız) veya girişte atanan daha yüksek bir basınç olduğunda kullanılır. Analiz hacminde akışın çıktığı çıkış bölgesi "pressure outlet" olarak tanımlanmıştır.

2.1.3.3 Simetri

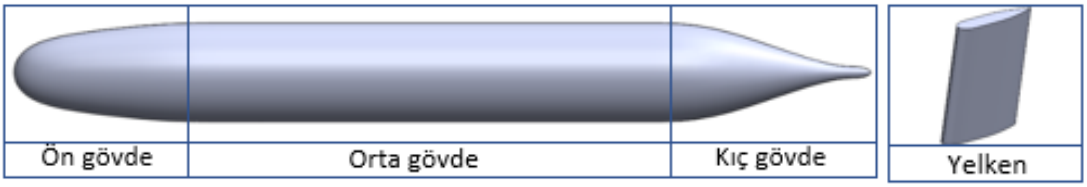
Simetri sınır koşulları, ilgilenilen fiziksel geometri ve akışkan çözümün beklenen modeli ayna simetrisine sahip olduğunda kullanılır. Viskoz akışlarda sıfır kayma

kaymalı duvarları modellemek için de kullanılabilirler. Analiz hacminde akışın girdiği, çıktığı ve duvar olan yüzeyler hariç bütün yüzeylerde simetri sınır koşulu kullanılmıştır.

2.2 Fiziksel Model Parametreleri

Modelin geometrik verisi için açık kaynak olarak sunulan verilerden yararlanılmıştır [23]. Geometriler elde edilirken bir algoritma geliştirilmiş ve geometriyi tanımlayan fonksiyonlar milimetrik aralıklarla sayısal değere dönüştürülmüştür. Bu çalışmada DSM üç boyutlu modeli, gövde, yelken ve kıç takıntılar olarak üç parçaya bölünmüştür. Sayısal değerler kullanılarak üç boyutlu CAD programı aracılığı ile DSM, üç boyutlu model haline getirilmiştir.

DSM gövdesi ise kendi içinde üç ana kısımdan oluşmaktadır. Ön gövde, yatay eksen konumunu baz alan paraboldür; orta gövde yatay eksene paraleldir ve kıç gövde sivri bir yelken şeklindedir. Denizaltı y ve z doğrultularında x ekseni boyunca simetriktir. Denizaltı yelkeni ise simetrik kanat profilidir [23]. Denizaltı gövde geometrisi ve denizaltı yelken geometrisi Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: DSM gövde ve yelken geometrileri.

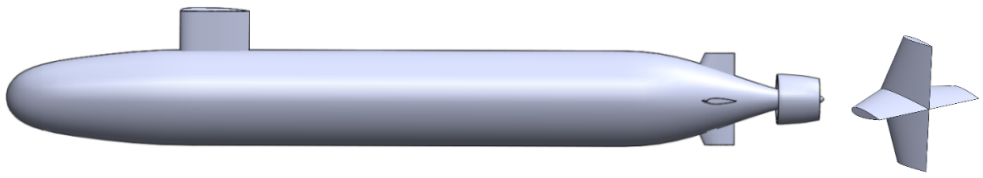
2.2.1 C4 modeli

DSM gövdesi ve yelkeni montaj resmi Şekil 2.2'te verilmiştir. Bu model konfigrasyon 4 (C4) takıntı modelidir. C4 takıntı modeli kıç takıntılarına sahip değildir.

Şekil 2.2: C4 modeli 3D CAD görseli.

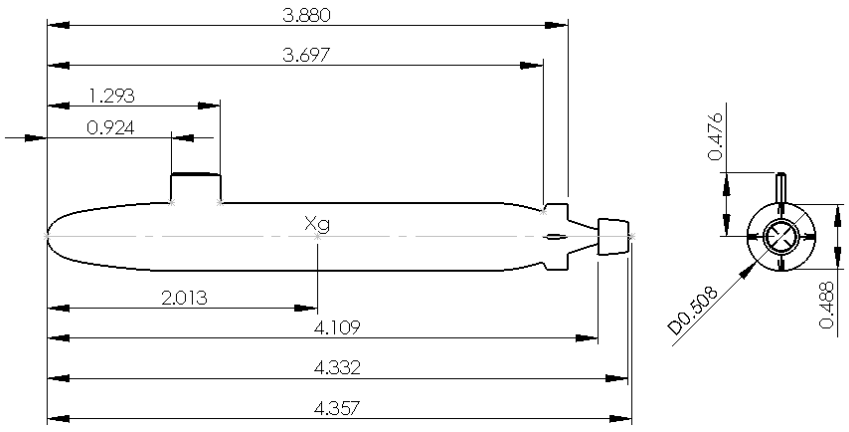
2.2.2 C2 modeli

DSM kıç takıntıları arasında gösterilen dümen geometrisi dört adet ve doksan derece açısal farkla yerleştirilmiş finlerden oluşur. Bu kanatlar y-z düzleminden bakılırsa bir yamuk şeklini andırır. Dümen takıntısı konumu gereği ön, orta ve arka takıntılar olarak üç farklı şekilde konumlandırılabilir [23]. Bu çalışmada deney verilerinin de bulunduğu orta konumdaki kıç takıntıları kullanılmışır [11]. DSM geçerleme çalışmalarına uyması açısından nozul takıntısı da denizaltında dümenin gerisinde olacak şekilde kullanılmıştır. Nozul, asimetrik bir kanat şeklindedir ve kanat profilinden oluşan bir toroid geometrisi olarak düşünülebilir. DSM ile birbirine simetrik kanat kesitleri vasıtasıyla bağlanmıştır. Bu kanat profilleri dümen takıntılarına 45 derece açısal fark ile sabitlenmiştir. 4 adettir. Kıç takıntılarına ait geometrik model Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3: C2 modeli ve dümen takıntısı 3D CAD görseli.

Kıç takıntıları ile denizaltı geometrisi oluşturulmuştur. Bu geometrik model, konfigrasyon 2 (C2) takıntı modelidir. Denizaltı ana boyutlarının yanı sıra DSM ağırlık merkezi de giriş ucundan (burundan) 2.013 m geride olacak şekilde belirlenmiştir [11]. Bu veri, HAD analizlerinde ağırlık merkezi olarak işaretlenecek ve momentler bu noktaya göre alınacaktır. Aşağıda C2 takıntı modeline ait ölçüler Şekil 2.4'da gösterilmiştir ve ana boyutlar resim üzerinde verilmiştir. Uzunluk birimi metre'dir.



Şekil 2.4: C2 modeli fiziksel parametreleri

Çizelge 2.1'de modeli tanımlayan fiziksel büyüklükler verilmiştir.

Çizelge 2.1: C2 modeli fiziksel parametreleri.

Fiziksel büyüklük	Sembol	Değer
Tam Boy	L	4.357 m
Çap	D	0.508 m
Boyuna ağırlık merkezi	Xg	2.013 m
Dümen geometrik uzunluğu	Ld	0.488 m
Kütle	m	775.7 kg
Eylemsizlik	Iz	885.2 kg*m^2

2.2.3 Boyutsuzlaştırma Parametreleri

Boyutsuzlaştırma parametreleri Çizelge 2.2'te verilmiştir [11].

Çizelge 2.2: Boyutsuzlaştırma parametreleri.

Boyutsuzlaştırma	Sembol
Hız Boyutsızlaştırması	U
Açısal Hız Boyutsuzlaştırması	U/L
Kuvvet Boyutsuzlaştırması	$0.5*\rho*L^2*U^2$
Moment Boyutsuzlaştırması	$0.5*\rho*L^3*U^2$
İvme Boyutsuzlaştırması	U^2/L
Açısal İvme Boyutsuzlaştırması	U^2/L^2

Bu çalışma için boyutsuzlaştırma değerleri sayısal olarak Çizelge 2.3'te verilmiştir. deney verileri 6.5 knot hız için yapılmıştır. DSM modeli için farklı derinliklerde HAD analiz çalışmaları yapılmış olup, deney verileri ve simülasyon çalışmalarında kullanılmıştır.

Çizelge 2.3: DSM modeli için boyutsuzlaştırma terimleri.

Boyutsuzlaştırma Terimi	Sayısal Değer	Birim
Uzunluk (L)	4.357	m
Hız (U)	3.344	m/s
Yoğunluk (ρ)	1025	kg/m^3

2.3 Vakalar

Hidrodinamik türevlerin belirlenmesi için oluşturulmuş vakaların tanıtımı bu bölümde yapılmıştır. Öncelikle statik sürüklenme vakalarının tanımı, testleri ve hidrodinamik türevlerin tespiti için gerekli denklemler verilecektir. Daha sonra da saf sapma vakalarının tespiti, vakaların tanımı ve türevlerin tespiti için gerekli denklemler verilecektir.

2.3.1 Statik sürüklenme vakaları

Statik sürüklenme testleri bir sürükleme açısı ile başlatılan duvar sınır şartının hareket etmemesine dayanan ve ivme içermeyen bir test şeklidir. Statik sürüklenme testlerinde sadece ileri öteleme ve yanal öteleme hızları oluşmaktadır. Böylece açısal sapma hızından ve ivmesinden arındırılmış olan bu test ayrıca yanal öteleme ivmesinden de arındırılmıştır. Böylece ancak çoklu koşum gibi Taylor açılımları ile belirlenebilen ek su kütlelerinin etkisi de sonuçlara etkilemez. Statik sürüklenme analizlerine ait hız ve ivmelerin değerleri gemi koordinatlarına göre Çizelge 2.4'de tanımlanmıştır. Görülmektedir ki statik sürüklenme testlerinde yanal öteleme hızı sadece sürüklenme açısından kaynaklanmaktadır ve sapma açısal hızı değeri sıfırdır. Ayrıca belirgin olması açısından statik sürüklenme testlerine ait görsel Şekil 2.5'de verilmiştir.

Çizelge 2.4: Statik sürüklenme vakalarında hız ve ivmeler [18].

Hareket	Statik sürüklenme
u	$U_c \cos\beta$
$\dot{u}$	0
v	$U_c \sin\beta$
$\dot{v}$	0
r	0
$\dot{r}$	0

Şekil 2.5: Statik sürüklenme testi örnek görseli [18].

Öncelikle doğrulama ve geçerleme için kullanılacak olan C4 takıntı modeline ait 20 adet analiz aşağıda sıralanmıştır. A kodu analizin statik sürüklenme analizi olduğuna işaret eder ve 01, 02, 03 ve 04 eklemeleri de C4 takıntı modelinin farklı derinliklerdeki analizlerini işaret eder. C4 takıntı modeli kıç takıntılarına sahip olmadığı için analizler sadece farklı sürüklenme açılarına göre yapılmıştır. Çizelge 2.5'te analiz doğrulama ve geçerlemelerinde kullanılacak olan analiz vakaları verilmiştir.

Çizelge 2.5: C4 takıntı modeline ait derinliğe bağlı vakalar.

Analiz Kodu	Takıntı Modeli	Derinlik	Sürüklenme Açısı	Dümen Açısı
A01	C4	6.0D	4, 2, 0, -2, -4	0
A02	C4	1.1D	4, 2, 0, -2, -4	0
A03	C4	2.2D	4, 2, 0, -2, -4	0
A04	C4	3.3D	4, 2, 0, -2, -4	0

Kıç takıntılarını da içeren C2 takıntı modeline ait vakalar farklı derinliklerde icra edilmiştir. C2 takıntı modeline ait 20 adet analizi içeren vakalar derinliklerine göre 05, 06, 07 ve 08 kodlarıyla tanımlanmıştır. Hem doğrulama ve geçerleme sonuçlarında kullanılacak olan hem de vakalarda tespit edilecek olan türevler statik sürüklenme analizleriyle belirlenecek olan X_v, Y_v ve N_v katsayıları için farklı sürüklenme açılarında olacak şekilde tekrarlanmıştır. Statik sürüklenme deneylerinde yanal öteleme hidrodinamik türevlerinin tespiti için icra edilen vakalar Çizelge 2.6'da paylaşılmıştır.

Çizelge 2.6: C2 takıntı modeline ait derinliğe bağlı vakalar.

Analiz Kodu	Takıntı Modeli	Derinlik	Sürüklenme Açısı	Dümen Açısı
A05	C2	6.0D	4, 2, 0, -2, -4	0
A06	C2	1.1D	4, 2, 0, -2, -4	0
A07	C2	2.2D	4, 2, 0, -2, -4	0
A08	C2	3.3D	4, 2, 0, -2, -4	0

X_v, Y_v ve N_v denklemlerinin tespiti için X, Y kuvvetleri ve N momentinin büyüklüklerinin karşılığı sırasıyla denklem 2.4, 2.5 ve 2.6'da verilmiştir. Bu denklemlerde r açısal savrulma hızının etkisinin görülmüyor olması r hızı ve ivmesinin sıfır olmasından kaynaklanmaktadır [18].

$$X = X_0 + X_v v \tag{2.4}$$

$$Y = Y_v v \tag{2.5}$$

$$N = N_v v \tag{2.6}$$

Denklemlere ait üretilecek eğriler ve eğrideki terimlere ait büyüklükler denkem 2.7, denklem 2.8 ve denklem 2.9'da tanımlanmıştır ve ön terim olan A, B ve C büyüklüklerden hidrodinamik türevler tespit edilebilir [18].

$$y = A + Bx, \qquad y = X, \qquad x = v \tag{2.7}$$

$$y = Cx, \qquad y = Y, N \qquad x = v \tag{2.8}$$

$$A = X_0, \qquad B = X_v, \qquad C = Y_v, N_v \tag{2.9}$$

Statik sürüklenme vakalarından bir diğeri ise farklı dümen açılarının analiz sonuçlarına etkisini incelemektir. Dümen etkisini incelemek için C2 takıntı modeline

yapılan 28 adet analiz, derinliklerine göre 09, 10, 11 ve 12 numaraları ile adlandırılmıştır. Statik sürüklenme analizlerinde farklı dümen açılarında ve farklı derinliklerde X_δ, Y_δ ve N_δ katsayılarının tespiti sağlanmıştır. Hidrodinamik dümen katsayılarının belirlenmesi için icra edilen vakalar Çizelge 2.7'te paylaşılmıştır.

Çizelge 2.7: Dümen türevlerinin belirlenmesi için kullanılan vakalar.

Analiz Kodu	Takıntı Modeli	Derinlik	Sürüklenme Açısı	Dümen Açısı
A09	C2	6.0D	0	-15, -10, -5, 0, 5, 10, 15
A10	C2	1.1D	0	-15, -10, -5, 0, 5, 10, 15
A11	C2	2.2D	0	-15, -10, -5, 0, 5, 10, 15
A12	C2	3.3D	0	-15, -10, -5, 0, 5, 10, 15

2.3.2 Saf sapma vakaları

Saf sapma analizlerinde kullanılmak üzere oluşturulan vakalar ise Y_r ve N_r hidrodinamik türevlerinin tespiti için icra edilmiştir. Bu analizler dinamik yapıda olup yanal öteleme hızını ve yanal öteleme ivmesini bertaraf edecek şekilde tasarlanmıştır. Çizelge 2.8'de modele ait ilerleme ve yanal öteleme ve saf sapma hız ve ivmelerine ait büyüklükler gemi koordinat sistemine göre verilmiştir. Ayrıca Şekil 2.6'de ise saf sapma analizine ait temsili görsel bulunmaktadır.

Şekil 2.6: Saf sapma analizlerinin temsili görseli [18].

Çizelge 2.8: Saf sapma analizlerinde model koordinatında hız ve ivmeler [18].

Hareket	Saf Sapma
u	$U_c\sqrt{1+\varepsilon^2 cos^2 wt}$
$\dot{u}$	$-U_c w \frac{\varepsilon^2 \sin 2wt}{2\sqrt{1+\varepsilon^2 cos^2 wt}}$
v	0
$\dot{v}$	0
r	$\varepsilon w sinwt \frac{1}{1+\varepsilon^2 cos^2 wt}$
$\dot{r}$	$\varepsilon w^2 coswt \frac{1+\varepsilon^2(1+sin^2 wt)}{(1+\varepsilon^2 cos^2 wt)^2}$

Dinamik testlerdeki saf sapma analizindeki anlık açısal savrulma hızı ve açısal savulma ivmesi denklem 2.10 ve denklem 2.11'deki gibi tanımlanabilir.

$$r = r_{max} sinwt \tag{2.10}$$

$$\dot{r} = \dot{r}_{max} coswt \tag{2.11}$$

Burada savrulma açısal hızı ve savrulma açısal ivmesine göre, analizlerde elde edilen Y kuvveti ve N momenti için tespit edilecek hidrodinamik türevler Y_r ve N_r'dir ayrıca, ek su kütleleri de ivme terimi sıfır olmadığı için sonuçlara etkileyecektir. Y ve N kuvvet ve momentine ait hidrodinamik denklemler denklem 2.12 ve denklem 2.13'te verilmiştir.

$$Y = Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_r r \tag{2.12}$$

$$N = N_{\dot{r}} \dot{r} + N_r r \tag{2.13}$$

Bu kuvvetler model frekansına göre Taylor açılımları şeklinde de yazılabilirler. Taylor açılımındaki frekans denizaltı için belirlenmiş olan 0.04, 0.08, 0.12 ve 0.16 açısal savrulma hızlarına karşılık gelmektedir. Savrulma hızı benzer çalışmalardaki saf sapma deney sonuçlarına uygun olarak belirlenmiştir. Taylor açılımınlarına ait denklemler bu çalışmada doğrusallaştırılmış olup, yüksek mertebeli terimler ihmal edilmiştir. Doğrusallaştırılmış Taylor açılımı denklemleri denklem 2.14 ve denklem 2.15'te verilmiştir.

$$Y = Y_{c1} coswt + Y_{s1} sinwt \tag{2.14}$$

$$N = N_{c1} coswt + N_{s1} sinwt \tag{2.15}$$

Burada denklemlerdeki Taylor açılımı katsayılarının fiziksel karşılıkları denklem 2.16, denklem 2.17, denklem 2.18 ve denklem 2.19'da verilmiştir. Burada sinüs ile kullanılan türev terimleri hidrodinamik türevleri (Y_r ve N_r), cosinüs ile temsil edilen türevler ise ek su kütlelerini temsil etmektedir.

$$Y_{s1} = Y_r r_{max} \tag{2.16}$$

$$Y_{c1} = Y_{\dot{r}} \dot{r}_{max} \tag{2.17}$$

$$N_{s1} = N_r r_{max} \tag{2.18}$$

$$N_{c1} = N_{\dot{r}} \dot{r}_{max} \tag{2.19}$$

Çoklu koşum metodu olarak adlandırılan metoda göre analizlerden elde edilne Y kuvveti ve N momentine denklem 2.20'deki gibi bir eğir türetilirse, ve denklemdeki parametreler yerine yazılırsa ilgili katsayılar tespit edilecektir [18].

$$y = Ax, \;\; y = Y, N, \;\; x = r_{max}, \;\; Y_r, N_r = A \tag{2.20}$$

Analizlerde kullanılan frekans değerlenin seçiminde ITTC tarafından belirlenen w_1, w_2 ve w_3 frekans tanımları dikkate alınmıştır.

ITTC tarafından belirlenen frekans tanımları sırasıyla "memory effects frequency", "tank resonance frequency" ve "unrealistic translation frequency" olarak tanımlanmıştır ve denklemleri sırasıyla denklem 2.21, denklem 2.22 ve denklem 2.23'te verilmiştir [18].

$$w_1 = wL/U \tag{2.21}$$

$$w_2 = w\sqrt{L/g} \tag{2.22}$$

$$w_3 = wU/g \tag{2.23}$$

Bu testte kullanılan modellerde belirlenen açısal savrulma hızlarına göre frekansların aldıkları değerler denklem 2.24, denklem 2.25 ve denklem 2.26'da verilmiştir. Bulunan frekans değerleri ITTC için uygun mertebe aralığındadır.

$$w_1 = 0.052 - 0.021\, rad/s \tag{2.24}$$

$$w_2 = 0.027 - 0.107\, rad/s \tag{2.25}$$

$$w_3 = 0.014 - 0.05\, rad/s \tag{2.26}$$

Saf sapma analizlerine ait hidrodinamik türevlerin (Y_r ve N_r) tespitinde kullanılacak vakalar Çizelge 2.9'da savrulma açısal hızına ve derinliğe göre paylaşılmıştır. Bu analizler 16 adet olup frekansa bağlı hareketli duvar yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Kullanılan yazılımda DFBI (Depth First Begin Index) yöntemi kullanılmıştır. DFBI yönteminde duvar, PMM testlerindeki gibi eksenlere göre serbest veya bağlı olarak bulundurulabilir. Böylece çalışmada kullanılan bütün vakalar tanıtılmıştır.

Çizelge 2.9: Saf sapma türevlerinin tespiti için vakalar.

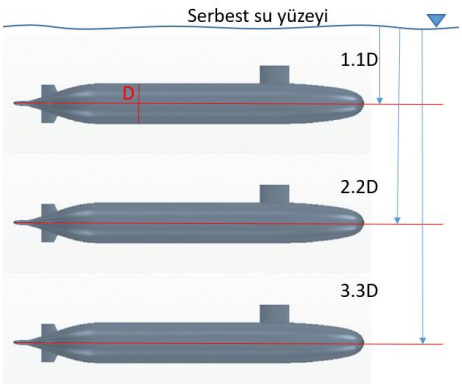
Analiz Kodu	Takıntı Modeli	Derinlik	Savrulma Açısal Hızı	Dümen Açısı
B05	C2	6.0D	0.04, 0.08, 0.12, 0.16	0
B06	C2	1.1D	0.04, 0.08, 0.12, 0.16	0
B07	C2	2.2D	0.04, 0.08, 0.12, 0.16	0
B08	C2	3.3D	0.04, 0.08, 0.12, 0.16	0

3. ANALİZ DOĞRAMALARI VE GEÇERLEMELERİ

DSM takıntı modellerinde takıntı durumlarına göre altı farklı konfigrasyon mevcuttur [11]. Bu çalışmada doğrulaması gerçekleştirilecek olan takıntı modelleri C2 ve C4 modelleridir. C4 takıntı modelinin seçilme nedeni, tam batmış ve yüzeye yakın seyirlerde deney verilerinin bulunmasıdır. Analiz çalışmalarında C2 ve C4 takıntı modellerine ait analiz vakaları bir önceki bölümde tanıtılmıştır. Bu bölümde ise tanıtılan vakaların farklı derinliklerde analiz doğrulamaları ve geçerlemeleri yapılacaktır. Doğrulama ve geçerlemeyi bu çalışma için inceleyecek olursak, doğrulama analiz parametrelerinin belirlenmesi için, geçerleme ise hesaplamalı sonuçlarının deneyler ile uyumunu anlamak için yapılmaktadır.

3.1 Analiz Doğrulama Planı

Bu çalışmada kullanılan Darpa denizaltı modelinin çapı 0.508 m'dir. Derinlikler, test verilerinin alındığı kaynaklarda da olduğu gibi denizaltı gövdesinin simetrik eksenine göre tarif edilmiştir. Buna göre 1.1D, 2.2D ve 3.3D sırası ile 0.5588 m, 1.1176 m ve 1.6764 m derinliklere karşılık gelmektedir. Derinlikler doğrulama ve geçerleme verilerine uyum sağlaması açısından daha önceden yapılan çalışmalardan derinlik bilgisi alınmıştır [24]. Derin suda (tam batmış) ise analizler serbest su yüzeyi etkisi çok düşük olacak şekilde ve derinlik Froude sayısı 0.7'nin üstünde kalacak şekilde belirlenerek 6D olarak alınmıştır [10,20]. Farklı derinlikleri ve derinliklerin sayısal değerlerini tanımlayan görsel Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1: DSM derinlik tanımı görseli.

DSM'nin C2 ve C4 takıntı modelleri için farklı yüksekliklerde, farklı sürüklenme açılarında ve farklı dümen açılarında analizler yapılmış ve sonuçlar bölüm 2'de vakalar kısmında belirtilen her analiz kodu için kendi arasında karşılaştırılmıştır. Analizlerde karşılaştırılan ve doğrulama çalışmasına girdi olabilecek diğer parametreler de kendi içinde karşılaştırılmıştır. Analizlerden anlaşılacağı gibi öncelikle analiz bölgesi (domain) belirleme çalışmaları yapılmıştır. Daha sonra, ağdan bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Ayrıca, analiz süre adımlarını inceleyen bir karşılaştırma da yapılmıştır. Son olarak analiz toplam sürelerinin analiz sonuçlarına etkisini incelemek için bir çalışma yapılmıştır.

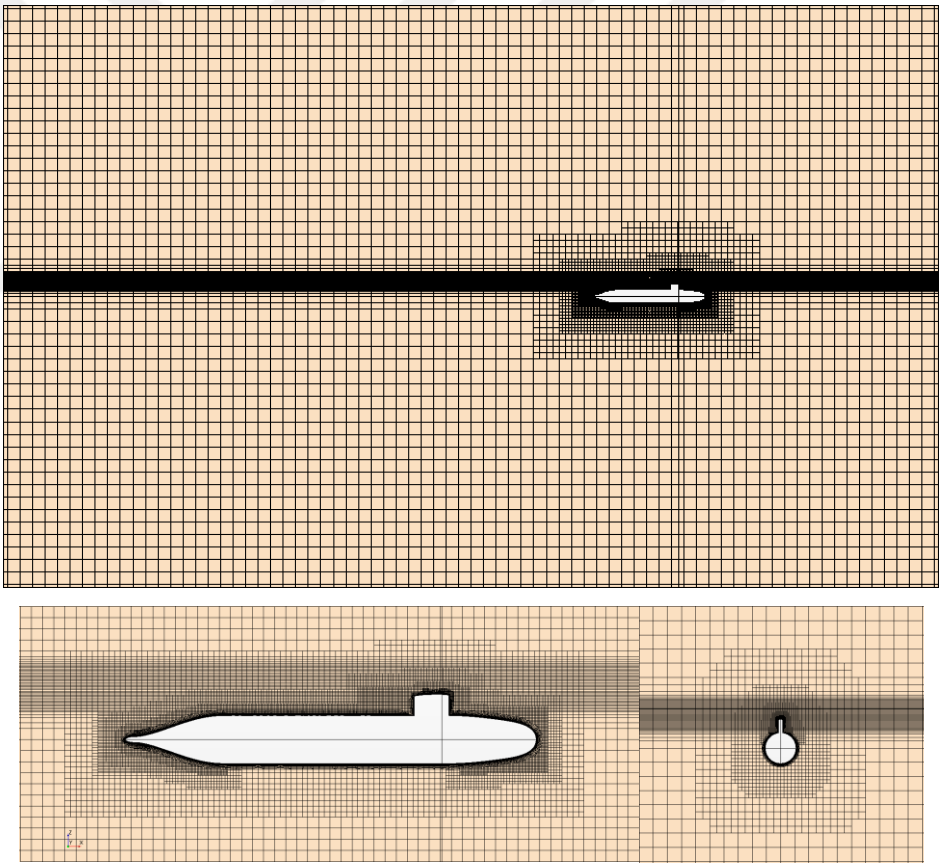
3.2 Analiz Hacmini Belirleme

Dış sınırda meydana gelen basınç değişimlerinin analiz hacmi üzerindeki etkisini en aza indirmek için geometriye göre büyük bir ağ bölgesi hacmi seçilmelidir. ITTC, HAD çalışmalarında kullanılacak olan analiz hacim sınırlarını tanımlamıştır [25]. Bu boyutlara uygun olan değerler, ağ hacminin belirlenmesinde kullanılmıştır. Analiz bölgesi (domain) belirlenirken bölge şeklinin önemsiz olduğu (ister küre, ister silindir veya prizma şeklinde) asıl önemli olanın analiz hacmi sınır koşullarının doğru bir şekilde belirlenmesi olduğu çalışmalarda belirtilmiştir [26]. Çözüm ağının bir dikdörtgenler prizması şeklinde seçildiği bir çok çalışma mevcuttur [27]. Örnek bir çalışmada, prizmanın ana boyutları önden 1.5L, arkadan 5L, yanlardan 2L ve üstten ve alttan 2L'dir [7]. Bu çalışmada, çözüm bölgesi bir dikdörtgenler prizması olarak seçilmiş ve önden 1.5L, arkadan 5L, yanlardan 2L ve üstten ve alttan 2L şeklinde belirlenmiştir.

3.3 Ağ Yapısı ve Ağdan Bağımsızlık Çalışması

Ağdan bağımsızlık çalışmasını yapabilmek için dört farklı derinlik ve iki farklı takıntı modeli kullanılmıştır. Her bir derinlikte ve takıntı modeline, birbirinden farklı sıklıkta üç farklı ağ yapısı oluşturulmuştur. Benzer manevra çalışmalarına göre RANS yöntemi ile yapılacak olan manevra performansını inceleyen analizlerde Y+ değeri 30 ile 300 arasında olması gerektiği anlaşılmaktadır [28-29]. Ayrıca, farklı bir çalışmada da manevra performansı incelenirken Y+ değerinin 50'den küçük olduğunda model ölçeğine göre daha doğru sonuç verdiği bildirilmiştir [30]. Bu çalışmada, sınır tabaka kalınlığı, Y+ değeri manevra performansı çalışmalarına uygun ve yeterli olarak

ortalama 50 olacak şekilde sınır tabaka kalınlığı ve sınır tabaka katmanlarını temsil ederek modele uygulanmaya çalışılmıştır. Benzer amaçlarla hazırlanan çalışmalarda VOF yöntemi kullanılarak ve k - ε türbülans modeli seçilerek Y+ değeri 50 seçilen manevra çalışmaları mevcuttur [31]. Y+ değeri, analiz çalışmaları sonucu 46 olarak tespit edilmiştir. Daha uzak mesafedeki ağlara göre akışı daha iyi temsil edebilmesi açısından duşar şartı olan DSM'nin baş formu, kıç formu, yelken ve kıç takıntılarının konumuna dikkat edilerek bu bölgelerde daha sık olacak şekilde bir ağ yapısı tasarlanmıştır. Ayrıca derinlik bilgisi gerektiren analizlerde serbest su yüzerine, serbest su yüzeyinin bozunumlarını ve dalga oluşumlarını daha iyi tespit edebilmek için daha sık ağ yapısı oluşturulacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 3.2'de örnek bir ağ yapısı gösterilmektedir. Ağ yapısına ait görsel 1.1D derinlikte 0 derece sürüklenme açılı C4 takıntı modeline aittir.



Şekil 3.2: DSM modeli örnek ağ yapısı 1.1D derinlik.

Üç farklı sıklıkta seçilen ağ yapısından en seyrek olanında, sınır tabakanın on beşinci tabakasının kalınlığına göre 1.2 oranında büyüyecek şekilde alınmıştır. Böylece hem sınır tabaka ile çevre arasında yerinde bir bağlantı sağlanmış olacak hem de çevresel

etkiler daha görünür hale gelecektir. Saf sapma analizlerinde kullanılacak olan overset ağ yapısına ise sabit hacimdeki etkilerin daha iyi iletilebilmesi için overset sınırında daha sık bir ağ yapısı geliştirilmiştir. Çizelge 3.1'de statik sürüklenme analizlerinde kullanılmak üzere tasarlanan ağ yapıları, ağ yapılarının temel aldığı büyüklükler, ağ yapısındaki toplam ağ sayısı ve seyrekten yoğuna (sık olana) gittikçe ağ yapısındaki artış miktarı oransal olarak gösterilmiştir. Çizelge 3.3'te simetrik, dümen ve sürüklenme açıları 0 olan vakalardan elde edilen ağ yapısı sonuçları birbirlerine göre X kuvvetlerinin yüzde farklı şeklinde verilmiştir. Burada analiz kodları vakalar bölümünde tanımlanmıştır. X kuvvetlerinin tespiti ise DSM simetrik ekseninden gelen kuvvete göre yapılmıştır. Böylece anlaşılmıştır ki, hata mertebesi orta sıklıktaki ağ ile sık ağ örgüsü arasında statik sürüklenme analizleri için bütün analiz kodlarında yüzde 2'in altına düşmüştür. Bu sebeple statik sürüklenme analizlerinde orta sıklıktaki ağ yapısının kullanılmasına karar verilmiştir.

Çizelge 3.2'de ise saf sapma analizlerine ait oluşturulan ve overset ağ yapısını da içeren ağdan bağımsızlık çalışmasına ait ağ yapılarının temel aldığı büyüklükler, ağ yapısındaki toplam ağ sayısı ve seyrekten yoğuna (sık olana) gittikçe ağ yapısındaki artış miktarı oransal olarak gösterilmiştir. Ağ yapısındaki artış oranları yaklaşık olarak 1.6 olacak şekilde tutulmaya çalışılmıştır [32].

Çizelge 3.1: Statik sürüklenme ağ yapısı oluşturma çalışması.

Analiz kodu	Ağ adlandırması	Temel büyüklük	Hücre sayısı	Hücre artış oranı
A01	Seyrek	10.00	727044	-
A01	Orta	7.50	1223770	1.683
A01	Sık	6.0	1927698	1.575
A02	Seyrek	10.0	677568	-
A02	Orta	7.50	1115281	1.646
A02	Sık	6.0	1766403	1.583
A03	Seyrek	10.0	662324	-
A03	Orta	7.50	1086891	1.641
A03	Sık	6.0	1738435	1.599
A04	Seyrek	10.0	560894	-
A04	Orta	7.50	896523	1.598
A04	Sık	6.0	1408255	1.570
A05	Seyrek	10.0	654199	-
A05	Orta	7.50	1015824	1.552
A05	Sık	6.0	1565167	1.540

Çizelge 3.3'te simetrik, dümen ve sürüklenme açıları 0 olan vakalardan elde edilen ağ yapısı sonuçları birbirlerine göre X kuvvetlerinin yüzde farklı şeklinde verilmiştir. Burada analiz kodları vakalar bölümünde tanımlanmıştır. X kuvvetlerinin tespiti ise DSM simetrik ekseninden gelen kuvvete göre yapılmıştır. Böylece anlaşılmıştır ki, hata mertebesi orta sıklıktaki ağ ile sık ağ örgüsü arasında statik sürüklenme analizleri için bütün analiz kodlarında yüzde 2'in altına düşmüştür. Bu sebeple statik sürüklenme analizlerinde orta sıklıktaki ağ yapısının kullanılmasına karar verilmiştir.

Çizelge 3.2: Saf Sapma ağ yapısı oluşturma çalışması.

Analiz kodu	Ağ adlandırması	Temel büyüklük	Hücre sayısı	Hücre artış oranı
B05	Seyrek	10	959705	-
B05	Orta	7.5	1614445	1.682
B05	Sık	6	2543734	1.576
B06	Seyrek	10	880786	-
B06	Orta	7.5	1466725	1.665
B06	Sık	6	2330970	1.589
B07	Seyrek	10	874067	-
B07	Orta	7.5	1433839	1.640
B07	Sık	6	2294262	1.600
B08	Seyrek	10	743513	-
B08	Orta	7.5	1182796	1.591
B08	Sık	6	1857750	1.571

Çizelge 3.3: Ağ modelleri X kuvvetlerinin karşılaştırma yüzde farkları.

Analiz kodu	Ağ modeli (fark)	Yüzde fark
A01	Kaba-Orta	0.58
A01	Orta-sık	0.07
A02	Kaba-Orta	1.14
A02	Orta-sık	0.38
A03	Kaba-Orta	0.99
A03	Orta-sık	0.01
A04	Kaba-Orta	0.83
A04	Orta-sık	0.22
A05	Kaba-Orta	1.62
A05	Orta-sık	1.17

Çizelge 3.4'te ise saf sapma analizlerine ait ağdan bağımsızlık çalışması sonuçları verilmiştir.

Çizelge 3.4: Ağ modelleri x doğrultusu karşılaştırma yüzde farkları.

Analiz kodu	Ağ modeli (fark)	Yüzde fark
B05	Kaba-Orta	3.96
B05	Orta-sık	1.47
B06	Kaba-Orta	3.11
B06	Orta-sık	1.24
B07	Kaba-Orta	0.89
B07	Orta-sık	0.83
B08	Kaba-Orta	1.96
B08	Orta-sık	0.52

0.04 rad/s savrulma açısal hızında gerçekleştirilen vakalardan elde edilen ağ yapısı sonuçları birbirlerine göre X kuvvetlerinin yüzde farklı şeklinde verilmiştir. Burada analiz kodları vakalar bölümünde tanımlanmıştır. Hata mertebesi orta sıklıktaki ağ ile sık ağ örgüsü arasında saf sapma analizleri için bütün analiz kodlarında yüzde 2'in altına düşmüştür. Bu sebeple saf sapma analizlerinde orta sıklıktaki ağ yapısının kullanılmasına karar verilmiştir.

3.4 Analiz Zaman Adımları Belirleme Çalışması

Zaman aralığının çözüme etkisi olduğu bilinmektedir. Bu sebeple A01 kodlu statik sürüklenme analizlerinden sürüklenme açısı sıfır olan vakalar, 0.1 ve 0.2 saniye zaman aralıkları ile çalıştırılarak incelenmiştir. 0.2 sn adım aralığında elde edilen X kuvvetleri ve 0.1 sn'de elde edilen X kuvvetleri karşılaştırılmıştır. 0.2 zaman aralılarıyla alınan analiz sonucunda elde edilen X kuvvetinin, 0.1 saniye ile alınan analiz sonucunda elde edilen X kuvvetine yüzde farkı 0.5 olarak tespit edilmiştir. Böylece aradaki farkın düşük olması sebebi ile 0.2 saniye zaman aralıkları ile analizin gerçekleştirilmesine karar verilmiştir.

3.5 Analiz Süresi Belirleme Çalışması

Statik sürüklenme analizlerinde toplam analiz süresinin belirlenmesinde analiz süresinin çözüme etkisi üzerinde durulmuştur. A02 analizi sıfır derece sürüklenme açısıyla 20, 30, 40, 50 ve 60 saniyeler ile tekrar edilerek analiz süresinin çözüme etkisi incelenmiştir. X eksenine ait kuvvetler karşılaştırılan sürelere göre Çizelge 3.5'te verilmiştir. Analiz süresi kendisinden 10 saniye uzun analiz sonucu ile karşılaştırılmış

ve farkların yüzde 1'in altında olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple 20 sn analiz süresi olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.5: Analiz süreleri karşılaştırma tablosu.

Analiz kodu	Karşılaştırılan süreler	% X kuvvet farkı
A02	20-30	0.24
A02	30-40	0.20
A02	40-50	0.16
A02	50-60	0.09

Saf sapma analizlerinde ise toplam sürenin belirlenmesinde harekete ait 4 periyotun tamamlanma zamanı esas alınmıştır.

3.6 Türbülans Modelleri Geçerleme Çalışması

Genel olarak kullanılan denizaltı ve suüstü platformlarının etrafındaki akış türbülanslıdır ve RANS metodu kullanılan HAD çalışmalarında Reynolds gerilmelerinin etkilerine uygun bir türbülans modeli seçilmelidir. Geçmişte, yüzeye yakın hareket eden denizaltılar için HAD analizlerinde VOF metodu kullanıldığı bildirilmiştir [24]. VOF metodu ile serbest su yüzeyindeki iki fazlı akışkan yapının çözümü mümkün olmaktadır. Analizlerde, türbülans modeli seçilirken VOF metoduna uygunluğu da göz önüne alınmalıdır. RANS metodunda geliştirilmiş ve üzerinde çalışılan çok çeşitli türbülans modeli olmasına karşın, k – ε, k – ω ve bu iki modelden türetilmiş modeller en çok kullanılan türbülans modelleridir. Benzer çalışmalarda Darpa Suboff modeli için k – ε türbülans modelinin üç türetimi (standart, "realizable" ve RNG) ve k – ω türbülans modelinin iki türetimi (standart ve SST) karşılaştırılmıştır. "Realizable" k – ε modelinin simülasyon dinamik testlerine gerek sonuç gerekse zaman optimizasyonu olarak daha iyi cevap verdiği görülmüştür [33]. Yine, RANS yöntemi ile kullanılan türbülans modellerinden k – ε ve k – ω modelleri karşılaştırılarak, k – ε modelinin dönüş etkilerini daha iyi ifade ettiği [34] ve denizaltı manevra çalışmalarında dinamik olmayan testlerde k - ε modelinin, dönme ve diğer çapraz terimli katsayıları içeren çalışmalarda ise k - ω türbülans modelinin daha anlamlı sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Bu çalışmada, N_r ve Y_r katsayılarının tespiti için saf sapma hareketi içeren HAD analizleri yapılmıştır. Bu dinamik analizlerde Realizable k – ε kullanılması uygun görülmüştür. N_v, Y_v ve diğer dümen (rudder) katsayılarının tespiti için ise statik sürüklenme testleri yapılmış ve uygulanacak olan

türbülans modeli ise k – ε olarak belirlenmiştir. Bu seçimle ilgili analiz geçerleme çalışmalarında k – ε, k – ω ve SST k - ω modelleri statik sürüklenme analizlerinden A01 kodlu analiz deney verisi ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 3.6'da karşılaştırmalı olarak yapılan analiz tablosu mevcuttur.

A01 kodlu analizler için k – ε, k - ω ve SST k - ω türbülans modellerinde geçerleme analizleri yapılmıştır. Bu analiz modellerinde X yönünde elde edilen kuvvetler açık kaynak olarak mevcut olan deney sonuçları ile karşılaştırılmış olup mevcut $-1.294*10^{3}$ boyutsuz kuvvet değerine göre yüzde farkları türbülans modelinin seçiminde bir belirteç olması için Çizelge 3.6'da verilmiştir [11].

Çizelge 3.6: Türbülans modelleri karşılaştırması.

Türbülans Modeli	Boyutsuz kuvvet	Deney verisi yüzde farkı
k – ε	$-1.248*10^{-3}$	3.54
k - ω	$-1.247*10^{-3}$	3.61
SST k - ω	$-1.247*10^{-3}$	3.63

Tabloya göre k – ε modeli en düşük hatayı kabul edilebilir mertebede hata verdiği için ve çözüm süresi de daha hızlı olduğu için statik sürüklenme analizlerinde k – ε türbülans modeli bu çalışmada kullanılmıştır. Saf sapma analizlerinde türbülans modellerine ait herhangi bir çalışma yapılmamış olup Realizable k – ε türbülans modeli seçilmiştir.

3.7 Deney Verileri

C2 takıntı modeli yukarıdaki bölümde de bahsedildiği gibi yatay düzlemde, gövde, yelken ve kıç takıntılarını içermektedir. C4 takıntı modeli ise yatay düzlemde sadece gövde ve yelken takıntılarını içermektedir. Havuz deneyleri sonucu olarak, C2 takıntı modelinde -15 dereceden +15 dereceye kadar 5'er derece aralıklarla dümen açısı değerlerine karşılık, -4 dereceden +4 dereceye kadar 2'şer derece aralıklarla sürüklenme açısal değerleri derin su deneyleri için mevcuttur. C4 takıntı modelinde ise sadece sürüklenme açısal değerleri için -4 dereceden +4 dereceye kadar 2'şer derece aralıklarla sürüklenme açısı değerleri derin su deneyleri için mevcuttur [11]. Derin su geçerlemelerinden sonra, farklı derinliklere göre C2 ve C4 takıntı modellerinin direnç geçerlemeleri de yapılmıştır [24]. Sonuç olarak derin suda hem C2 hem de C4 takıntı modellerinin geçerlemeleri sağlanmıştır.

3.8 C4 Takıntı Modeli

C4 deney verisi DARPA tarafından yapılmış ve açık kaynak olarak yayınlanmıştır [11]. Fakat DARPA tarafından paylaşılan çalışmada sadece derin suya ait havuz testi verileri vardır. Geçerleme çalışması sadece statik sürüklenme deneyleri için yapılmıştır. Derin suda C4 takıntı modelinin X ekseni kuvvetlerine ait deney verisi, analiz sonucu sürüklenme açılarına göre Çizelge 3.7'de paylaşılmıştır ve yüzde fark olarak da ifade edilmiştir. Manevra hareketlerinde deney verilerinde de gürültü olabileceği için sonuçların %20ler mertebesine kadar doğruluğu kabul edilebilir seviyededir.

Çizelge 3.7: C4 takıntı modeli için X boyutsuz kuvvet karşılaştırmaları.

X boyutsuz kuvvetleri			
Sürüklenme açısı	Deney Verisi	Analiz Sonucu	%X Kuvvetleri Hatası
-4	$-1.13*10^{-3}$	$-1.15*10^{-3}$	1.2
2	$-1.15*10^{-3}$	$-1.08*10^{-3}$	6.0
4	$-1.13*10^{-3}$	$-1.15*10^{-3}$	1.8

Derin suda C4 takıntı modelinin Y ekseni kuvvetlerine ait deney verisi, analiz sonucu sürüklenme açılarına göre Çizelge 3.8'de paylaşılmıştır ve yüzde fark olarak da ifade edilmiştir. DARPA modeli simetrik bir model olmasına karşın, deney verilerinde birbirinin negatifi işaretli sürüklenme açılarında birbirinin negatifi Y kuvvetleri görülmesi gerekirken sonuçlar deney verilerinde bir farklılık olduğu yönünde göze çarpar.

Çizelge 3.8: C4 takıntı modeli için Y boyutsuz kuvvet karşılaştırmaları.

Y boyutsuz kuvvetleri			
Sürüklenme açısı	Deney Verisi	Analiz Sonucu	%Y Kuvvetleri Hatası
-4	$-1.39*10^{-3}$	$-1.54*10^{-3}$	10.9
2	$7.01*10^{-4}$	$7.30*10^{-4}$	4.1
4	$1.51*10^{-3}$	$1.54*10^{-3}$	2.2

Derin suda C4 takıntı modelinin N ekseni momentlerine ait deney verisi, analiz sonucu sürüklenme açılarına göre Çizelge 3.9'da paylaşılmıştır ve yüzde fark olarak da ifade edilmiştir. N momentinde de Y kuvvetlerinde olduğu gibi simetriye rağmen farklı sonuçlar görmek mümkündür.

Çizelge 3.9: C4 takıntı modeli için N boyutsuz moment karşılaştırmaları.

N boyutsuz momentleri			
Sürüklenme açısı	Deney Verisi	Analiz Sonucu	%N Momentleri Hatası
-4	$-1.10*10^{-3}$	$-1.05*10^{-3}$	4.2
2	$5.68*10^{-4}$	$5.28*10^{-4}$	7.1
4	$1.11*10^{-3}$	$1.05*10^{-3}$	4.9

Analiz sonuçlarının yüksek seviyede simetrik olduğu bu çalışmada deney verilerinin asimetrik sonuçlar vermesine karşın yüzde farkları incelendiğinde hata miktarının kabul edilebilir olduğu görünmektedir.

Deney verileri incelendiğinde C2 takıntı modeli için yeterince derinliğe bağlı deney verisi bulunmamaktadır. Sadece, 1.1D derinliğe ait deney verisi mevcuttur. Bu sebeple deneylerde derinliğe bağlı verileri mevcut olan C4 analiz sonuçları, derinliğe bağlı olarak da geçerlenmiştir. C4 takıntı modelinin kullanılmasının da asıl sebebi derinliğe bağlı deney verisi içeriyor olmasıdır. Yapılan geçerlemeye göre C4 takıntı modeli için derinliğe bağlı olarak değişen boyuna boyutsuz kuvvet deney verileri bu çalışmada da incelenen 1.1D, 2.2D ve 3.3D derinlikleri için mevcuttur [24]. Makaleden deney verisi elde edilirken geminin Froude sayısı Formül 3.1 ile hesaplanmış ve 0.51 olarak bulunmuştur. Makaleye göre 0.51 için verilen Ct katsayıları kullanılmıştır.

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{g * L}} \tag{3.2}$$

Verilen değerler ile bu çalışmada yapılan analiz sonuçları karşılaştırılmış olup, derinliğe göre deney verisinden elde edilen direnç boyutsuz kuvveti, analiz sonucundan elde edilen direnç boyutsuz kuvveti ve yüzde hataları içeren sonuçlar Çizelge 3.10'da paylaşılmıştır.

Çizelge 3.10: C4 takıntı modelinde derinliğe bağlı direnç çizelgesi

Derinlik	Deney verisi	Analiz sonucu	%Direnç Hatası
1.1D	$-2.563*10^{-3}$	$-2.697*10^{-3}$	5.26
2.2D	$-1.428*10^{-3}$	$-1.510*10^{-3}$	5.79
3.3D	$-1.125*10^{-3}$	$-1.205*10^{-3}$	7.10

Tabloda da görüldüğü üzere deney verisi ile fark değeri, belirli bir mertebede olup, farklı derinlikte olup farklı yüzey etkileri içeren analizler neticesinde kuvvetler yüksek tahmin edilerek geçerleme sağlanmıştır.

Derinlik arttıkça artan kabul edilebilir hata miktarının sebebinin bir sonraki bölümde işlenecek olan aşırı kararlı durumla ilişkisi olduğu düşünülmektedir.

3.9 C2 Takıntı Modeli

C2 deney verileri de, C4 deney verileri gibi DARPA havuz deneylerinden alınmıştır [11]. Bahsi geçen deney çalışmalarında sonsuz derinlikteki deney verileri mevcuttur. Geçerleme çalışması sadece statik sürüklenme deneyleri için yapılmıştır. Derin suda C2 takıntı modelinin X ekseni kuvvetlerine ait deney verisi, analiz sonucu sürüklenme açılarına göre Çizelge 3.11'de paylaşılmıştır ve yüzde fark olarak da ifade edilmiştir. Manevra hareketlerinde deney verilerinde de gürültü olabileceği için sonuçların %20ler mertebesine kadar doğruluğu kabul edilebilir seviyededir. Deney verilerinde karmaşaya sebep olmaması açısından pozitif ve sıfır derecedeki dümen açıları seçilmiştir.

Çizelge 3.11: C2 takıntı modeli için X boyutsuz kuvvet karşılaştırmaları.

Dümen Açısı	Sürüklenme Açısı	Deney Verisi	Analiz Sonucu	%X Hata
0	-4	$-1.29*10^{-3}$	$-1.34*10^{-3}$	3.27
0	4	$-1.24*10^{-3}$	$-1.34*10^{-3}$	8.48
5	-2	$-1.25*10^{-3}$	$-1.27*10^{-3}$	1.15
5	2	$-1.24*10^{-3}$	$-1.30*10^{-3}$	4.47
10	-4	$-1.29*10^{-3}$	$-1.35*10^{-3}$	4.46
10	2	$-1.31*10^{-3}$	$-1.36*10^{-3}$	3.37
15	-4	$-1.40*10^{-3}$	$-1.40*10^{-3}$	0.25
15	4	$-1.34*10^{-3}$	$-1.57*10^{-3}$	17.09

Derin suda C2 takıntı modelinin Y ekseni kuvvetlerine ait deney verisi, analiz sonucu sürüklenme açılarına göre Çizelge 3.12'de paylaşılmıştır ve yüzde fark olarak da ifade edilmiştir. Yüzde fark olarak sonuçlar geçerlemeye uygundur.

Çizelge 3.12: C2 takıntı modeli için Y boyutsuz kuvvet karşılaştırmaları.

Dümen Açısı	Sürüklenme Açısı	Deney Verisi	Analiz Sonucu	%Y Hata
0	-4	$-2.18*10^{-3}$	$-1.80*10^{-3}$	17.66
0	4	$1.95*10^{-3}$	$1.82*10^{-3}$	6.68
5	-2	$-5.24*10^{-4}$	$-5.00*10^{-4}$	4.39
5	2	$1.31*10^{-3}$	$1.27*10^{-3}$	2.88
10	-4	$-1.25*10^{-3}$	$-1.11*10^{-3}$	11.26
10	2	$1.84*10^{-3}$	$1.57*10^{-3}$	14.6
15	-4	$-7.23*10^{-4}$	$-8.16*10^{-4}$	12.8
15	4	$3.49*10^{-3}$	$2.87*10^{-3}$	17.67

Derin suda C4 takıntı modelinin N ekseni momentine ait deney verisi, analiz sonucu sürüklenme açılarına göre Çizelge 3.13'da paylaşılmıştır ve yüzde fark olarak da ifade edilmiştir. Yüzde fark olarak sonuçlar geçerlemeye uygundur.

Çizelge 3.13: C2 takıntı modeli için N boyutsuz moment karşılaştırmaları.

Dümen Açısı	Sürüklenme Açısı	Deney Verisi	Analiz Sonucu	%N Hata
0	-4	$-8.36*10^{-4}$	$-9.37*10^{-4}$	12.12
0	4	$1.07*10^{-3}$	$9.35*10^{-4}$	12.86
5	-2	$-5.77*10^{-4}$	$-5.99*10^{-4}$	3.76
5	2	$3.91*10^{-4}$	$3.37*10^{-4}$	14.14
10	-4	$-1.23*10^{-3}$	$-1.16*10^{-3}$	5.66
10	2	$2.12*10^{-4}$	$2.25*10^{-4}$	6.24
15	-4	$-1.42*10^{-3}$	$-1.26*10^{-3}$	10.78
15	4	$4.72*10^{-4}$	$5.57*10^{-4}$	18.04

Derinlik geçerlemesi için derinliğe bağlı havuz verilerini içeren deneylerden faydalanılmıştır [24]. Fakat çalışmada C2 takıntı modeli için sadece 1.1D derinlik için direnç verisi sonucu mevcuttur. C2 takıntı modelinin 1.1D derinlikteki direnç değeri ile, 1.1D derinlikteki deney verisi direnci farkı yüzde 3.56'dır. Model ve deney verileri C4 derinliğe bağlı direnç sonuçlarına göre daha az öiktarda yüzde hataya sahiptir. Böylece C2 takıntı modelinin geçerlemesi da hem derin su için hem de derinliğe bağlı olarak sağlanmış olmaktadır.

4. HİDRODİNAMİK TÜREV ÇALIŞMALARI

Bu bölümde, HAD analizlerinde elde edilen verilerle doğrusal hidrodinamik türevlerin ve dümen katsayılarının tespiti yapılmıştır. Bölümlerde öncelikle her bir derinlik ve her bir yanal öteleme hızı (veya savrulma açısal hızı) için elde edilen boyutsuz kuvvet ve moment değerleri tablolar halinde paylaşılmıştır. Daha sonra her bir hidrodinamik türev farklı derinliklere göre sınıflandırılmış ve doğrusal olarak ifade edilmiştir. Doğrusal katsayıların deney verileri ile doğrulanması yapılmıştır. Daha sonra, dört farklı derinlikte elde edilen bu türevlerin derinliğe bağlı birer eğrisi elde edilmiştir. En son olarak yatay stabilite sayısı farklı derinliklere göre tespit edilmiş ve sonuçların deney verileri ile doğrulanması yapılmıştır.

4.1 Hidrodinamik Model

Hidrodinamik model, Taylor seri açılımlı ve çapraz terimler içeren doğrusl hidrodinamik türevler kullanılarak oluşturulmuştur. Bunun sebebi statik stabilite için doğrusal hidrodinamik türevlerin kullanılıyor olmasıdır. Denklem 4.1, 4.2 ve 4.3'te üç serbestlik dereceli model için hidrodinamik modelin formülleri verilmiştir [19].

$$X_H = X_o + X_v * v^2 + X_{\boldsymbol{\delta}} * \delta^2 + X_d \tag{4.1}$$

$$Y_H = Y_v * v + Y_r * r + Y_{\boldsymbol{\delta}} * \delta \tag{4.2}$$

$$N_H = N_v * v + N_r * r + N_{\boldsymbol{\delta}} * \delta \tag{4.3}$$

Burada, X_H, X yönündeki ve Y_H, Y yönündeki hidrodinamik kuvvetleri ifade etmektedir. N_H ise N yönündeki hidrodinamik momenti göstermektedir. X_o katsayısı DSM'nin derin suda 6.5 knot hızla hareket ederken hiçbir dümen etkisi veya sürüklenme etkisi altında kalmadan doğrusal hareketinden elde edilen X doğrultusundaki direnç kuvvetleri toplamıdır. X_v katsayısı X yönündeki kuvvetlerin v yanal hızına göre birinci metrebe türevini ifade etmektedir. X_d derinliğe bağlı x yönünde etki eden kuvveti ifade etmektedir. $X_{\boldsymbol{\delta}}$ katsayısı, x yönünde dümen kaynaklı kuvvetlerin toplamını göstermektedir. Y_v katsayısı ise Y yönündeki kuvvetlerin v yanal

hızına göre birinci mertebe türevini ifade etmektedir. Y_r katsayısı Y yönündeki kuvvetlerin r savrulma açısal hızına göre birinci metrebe türevini ve $Y_{\boldsymbol{\delta}}$ katsayısı, Y yönünde dümen kaynaklı kuvvetlerin toplamını ifade etmektedir. N_v katsayısı N yönündeki momentlerin v yanal hızına göre birinci metrebe türevini ve N_r katsayısı ise N yönündeki momentlerin r savrulma açısal hızına göre birinci metrebe türevini göstermektedir. $N_{\boldsymbol{\delta}}$ katsayısı, N yönünde dümen kaynaklı momentlerin toplamıdır. X_o hariç bütün katsayılar derinliğe göre değişmektedir.

Buraya kadar derin su olarak bahsedilen derinlik, türevlere eğri uydurabilmek için sonlu bir derinlik seçilmek zorundadır. Bu derinlik yüzey etkilerinin önemsiz olduğu derinliğe uygun olarak derinlik Froude sayısının 0.7'den küçük olduğu bir bölgede seçilmelidir [20]. Ayrıca Hoerner kitabında dalga direnci değişimi sınırını 5D olarak vermiştir [36]. Bu çalışmada ise bahsi geçen derin su derinliği deney setine uygun olarak 6D olarak seçilmiştir [10] ve derinlik Froude sayısı 0.61'dir. DSM Derin su analizleri ile 6D derinlikte yapılan direnç analizleri karşılaştırılmış olup farkı %3 olarak tespit edilmiştir ve %3 olan direnç farkı 6D derinlikte X0 ve Xd hidrodinamik türevlerinin toplamına karşılık gelmektedir.

4.2 Hidrodinamik Türevlerin Derinliğe Göre Değişmesindeki Fizik

Hidrodinamik türevlerin derinliğe bağlı olarak değişmesindeki fiziksel açıklama, derin suda etkisi olmayan fakat yüzeye yaklaştıkça etkisi artan serbest su yüzeyi etkisidir. Serbest su yüzeyine yaklaşan denizaltı modeli, düşey doğrultuda denizaltının üst tarafında kalan akışkan miktarını azaltacaktır. Bernaulli prensibine göre hacmi azalan akışkanın hızı bir miktar artacaktır. Artan hıza göre dinamik basınç dağılımında meydana gelen değişim, doğrusallaştırılmıl olarak denklem 4.4'te ifade edilmiştir.

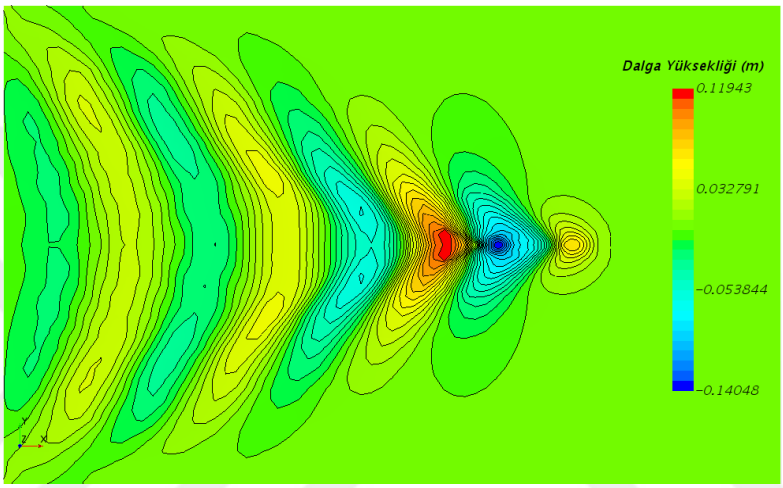
$$\Delta p = \rho V \delta V \tag{4.4}$$

Burada Δp dinamik basınç değişimini, ρ akışkanın yoğunluğunu, V akışkanın hızını ve δV ise akışkandaki sonlu artış miktarını temsil etmektedir. Bu basınç değişimi serbest su yüzeyinin basınç dengesini bozacak ve bozulmaya karşı koyamayan serbest su yüzeyi basınç dengesi sağlanana kadar dikey yönlü dalgalar oluşuracaktır.

Normalde akışkan direncinden meydana gelen basınç dağılımına ek olarak serbest su yüzeyi bozunumlarından da bir akışkan etkisi eklenecektir. Öyle ki denizaltının baş

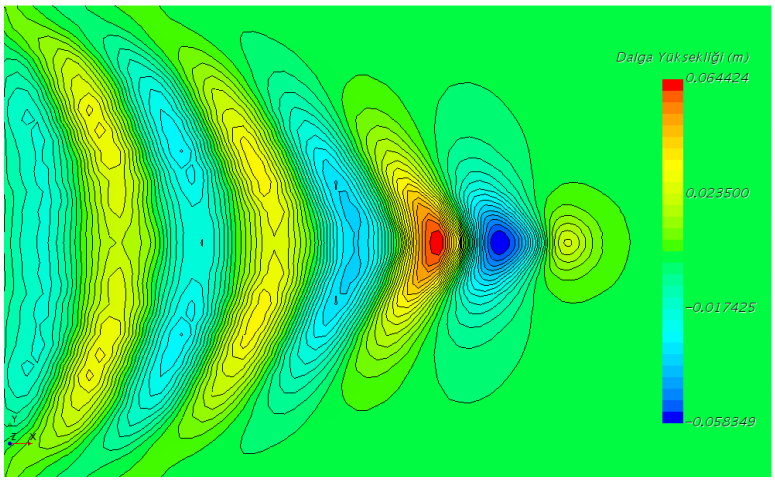
durma noktası yüksek basınç alanı olduğu için bu bölge akışkanın dalga tepesi yapmasına ve kıç taraftaki düşük basınç bölgesi ve vorteks içeren akışkan bölge ise dalga çukuru oluşumuna sebep olacaktır. Bu da derinlik ile hidrodinamik türevler arasındaki bağıntıyı fiziksel olarak açıklamaktadır [4].

Şekil 4.1'de 1.1D derinlikteki denizaltı modelinin oluşturmuş olduğu dalga profili verilmiştir. En yüksek dalga tepesi 0.12 metre, en alçak dalga çukuru ise -0.14 metredir. Dalga genliği denizaltı uzunluğunun %6'sı kadardır ve dalga hızı akışkan hızına eşittir.



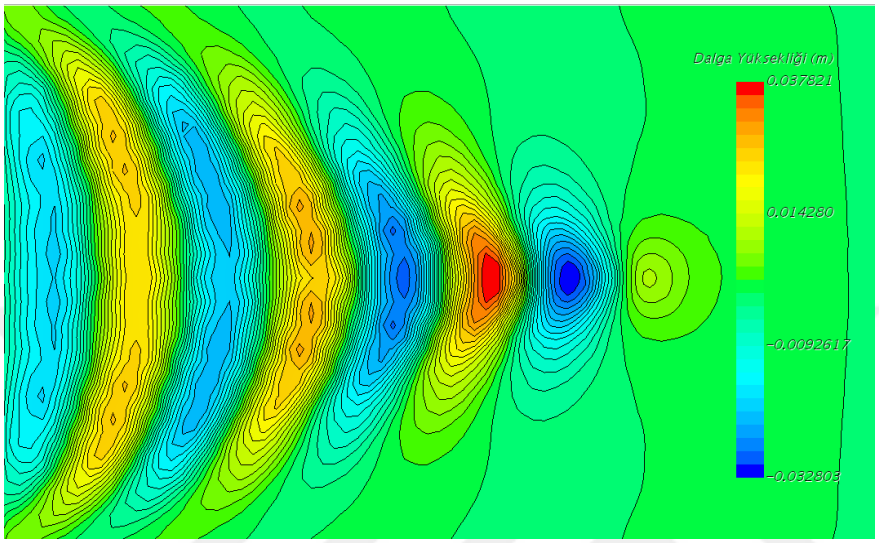
Şekil 4.1: 1.1D derinlikte 0 sürüklenme açılı DSM dalga profili.

Şekil 4.2'de 2.2D derinlikteki denizaltı modelinin oluşturmuş olduğu dalga profili verilmiştir. En yüksek dalga tepesi 0.06 metre, en alçak dalga çukuru ise -0.06 metredir. Dalga genliği denizaltı uzunluğunun %3ü kadardır. Dalga genliği derinlik arttıkça azalmıştır yani denizaltı serbest su yüzeyi ile daha az etkileşime girmiştir.



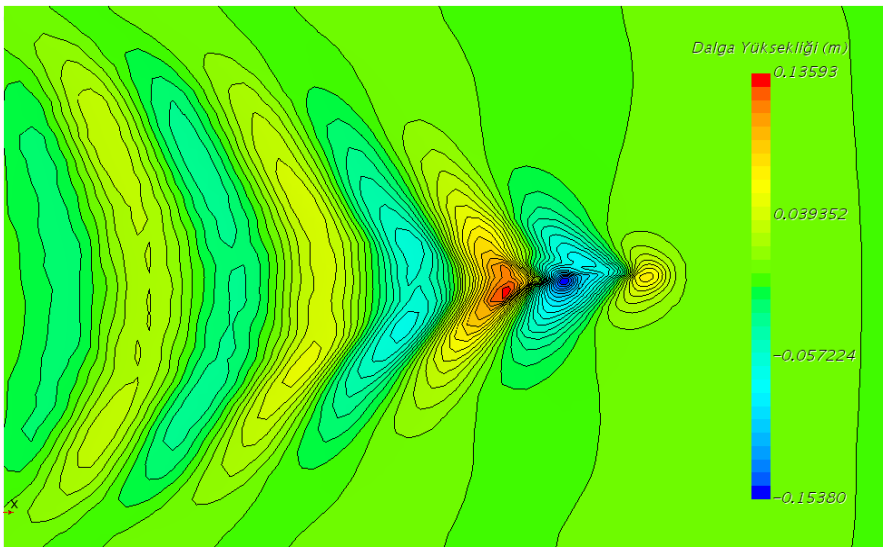
Şekil 4.2: 2.2D derinlikte 0 sürüklenme açılı DSM dalga profili.

Şekil 4.3'de 3.3D derinlikteki denizaltı modelinin oluşturmuş olduğu dalga profili verilmiştir. En yüksek dalga tepesi 0.04 metre, en alçak dalga çukuru ise -0.03 metredir. Dalga genliği denizaltı uzunluğunun %2si kadardır. Dalga genliği derinlik arttıkça daha da azalmıştır yani denizaltı serbest su yüzeyi ile daha az etkileşime girmiştir.



Şekil 4.3: 3.3D derinlikte 0 sürüklenme açılı DSM dalga profili.

Şekilde görülmektedir ki yukarıdaki fiziksel açıklamaya uygun olarak denizaltı geometrisinin baş tarafında dalga tepesi kıç tarafında da dalga çukuru oluşmuştur. Bu dalga tepesi ve dalga çukurunun denizaltı ile etkileşimi derinliğe bağlı katsayı değişimine sebep olmaktadır. Şekil 4.4'te ise 1.1D derinlikte ve 4 derece sürüklenme açısına sahip denizaltı dalga profili paylaşılmıştır.



Şekil 4.4: 1.1D derinlikte 4 sürüklenme açılı DSM dalga profili.

Sürüklenme açısının artması ile oluşan dalga tepesi 0.13 metre ve oluşan dalga çukuru ise -0.15 metredir. Dalga genliği denizaltı uzunluğunun %7si kadardır. Görülmektedir ki 1.1D sıfır derece sürüklenme açısındaki dalga genliğinden daha fazla bir dalga genliği elde edilmiştir. Bu durumun fiziksel açıklaması ise baş durağan noktanın rüzgarüstü baş omuzluk tarafa kayması, kıç alçak basınç noktasının kıç omuzluğa doğru kayması ve böylece daha fazla vorteks ile etkileşim içinde olmasıdır [4]. Burada dikkat çekici husus artık dalgaların denizaltı modeline simetrik etkimemesidir. Sürüklenme açısı ve savrulma açısal hızı bu sebepten önem kazanmaktadır.

4.3 Farklı Derinliklerde Doğrusal Türevlerin Tespiti

Bu kısımda, X_0, X_v, X_d, X_δ, Y_v, Y_r, Y_δ, N_v, N_r ve N_δ türevlerinin analizlere göre elde edilen boyutsuz kuvvet ve moment değerleri paylaşılmıştır.

4.3.1 X_0

X_0 katsayısı, DSM'nin derin suda 6.5 knot hızla hareket ederken hiçbir dümen etkisi veya sürüklenme etkisi altında kalmadan doğrusal hareketinden elde edilen X doğrultusundaki direnç kuvvetleri toplamıdır. Buna karşılık gelen X kuvveti A05 kodlu sıfır derece sürüklenme ve sıfır derece dümen açılı HAD analizinden alınmıştır. HAD analizleri sonucu elde edilen kuvvet boyutsuzlaştırılmıştır. Boyutsuz kuvvet değeri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1: X_0 boyutsuz kuvvet değeri.

Katsayı	Boyutsuz değeri
X_0	$-1.25*10^{-3}$

4.3.2 X_v

X_v katsayısı, X yönündeki kuvvetlerin v yanal hızına göre birinci mertebe türevini ifade etmektedir. X_v katsayısının tespitinde A05, A06, A07 ve A08 HAD analizlerinden, dümen açıları 0 olan ve sürüklenme açıları -4 ile 4 arasında ikişer derece ile değişen statik sürüklenme analizleri tercih edilmiştir. Çizelge 4.2'de sürüklenme açısına göre X_v boyutsuz manevra türevleri verilmiştir. Kuvvetler, boyutsuzlaştırma bölümünde anlatıldığı gibi boyutsuzlaştırılmıştır. Yanal hız hesabında, sürüklenme açısından yanal öteleme hızına geçilmiştir. Sürüklenme açısından yanal öteleme hızının hesaplaması Formül 4.5'te verilmiştir.

$$v = U * \sin(sürüklenme\ açısı) \quad (4.5)$$

Çizelge 4.2: Derinliğe ve sürüklenme açısına bağlı X_v boyutsuz kuvvet değerleri.

Sürüklenme	Derinlik			
	1.1D	2.2D	3.3D	6D
-4	$-2.04*10^{-5}$	$-9.25*10^{-6}$	$-8.27*10^{-6}$	$-7.79*10^{-6}$
-2	$-5.12*10^{-6}$	$-2.31*10^{-6}$	$-2.07*10^{-6}$	$-1.95*10^{-6}$
0	0	0	0	0
2	$-5.12*10^{-6}$	$-2.31*10^{-6}$	$-2.07*10^{-6}$	$-1.95*10^{-6}$
4	$-2.04*10^{-5}$	$-9.25*10^{-6}$	$-8.27*10^{-6}$	$-7.79*10^{-6}$

4.3.3 X_d

X0 değerinin sabit kabul edilmesinden sonra derinliğe bağlı olarak X doğrultusundaki kuvvetin hidrodinamik modele etkisi X_d katsayısı ile verilmiştir. X_0 katsayısı sabit kabul edilmeyerek de X_0 ve X_d katsayıları birleştirilebilirdi. Fakat burada, türevlerin ayrıştırılması tercih edilmiştir. X_d katsayısı, farklı derinliklerde A05, A06, A07 ve A08 HAD analizlerinden dümen açısı ve sürüklenme açısı sıfır olan analizlerin seçilmesi ile elde edilmiştir. X eksenindeki kuvvet değerlerinin A05 analizindeki X kuvvetinden (yani X_0 hidrodinamik türevinden) çıkartılarak elde edilen dört adet kuvvetten oluşmaktadır. Derinlik azaldıkça artan X kuvveti mevcuttur. Kuvvet değerleri boyutsuz şekilde Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3: Derinliğe bağlı X_d boyutsuz kuvvet değerleri.

Derinlik	Boyutsuz değeri
1.1D	$-1.61*10^{-3}$
2.2D	$-3.97*10^{-4}$
3.3D	$-1.72*10^{-4}$
6D	$-4.63*10^{-5}$

4.3.4 X_δ

X_δ katsayısı, x yönünde dümen kaynaklı kuvvetlerin toplamını ifade etmektedir. Derinliğe bağlı X_δ kuvvelerinin tespitinde, A05, A06, A07 ve A08 HAD analizlerinden sürüklenme açısı 0 olan analizlerin X yönündeki dümen açısına bağlı kuvvet değerinden X_0 ve X_d katsayı değerleri çıkartılarak elde edilmiştir. Dümen kuvvetleri x yönünde dümen açısına göre 0 derece etrafında simetrik davranış göstermektedir. Bu sebeple (Ax^2+B) şeklinde eğriler türetilerek A katsayısı tespit edilmiştir. A katsayı değerleri HAD analiz tipine göre ve dümen açısına göre Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Böylece, X_δ kuvvetlerinin boyutsuz değerleri derinliğe ve derece cinsinden dümen açısına göre tespit edilmiştir.

Çizelge 4.4: Derinliğe ve dümen açısına göre X_δ boyutsuz kuvvetleri.

Dümen Açısı	Derinlik			
	1.1D	2.2D	3.3D	6D
-15	$-1.67*10^{-4}$	$-1.57*10^{-4}$	$-1.55*10^{-4}$	$-1.55*10^{-4}$
-10	$-6.94*10^{-5}$	$-6.66*10^{-5}$	$-6.64*10^{-5}$	$-6.63*10^{-5}$
-5	$-1.49*10^{-5}$	$-1.46*10^{-5}$	$-1.43*10^{-5}$	$-1.50*10^{-5}$
0	0	0	0	0
5	$-1.49*10^{-5}$	$-1.46*10^{-5}$	$-1.43*10^{-5}$	$-1.50*10^{-5}$
10	$-6.94*10^{-5}$	$-6.66*10^{-5}$	$-6.64*10^{-5}$	$-6.63*10^{-5}$
15	$-1.67*10^{-4}$	$-1.57*10^{-4}$	$-1.55*10^{-4}$	$-1.55*10^{-4}$

4.3.5 Y_v

Y_v katsayısı Y yönündeki kuvvetlerin v yanal hızına göre birinci metrebe türevini ifade etmektedir. Y_v katsayısının tespitinde A05, A06, A07 ve A08 HAD analizlerinden, dümen açıları 0 olan ve sürüklenme açıları -4 ile 4 arasında ikişer derece değişen statik sürüklenme analizleri tercih edilmiştir. Analiz sonuçlarından elde edilen kuvvetler Çizelge 4.5'te boyutsuz bir şekilde verilmiştir.

Çizelge 4.5: Derinliğe ve sürüklenme açısına göre Y_v boyutsuz kuvvetleri.

Sürüklenme	Derinlik			
	1.1D	2.2D	3.3D	6D
-4	$-4.04*10^{-3}$	$-3.19*10^{-3}$	$-2.57*10^{-3}$	$-1.96*10^{-3}$
-2	$-2.02*10^{-3}$	$-1.60*10^{-3}$	$-1.29*10^{-3}$	$-9.91*10^{-4}$
0	$-1.02*10^{-5}$	$-1.30*10^{-5}$	$-1.54*10^{-5}$	$-1.77*10^{-5}$
2	$2.00*10^{-3}$	$1.58*10^{-3}$	$1.26*10^{-3}$	$9.56*10^{-4}$
4	$4.02*10^{-3}$	$3.17*10^{-3}$	$2.54*10^{-3}$	$1.93*10^{-3}$

4.3.6 Y_r

Y_r katsayısı Y yönündeki kuvvetlerin r savrulma açısal hızına göre birinci metrebe türevini ifade etmektedir. Y_r türevinin tespitinde B05, B06, B07 ve B08 saf sapma HAD analizlerinden, dümen açıları 0 olan ve savrulma açıları 0.04, 0.08, 0.12 ve 0.16 olan saf savrulma HAD analizleri tercih edilmiştir [7]. Katsayılar literatüdeki gibi tespit edilmiştir [5]. Analiz sonuçlarından elde edilen kuvvet değerleri boyutsuz olarak Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6: Derinliğe ve savrulma açısına göre Y_r boyutsuz kuvvetleri.

Savrulma açısı	Derinlik			
	1.1D	2.2D	3.3D	6D
0	$1.13*10^{-5}$	$1.25*10^{-5}$	$1.53*10^{-5}$	$1.64*10^{-5}$
0.04	$3.03*10^{-4}$	$4.87*10^{-4}$	$5.73*10^{-4}$	$2.93*10^{-4}$
0.08	$5.95*10^{-4}$	$9.61*10^{-4}$	$1.13*10^{-3}$	$5.69*10^{-4}$
0.12	$8.87*10^{-4}$	$1.44*10^{-3}$	$1.69*10^{-3}$	$8.45*10^{-4}$
0.16	$1.18*10^{-3}$	$1.91*10^{-3}$	$2.25*10^{-3}$	$1.12*10^{-3}$

4.3.7 Y_δ

Y_δ türevi, Y yönünde dümen kaynaklı kuvvetlerin toplamını ifade etmektedir. Derinliğe bağlı Y_δ kuvvelerinin tespitinde, A05, A06, A07 ve A08 HAD analizlerinden sürüklenme açısı 0 olan analizlerin, Y yönündeki dümen açısına bağlı kuvvet değeri belirlenerek tespit edilmiştir. Dümen kuvvetleri y yönünde dümen açısına göre 0 derece etrafında simetrik olmayan davranış göstermektedir. Bu sebeple Ax+B şeklinde eğriler türetilerek A katsayısı elde edilir. A değerleri HAD analiz tipine göre ve dümen açısına göre Çizelge 4.7'de verilmiştir. Tablodaki Y_δ kuvveti derinliğe ve derece cinsinden dümen açısına göre boyutsuz olarak verilmiştir.

Çizelge 4.7: Derinliğe ve dümen açısına göre Y_δ boyutsuz kuvvetleri.

Dümen Açısı	Derinlik			
	1.1D	2.2D	3.3D	6D
-15	$-1.28*10^{-3}$	$-1.19*10^{-3}$	$-1.17*10^{-3}$	$-1.15*10^{-3}$
-10	$-8.12*10^{-4}$	$-7.72*10^{-4}$	$-7.61*10^{-4}$	$-7.51*10^{-4}$
-5	$-4.47*10^{-4}$	$-4.32*10^{-4}$	$-4.24*10^{-4}$	$-4.21*10^{-4}$
0	$-1.30*10^{-5}$	$-1.54*10^{-5}$	$-1.76*10^{-5}$	$-1.02*10^{-5}$
5	$4.47*10^{-4}$	$4.32*10^{-4}$	$4.24*10^{-4}$	$4.21*10^{-4}$
10	$8.12*10^{-4}$	$7.72*10^{-4}$	$7.61*10^{-4}$	$7.51*10^{-4}$
15	$1.28*10^{-3}$	$1.19*10^{-3}$	$1.17*10^{-3}$	$1.15*10^{-3}$

4.3.8 N_v

N_v katsayısı N yönündeki momentlerin v yanal hızına göre birinci metrebe türevini ifade etmektedir. N_v türevinn tespitinde aynı Y_v türevi tespitindeki gibi A05, A06, A07 ve A08 HAD analizlerinden, dümen açıları 0 olan ve sürüklenme açıları -4 ile 4 arasında ikişer derece değişen statik sürüklenme analizleri tercih edilmiştir. Analiz neticesinde elde edilen boyutsuz N_v moment değerleri boyutsuz olarak Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8: Derinliğe ve sürüklenme açısına göre N_v boyutsuz momentleri.

Sürüklenme Açısı	Derinlik			
	1.1D	2.2D	3.3D	6D
-4	$1.68*10^{-4}$	$1.19*10^{-4}$	$-4.82*10^{-5}$	$-9.49*10^{-4}$
-2	$8.46*10^{-5}$	$6.02*10^{-5}$	$-2.46*10^{-5}$	$-4.75*10^{-4}$
0	$8.46*10^{-7}$	$8.31*10^{-7}$	$-8.61*10^{-7}$	$-4.43*10^{-7}$
2	$-8.29*10^{-5}$	$-5.85*10^{-5}$	$2.28*10^{-5}$	$4.74*10^{-4}$
4	$-1.67*10^{-4}$	$-1.18*10^{-4}$	$4.65*10^{-5}$	$9.48*10^{-4}$

4.3.9 N_r

N_r türevi N yönündeki momentlerin r savrulma açısal hızına göre birinci metrebe türevini ifade etmektedir. N_r katsayısının tespitinde B05, B06, B07 ve B08 HAD analizlerinden, dümen açıları 0 olan ve savrulma açıları 0.04, 0.08, 0.12 ve 0.16 olan saf savrulma HAD analizleri tercih edilmiştir [7]. Katsayılar literatüdeki gibi tespit edilmiştir [5]. Analiz sonuçlarından elde edilen boyutsuz N_r değerleri Çizelge 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.9: Derinliğe ve savrulma açısal hızına göre N_r boyutsuz momentleri.

Savrulma açısı	Derinlik			
	1.1D	2.2D	3.3D	6D
0	$2.65*10^{-7}$	$2.40*10^{-7}$	$2.32*10^{-7}$	$-2.06*10^{-7}$
0.04	$5.91*10^{-3}$	$5.73*10^{-3}$	$5.09*10^{-3}$	$-6.55*10^{-3}$
0.08	$1.18*10^{-2}$	$1.15*10^{-2}$	$1.02*10^{-2}$	$-1.31*10^{-2}$
0.12	$1.77*10^{-2}$	$1.72*10^{-2}$	$1.53*10^{-2}$	$-1.96*10^{-2}$
0.16	$2.36*10^{-2}$	$2.29*10^{-2}$	$2.03*10^{-2}$	$-2.62*10^{-2}$

4.3.10 N_δ

Nδ türevi, N yönünde dümen kaynaklı momentlerin toplamını ifade etmektedir. Derinliğe bağlı Nδ kaynaklı momentlerin tespitinde, A05, A06, A07 ve A08 HAD analizlerinden sürüklenme açısı 0 olan analizlerin N yönündeki dümen açısına bağlı moment sonucu belirlenerek tespit edilmiştir.

Dümen momentleri N yönünde dümen açısına göre 0 derece etrafında simetrik olmayan bir davranış göstermektedir. Bu sebeple Ax+B şeklinde eğriler türetilerek A katsayısı tespit edilir. A değerleri HAD analiz tipine göre ve dümen açısına göre

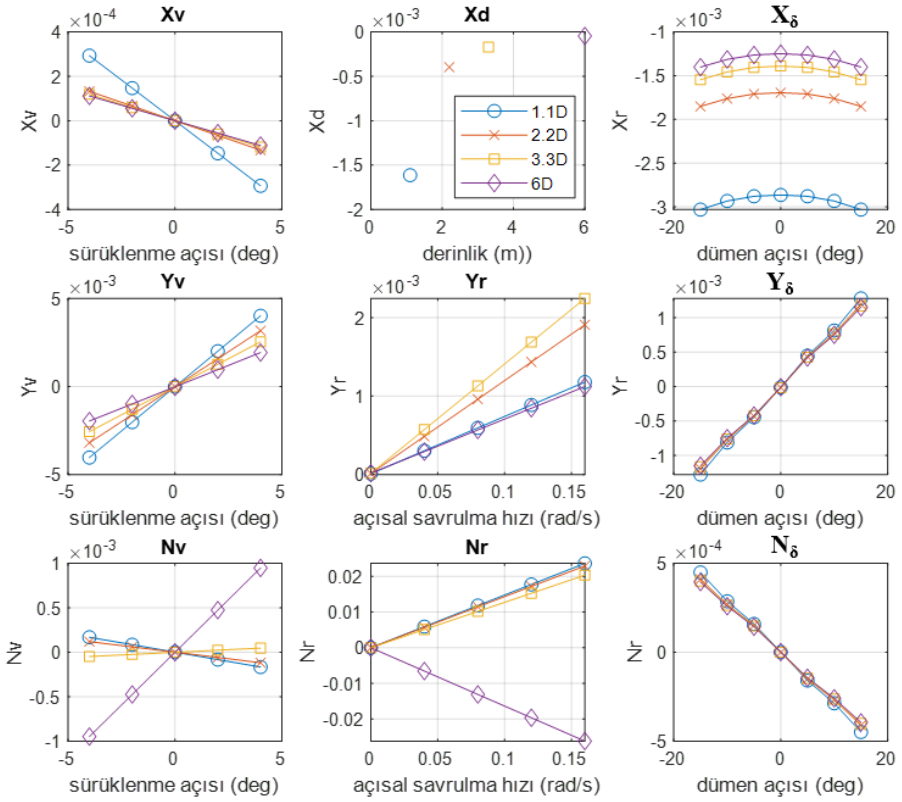
Çizelge **4.10**'da verilmiştir. Tablodaki N_δ momenti, derinliğe ve derece cinsinden dümen açısına göre verilmiştir.

Çizelge 4.10: Derinliğe ve dümen açısına göre N_δ boyutsuz momentleri.

Dümen Açısı	Derinlik			
	1.1D	2.2D	3.3D	6D
-15	$4.49*10^{-4}$	$4.11*10^{-4}$	$4.00*10^{-4}$	$3.95*10^{-4}$
-10	$2.87*10^{-4}$	$2.68*10^{-4}$	$2.64*10^{-4}$	$2.59*10^{-4}$
-5	$1.59*10^{-4}$	$1.50*10^{-4}$	$1.47*10^{-4}$	$1.44*10^{-4}$
0	$8.31*10^{-7}$	$-8.61*10^{-7}$	$-4.43*10^{-7}$	$8.46*10^{-7}$
5	$-1.59*10^{-4}$	$-1.50*10^{-4}$	$-1.47*10^{-4}$	$-1.44*10^{-4}$
10	$-2.87*10^{-4}$	$-2.68*10^{-4}$	$-2.64*10^{-4}$	$-2.59*10^{-4}$
15	$-4.49*10^{-4}$	$-4.11*10^{-4}$	$-4.00*10^{-4}$	$-3.95*10^{-4}$

4.4 Derinlikle Değişen Katsayılara Eğri Türetme

Bu bölümde, Bölüm 5.1'de başlıklar altında verilen boyutsuz kuvvet ve momentler farklı derinliklere göre sınıflandırılmıştır. Buna göre, Y_v ve N_v türevlerinde yanal öteleme v hızına göre, Y_r ve N_r türevlerinde savrulma açısal hızına göre, X_δ, Y_δ ve N_δ katsayılarında ise dümen açısına göre birinci mertebe eğrileri ile oluşturulmuştur. Yalnızca X_δ türevinde kuvvet dağılımı gereği ikinci mertebe bir eğri kullanılmıştır. Deriñge göre değişen boyutsuz katsayı eğrileri Şekil 4.5'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5: Derinliğe göre değişen katsayılara türetilmiş eğriler.

Sonuç olarak, grafikte verilen dokuz adet türev değeri için o değerlere ait eğriler tespit edilmiş ve eğrilerin birinci mertebe eğiminden katsayıların sayısal değerlerine ulaşılmıştır. Derinliklere bağlı türev değerleri aşağıdaki tabloda toplu olarak verilmiştir. Tablodan da görüldüğü üzere farklı derinliklerde katsayıların değeri değişmektedir. Bu çalışma sonucu olarak dokuz adet doğrusal türevin dört farklı derinliğe göre değeri hesaplanmış ve otuz altı adet türev tespiti yapılmıştır. Boyutsuz katsayıların derinliğe göre sayısal değerleri Çizelge 4.11'de ve görsel olarak Şekil 4.6'de verilmiştir.

Çizelge 4.11: Boyutsuz katsayıların derinliğe göre sayısal değerleri.

Katsayı	Derinlik			
	1.1D	2.2D	3.3D	6D
X_v	$-4.20*10^{-3}$	$-1.90*10^{-3}$	$-1.70*10^{-3}$	$-1.60*10^{-3}$
X_d	$-1.60*10^{-3}$	$-3.97*10^{-4}$	$-1.72*10^{-4}$	$-4.63*10^{-4}$
X_δ	$-7.52*10^{-7}$	$-7.07*10^{-7}$	$-6.99*10^{-7}$	$-6.94*10^{-7}$
Y_v	$5.77*10^{-2}$	$4.56*10^{-2}$	$3.66*10^{-2}$	$2.79*10^{-2}$
Y_r	$5.60*10^{-3}$	$9.10*10^{-3}$	$1.07*10^{-2}$	$5.30*10^{-3}$
Y_δ	$-6.53*10^{-5}$	$-7.01*10^{-5}$	$-7.17*10^{-5}$	$-7.31*10^{-5}$
N_v	$-2.40*10^{-3}$	$-1.70*10^{-3}$	$6.79*10^{-4}$	$1.36*10^{-2}$
N_r	$4.20*10^{-3}$	$4.20*10^{-3}$	$2.80*10^{-3}$	$-4.40*10^{-3}$
N_δ	$-2.97*10^{-5}$	$-2.76*10^{-5}$	$-2.69*10^{-5}$	$-2.62*10^{-5}$

Dokuz türev için farklı derinliklerde farklı değerler bulunmuştur. Her bir türev değerinin derinlik değişim eğrileri oluşturulmuş ve verilmiştir. Bu grafikten de görülmektedir ki derinlik arttıkça birçok katsayının etkisi azalmakta, Y_v ve Y_δ gibi katsayıların değerleri ise artmaktadır.

Grafiklerde, her bir türev değerinin farklı derinliklerdeki dört adet değeri kullanılarak derinliğe bağlı eğrileri oluşturulmuş ve oluşturulan eğriler derinliğin bir fonksiyonu olacak şekilde denklem 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 ve 5.10'da ifade edilmiştir. Formüllerdeki Δ işareti metre cinsinden derinliği ifade etmektedir.

$$X0 = -1.25 * 10^{-3} \tag{5.3}$$

$$Xv = -4.50 * 10^{-4} * \Delta^{-3} - 1.6 * 10^{-3} \tag{5.2}$$

$$Xd = -5.06 * 10^{-4} * \Delta^{-2} + 8.22 * 10^{-6} \tag{5.3}$$

$$X\delta = -1.87 * 10^{-8} * \Delta^{-2} - 6.92 * 10^{-7} \quad (5.4)$$

$$Yv = -5.07 * 10^{-3} * \Delta^{2} + 3.03 * 10^{-2} * \Delta - 7.31 * 10^{-2} \quad (5.5)$$

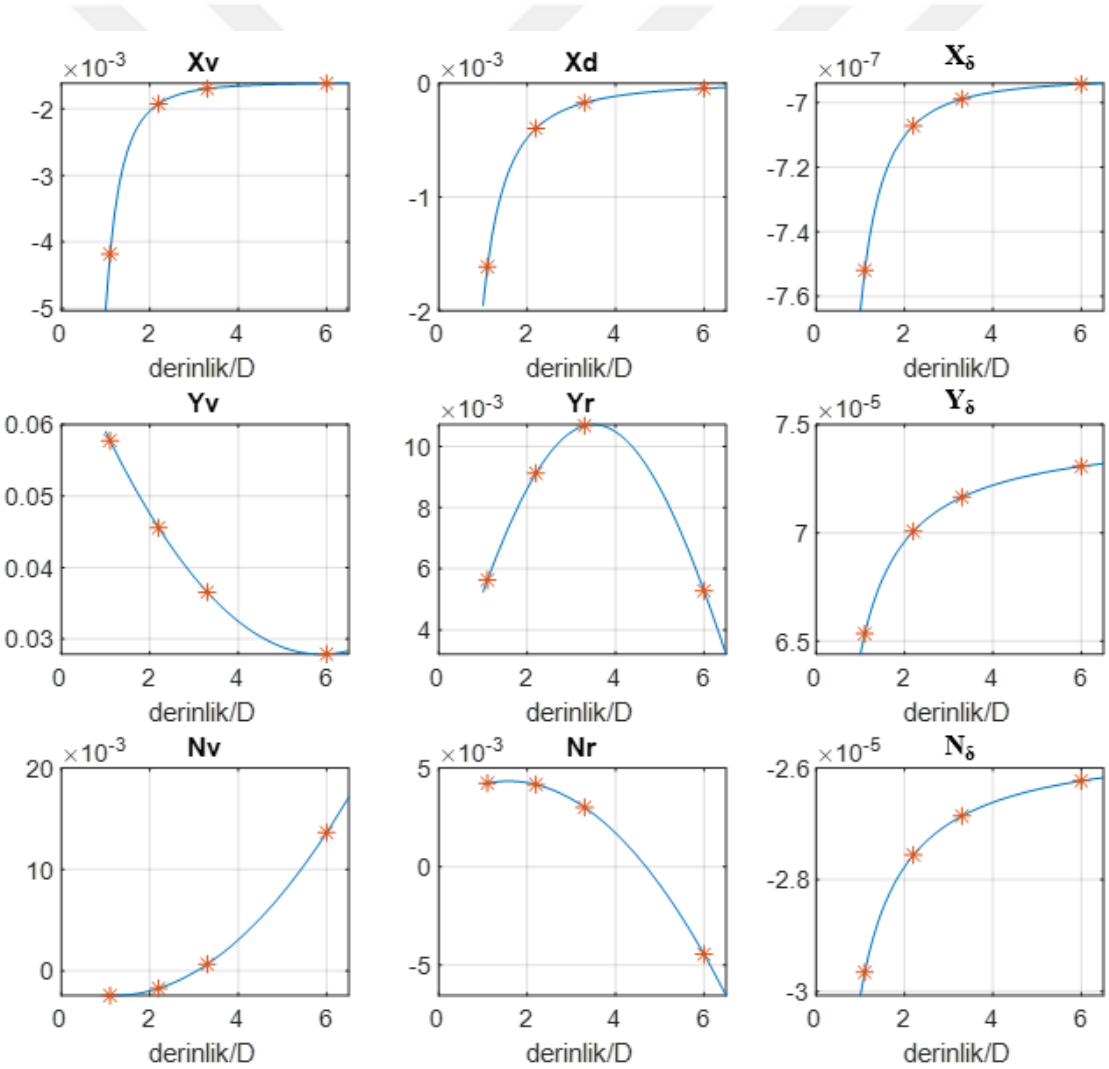
$$Yr = -1.07 * 10^{-2} * \sin(0.83 * \Delta + 0.89) \quad (5.6)$$

$$Y\delta = 5.28 * 10^{-6} * \Delta^{-1} - 7.48 * 10^{-5} \quad (5.7)$$

$$Nv = -2.68 * 10^{-3} * \Delta^{2} + 3.22 * 10^{-3} * \Delta + 1.46 * 10^{-3} \quad (5.8)$$

$$Nr = 1.74 * 10^{-3} * \Delta^{2} - 2.80 * \Delta - 3.21 * 10^{-3} \quad (5.9)$$

$$N\delta = -2.34 * 10^{-6} * \Delta^{-1} - 2.55 * 10^{-5} \quad (5.10)$$



Şekil 4.6: Katsayılar için derinlik değişim eğrileri.

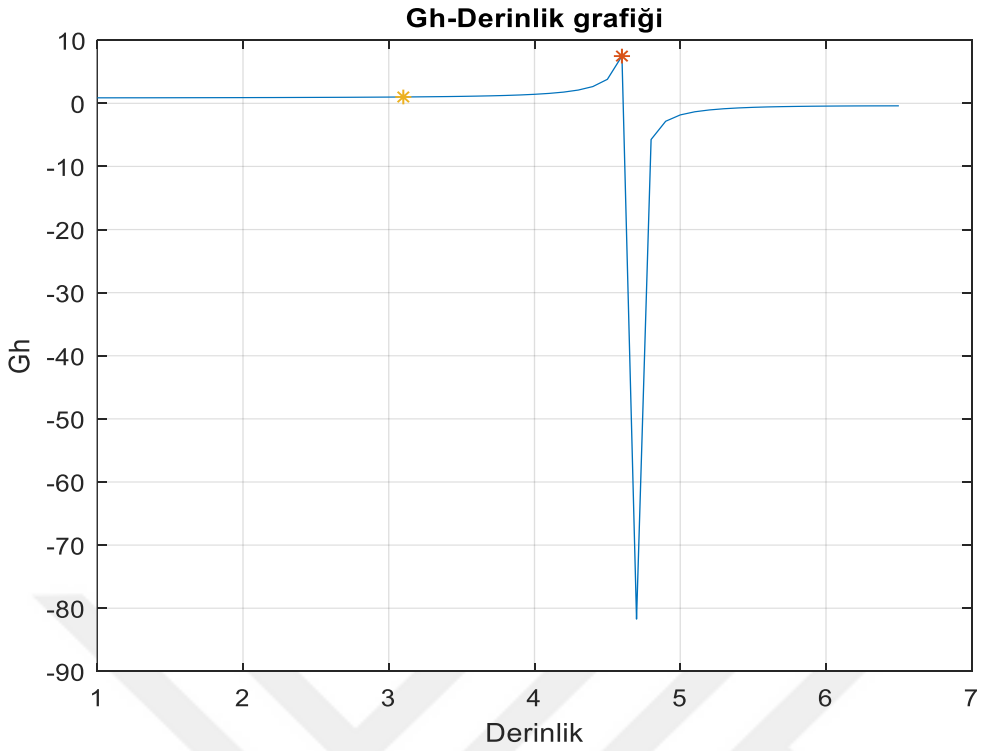
4.5 Yatay Stabilite Sayısı (G_h)

Yatay stabilite sayısı, denizaltı modeli için yatay kararlılığı temsil etmektedir ve yatay stabilite denklem 5.11'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$G_h = 1 - N'_v \frac{(Y'_r - m')}{[Y'_v(N'_r - x'_G m')]} \tag{5.14}$$

Bu çalışmada doğrusal türevlerin seçilmesinin sebebi, yatay stabilite formülünde sadece doğrusal türevlerin bulunmasıdır. Yatay stabilite şartı için bu değer 0'dan büyük olmalıdır. Bu değer, 1'den büyük olursa bu sefer de aşırı stabil olmuş olur. Yatay stabilitenin kararlı olduğu aralık ise G_h sayısının 0 ile 1 arasında değer aldığı haldir. Yatay stabilite kararsızlığı denizaltının sararsız olduğu bölgede herhangi bir bozucu etki ile rota tutamaması ve seyir sırasında hasar almasına sebep olabilmektedir. DSM'nin derin sularda yatay stabiliteye sahip olmadığı bilinmektedir [11]. Bu kararısızlık yelken ve kıç takıntılarından kaynaklı vortekslerin oluşumundan kaynaklandığı bildirilmektedir. Derin sularda DARPA geometrisinin yatay stabilite değeri -0.44'tür. Serbest su yüzeyi etkisinin denizaltının yatay stabilitesine olumlu etkisi olduğu ve daha stabil bir pozisyon elde edildiği bilinmektedir. Ayrıca stabilitenin kararlı bölgede artması manevra performansına da olumsuz etki yapacaktır. Derin dalmış denizaltılar için manevra yeteneği önemli olduğu için kararlı bölgede daha düşük yatay stabilite değeri (0 ile 1 arasında, 0'a yakın) uygunken, yüzeye yaklaştıkça satıh etkilerinden etkilenmemesi için kararlı bölgede daha yüksek (0 ile 1 arasında, 1'e yakın) bir yatay stabilite değeri uygundur [4]. Buna göre yapılan hesaplamalar sonucu denizaltı modeline ait derinliğe bağlı olarak değişen yatay stabilite eğrisi oluşturulmuştur. Yatay stabilite eğrisi Şekil 4.7'de paylaşılmıştır.

Bu çalışmada tespit edilen yatay stabilite değerleri deney çalışmalarından elde edilen sonuçlarda da olduğu gibi 0 ile 1 arasında değer alarak aslında DSM'nin yüzeye yakın seyrinde yatay stabiliteye sahip bir model olduğunu gösterir. Buna göre yüzeye yakın seyirlerde DSM modeli üç serbestlik dereceli sistemde yatay stabildir. Sarı yıldız olan nokta aşırı stabil geçiş derinliğini (1den büyük olduğu değeri), kırmızı yıldızın olduğu nokta ise en büyük yatay stabilite değerini göstermektedir. DSM modeli için farklı derinliklerde tespit edilen yatay stabilite değerleri Çizelge 4.12 paylaşılmıştır. Derinliğe bağlı yatay stabilite sonuçlarında görülmektedir ki denizaltı yüzeye yakın hareketlerinde 1'e yakın kararlı veya aşırı kararlıdır.



Şekil 4.7: Derinliğe bağlı yatay stabilite eğrisi.

Çizelge 4.12: Derinliğe bağlı Gh değerleri.

Derinlik	Gh
1.1D	0.875
2.2D	0.918
3.3D	1.047
6D	-0.439

Şekilden görülmektedir ki DSM modeli yatay stabilite sayısı 4.6D derinliğe kadar 0'dan büyüktür ve 3.1D'den itibaren 1'den büyük değer almaya başlamaktadır. Yani DSM su yüzeyinden 3.1D derinliğe kadar yatay stabiliteye sahip, 3.1D derinlikten 4.7D derinliğe kadar aşırı kararlı yatay stabiliteye sahiptir. 4.7D derinlikten itibaren ise yatay stabiliteye sahip değildir. 4.7'deki negatife gitme sebebi yatay stabilite sayısı formülünde paydada bulunan $N_r' - x_G' m'$ teriminin işaret değiştirmesidir.

4.6 Katsayı Eğrilerinin Ve Gh Sayısının Doğrulanması

Bu bölümde yukarıda tespit edilen türev eğrileri deney verilerine göre doğrulanmıştır. DSM modelinin farklı derinliklerdeki yatay stabilite değeri tespit edilmiştir. Farklı derinliklere ait yatay stabilite katsayısı daha önce deney yapılarak tespit edilmeye

çalışılmıştır [10]. Sonuçlar, bu çalışmada elde edilen yatay stabilite değerleriyle karşılaştırılmıştır.

Deneysel çalışmalarda DSM için derin su türev değeri olarak verilen yatay eksendeki doğrusal katsayılar mevcuttur [11]. Buna göre literatürde verilen katsayılar ve bu çalışmada elde edilen değerler karşılaştırılmış olup Çizelge 4.13'de yüzde hata farklarıyla beraber verilmiştir.

Çizelge 4.13: Derin su katsayılarının deney verisi ile karşılaştırması.

Hidrodinamik türev	Deneysel veri ile % hata
Y_v	0.17
Y_r	0.55
N_v	0.06
N_r	0.14

Tabloda da görüleceği üzere derin su için tespit edilen katsayılar deney sonuçları ile uyumlu mertebededir.

DSM modeli için 1D, 2D ve 2.5D derinliklerde deney çalışmaları da yapılmıştır [10]. Deney sonucunda elde edilen katsayılar ile bu çalışmada türetilen eğri formüllerinden elde edilen ve o derinliklere tekabül eden hidrodinamik türevler ile karşılaştırılmıştır. Katsayı karşılaştırması yüzde olarak farkları içerecek şekilde Çizelge 4.14'te paylaşılmıştır.

Çizelge 4.14: Derinliğe bağlı türevlerin deney verisi ile karşılaştırılması.

Katsayı	Derinlik			
	1.1D	2.2D	3.3D	6D
Y_v	0.83	4.04	3.18	0.19
Y_r	8.03	19.63	9.65	141.10
N_v	3.86	22.69	18.43	0.06
N_r	0.36	1.37	1.08	0.04

Tabloda da görüldüğü üzere farklı derinliklerde doğrusal hidrodinamik türevler ile derinliğe bağlı deneylerde geçen değerlerin karşılaştırılması sonucu Y_r türevi hariç diğer türevler uyumlu sonuç vermektedir. Büyük hata miktarına sahip Y_r türevinin, diğer deney çalışmalarında elde edilen derin suya ait türev değerleriyle uyumlu olmadığı görülmektedir [11].

Yatay stabilite değerleri karşılaştırması, yüzde farkları da içerecek şekilde Çizelge 4.15'te verilmiştir.

Çizelge 4.15: Derinliğe bağlı yatay stabilite değeri deney verisi ile karşılaştırması.

Derinlik	Gh sayısı % Hata
1D	38.40
2D	17.10
2.5D	11.10
6D	4.76

DSM'nin 4.6D derinlikten itibaren yatay stabiliteye sahip olmamasının sebebi fiziksel olarak savrulma momentinin savrulma açısal hızına göre birinci mertebe türevi olan Nr katsayının pozitif işaretten negatif işarete dönmesi ve denklem 5.11'de paydada bulunan $N_r' - x_G' m'$ teriminin bu derinlikten itibaren negatif işaretli olmasından kaynaklanmaktadır. Nr katsayısının işaret değiştirmesi modelin stabilitesini kararsız hale getirmiştir. Nr hidrodinamik katsayısının negatif işarete dönmesinin fiziksel anlamı ise, denizaltı modeline etkileyen savrulma momentlerinin artık denizaltı modelini pozitif işaretliyken savurduğu yönün tersine savurması anlamına gelmektedir. Yani r savrulma açısal hızının yönü değişecektir. Modeldeki kuvvet dengesini göz önüne alırsak bu ters yöne savrulma durumu kararsızlığa sebep olacaktır.

4.7 Derinliğe Bağlı Değişen Türevlerin ve Stabilitenin Değerlendirilmesi

Hidrodinamik türevlerin incelenmesi sonucunda görülmektedir ki yüzeye yaklaştıkça, direnç ve doğrusal sürüklenme kuvvetleri (X_d ve X_v) artmıştır. Ayrıca yüzeye yaklaştıkça yanal öteleme kuvveti artmıştır (Y_v). Yüzeye yaklaştıkça savrulma momenti pozitifken, negatif işaretli olmuştur (N_v), bunun fiziksel sebebi ise yüzeye yaklaştıkça kıç tarafındaki vorteks etkileşiminin artması ve moment merkezinin kıç tarafa kaymasıdır. Ayrıca toplam moment bileşeninin azaldığını ve manevrayı zrolaştırıcı bir etki doğurduğu gözlemlenebilir (N_v ve N_r). Yüzeye yaklaştıkça dümen direnç kuvveti (X_δ) artmış olup, dümen kaldırma kuvveti (Y_δ) ise azalmıştır. Yanı dümen performansının düştüğü açıktır. Bu da yine manevra performansına olumsuz bir etkidir.

Stabilite değerlendirmeleri ise şu şekildedir. DARPA modeli serbest su yüzeyine yaklaştıkça stabilitesi 0'dan büyük değerler almaktadır. Yani kararlıdır veya aşırı kararlıdır. Gh sayısının değeri 1'e yakındır, yani modelin manevra edilebilirliği serbest su yüzeyi yakınlarında düşüktür.

5. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

Geçmişte geliştirilmiş ve manevra simülasyonlarında kullanımı yaygın olan üç serbestlik dereceli denizaltı benzetim modeli kodu [21], DSM için uyarlanmıştır. Yazılım MATLAB programıdır. Bu uyarlamada hidrodinamik model kullanılırken bölüm 2.1'de anlatıldığı gibi doğrusal benzetim hidrodinamik modeli kullanılmıştır. İtki modeli ise sabit kuvvette itki üretecek şekilde modele aktarılmıştır. Sabit itki kuvveti, derin sudaki DSM modelini, 0 derece dümen açısı ve 0 derece sürüklenme açısı ile 6.5 knot hızla hareket ettirmektedir.

Simülasyon çalışmaları iki ana başlık altında incelenmiştir. İlk başlık DSM'ne ait statik stabilite hesabını, ikinci başlık ise DSM'ne ait dinamik sistem manevra çalışmalarını içermektedir.

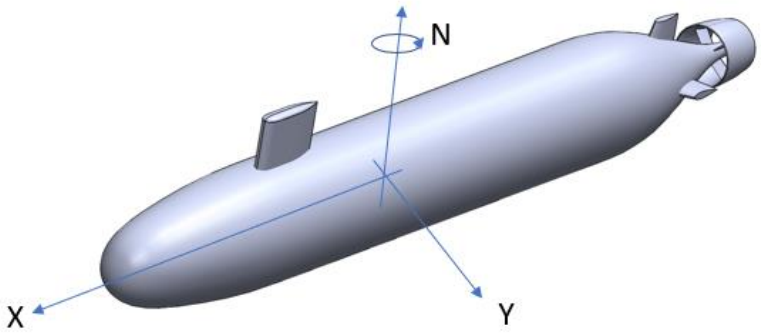
5.1 Üç Serbestlik Dereceli Hareket Denklemleri

Denizaltılarda manevra hareketini temsil etmek üzere 6 farklı serbestlik derecesi mevcuttur. Bu hareketlerden üçü öteleme diğer üçü ise dönme hareketleridir. Bu çalışmada düşey stabilite ile ilgili bir çalışma yapılmayacağından, çalışma kapsamında kullanılacak olan model üç serbestlik derecesine sahiptir. Üç serbestlik derecesi iki öteleme ve bir dönme hareketi ile temsil edilmektedir. Bu serbestlik derecelerine ait kuvvet - moment sembolleri, öteleme - dönme hızları ve konum - açı bilgileriyle birlikte Çizelge 5.1'de tanımlanmıştır.

Çizelge 5.1: Denizaltı serbestlik derecelerine ait semboller.

Serbestlik Derecesi	Açıklama	Kuvvet ve Moment	Öteleme ve Dönme Hızı	Pozisyon ve açı
1	X yönündeki öteleme	X	u	x
2	Y yönündeki öteleme	Y	v	y
3	N yönündeki dönme	N	r	ψ

Üç serbestlik dereceli sistem için Çizelge 5.1'de tanımlanan öteleme ve dönme hareketlerinin doğrultuları Şekil 5.1'de ok yönü pozitif yönü ifade edecek biçimde tanımlanmıştır.



Şekil 5.1: Denizaltı için üç serbestlik dereceli sistem

Kuvvet denklemleri de aşağıda matris formda verilen Denklem 2.1'deki gibi yazılabilir [37]. Burada bulunan katsayılar ek su kütlelerine karşılık gelir. Altı serbestli dereceli denklemden üç serbestlik dereceli denklemin eldesi Ek A'da anlatılmıştır.

$$\begin{bmatrix} m-\frac{\rho}{2}L^3X'_{\dot{u}} & 0 & -y_G m \\ 0 & m-\frac{\rho}{2}L^3Y'_{\dot{v}} & x_G m-\frac{\rho}{2}L^4Y'_{\dot{r}} \\ -y_G m & x_G m-\frac{\rho}{2}L^4N'_{\dot{v}} & I_z-\frac{\rho}{2}L^5N'_{\dot{r}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ N \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Denklem 2.1'deki m terimi denizaltı kütlesini, $\boldsymbol{\rho}$ terimi deniz yoğunşuğunu, L denizaltı uzunluğunu, Iz denizaltı savrulma eylemsizlik momentini, X_G ve Y_G terimleri sırayla boyuna ve yanal kütle merkezlerini temsil etmektedir. Denklemdeki diğer terimler ek su kütlesidir. Ek su kütleleri DSM modeli için belirli olup Çizelge 5.2'de paylaşılmıştır [11].

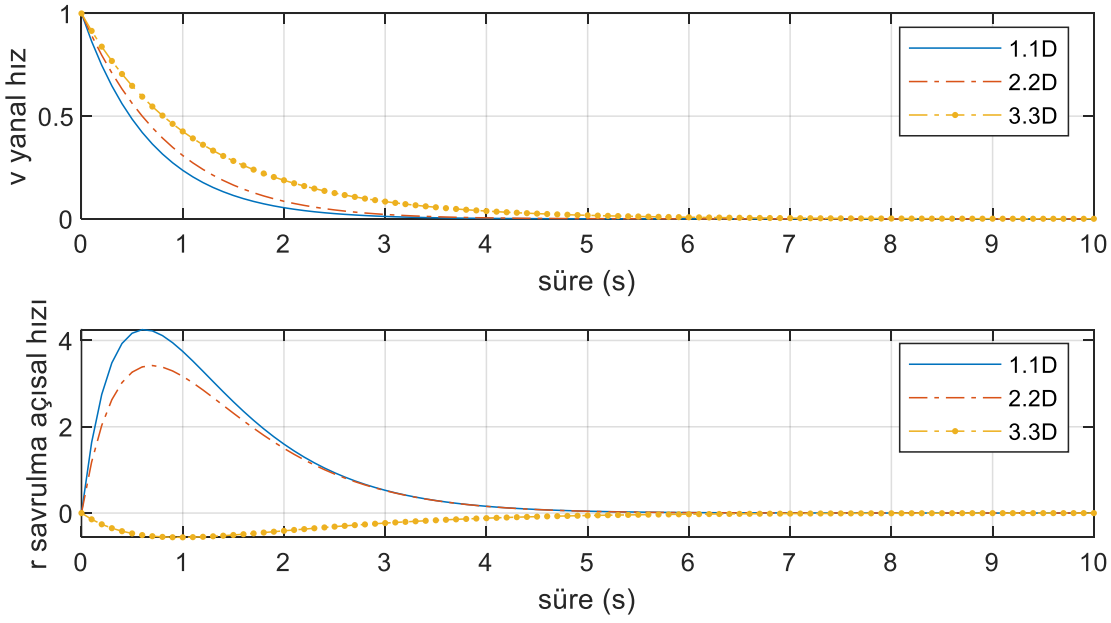
Çizelge 5.2: DSM modeli için ek su kütleleri

Ek su kütlesi	Boyutsuz Değeri
Y'_v	$-1.619*10^{-2}$
Y'_r	$3.98*10^{-4}$
N'_v	$3.96*10^{-4}$
N'_r	$-8.97*10^{-4}$

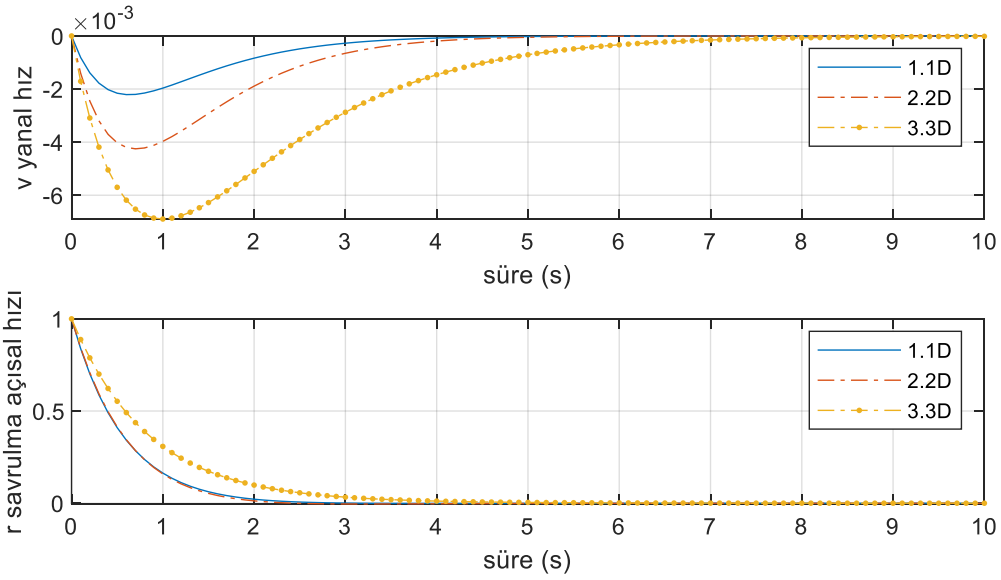
5.2 Statik Stabilite Cevabı

Sistemin statik stabilite hesabı yapılırken benzer çalışmalarda kullanılan bir yöntem izlenmiştir [10]. Birinci sistemde DSM modeli dümen açısı 0 derece iken başlangıçta boyutsuz büyüklüğü 1 olan u doğrusal hızı, boyutsuz büyüklüğü 1 olan v yanal hızı, ve başlangıç şartları seçilmiştir. Sonuçlar farklı derinliklere göre Şekil 5.2'de verilmiştir. Görülmektedir ki yüzeye yaklaştıkça modelin yanal hızı daha çabuk sönümlenmiş ve savrulma açısal hızında ise sistem daha çok pik yapmıştır. Bunun sebebi modelin statik stabilitesinin yüzeye yaklaştıkça bire yaklaşmasına ve birden büyük değerler alması olmalıdır. Ayrıca Nv değerinin 3D civarında işaret değiştirmesi, r savrulma hızının yön değiştirmesine sebep olmuş olmasıdır.

İkinci sistemde DSM modeli dümen açısı 0 derece iken başlangıçta boyutsuz büyüklüğü 1 olan u doğrusal hızı, boyutsuz büyüklüğü 1 olan r savrulma açısal hızı ve başlangıç şartları seçilmiştir. Sonuçlar aşağıdaki şekilde farklı derinliklere göre Şekil 5.3'de paylaşılmıştır. Şekilde görülmektedir ki yüzeye yaklaştıkça modelin savrulma açısal hızı daha çabuk sönümlenmiş ve yanal hızında ise sistem daha az pik yaparak daha çabuk sönümlenmiştir. Bunun sebebi modelin statik stabilitesinin yüzeye yaklaştıkça bire yaklaşmasına ve birden büyük değerler alması olmasıdır.



Şekil 5.2: Boyutsuz 1 yanal hızı ile başlayan statik stabilite testi.



Şekil 5.3: Boyutsuz 1 savrulma açısal hızı ile başlayan statik stabilite testi.

Sonuç olarak, sistem farklı derinliklerde aynı testlere farklı cevap vermektedir. DSM yüzeye yaklaştıkça savrulma yönünde ataleti azalan bir davranış sergilerken, yanal öteleme yönünden daha ataletli bir davranış sergilemektedir. Tüm bunların yanında DSM modeli için geçici hal rejimi gerçek zamana göre on saniyeler mertebesinde tamamen sönümlenmiş olup daha sonra model kalıcı hal rejimine geçmiştir. Statik stabilite simülasyon çalışmalarında, hidrodinamik model için türetilen derinliğe bağlı türevler kullanılmış ve simülasyon farklı derinliklerde test edilmiştir. 4.2D ve daha derin sular için simülasyon modeli yakınsayan bir sonuç vermemektedir. 4.2D derinlik, yatay stabilite katsayısının hızla ıraksayan pozitif bölgesinin başlangıcıdır; öyle ki 0.1 derinlik artışına karşılık yatay stabilite katsayısındaki artış yüzde 10 mertebesinden fazladır.

5.3 Dinamik Sistem Manevra Çalışmaları

Sistemin statik stabilitesini test ettikten sonra, HAD analizleri çalışması sonunda bulunan derinliğe bağlı dümen kuvvetleri ve momentinin de etkisini incelemek için DSM dinamik sistem manevra çalışmalarına ihtiyaç duyulmuştur. Statik sistemin cevabı, DSM'nin statik kararlı olduğu bölgenin sınırlarını çizmiştir. Bu derinliklere uygun olarak farklı derinliklerde DSM modeli için dinamik sistem manevra çalışmaları yapılmıştır. DSM modeli için yapılan dinamik sistem manevra çalışmalarında farklı derinliklerdeki hız düşüş (azalış) karakteristiği ve dönme çapı oluşumu testleri yapılmıştır.

5.3.1 Doğrusal hız karakteristiği

DSM simülasyon çalışmalarında dinamik sistem testleri için yapılan testlerden biri doğrusal hız düşüş testidir. Doğrusal hız düşüş testi, aynı itki kuvvetine karşılık 0 derece dümen ve sürüklenme açılarında doğrusal hareket eden farklı derinliklerdeki DSM simülasyonlarına uygulanmıştır. Başlangıç hızı 6.5 knot olan modellerin kararlı haldeki kalıcı hızları dikkate alınmıştır. Buna göre boyutsuz olarak hız düşüşleri aşağıdaki tabloda verilmiştir. Serbest yüzey etkileri ve dalga kuvvetlerinin artması sebebiyle yüzeye yaklaştıkça denizaltının kalıcı hızında artarak bir düşme meydana gelmektedir. Denizaltı için denizaltı ve konumunu belirten resim Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.3: Derinliğe bağlı hız düşüm yüzdesi.

Derinlik	% Hız düşümü
1.1D	32.75
2.2D	11.31
3.3D	4.55
6D	0.00

5.3.2 Dönme çapı ve hız düşüş değeri

Yapılan bir diğer dinamik simülasyon çalışması sabit dümen açısı için DSM simülasyon modelinin daimi dönme çapı ve bu şartlar altındaki hız düşüş değeridir. Karşılaştırma yapılırken ITTC kuralları göz önüne alınarak manevra performansı değerlendirilmiştir [38]. Değerlendirmelere göre DSM 1.1D derinlikten 2.2D derinliğe ilerlerken, denizaltı modeli dönme çapında %8 artma görülmüş ve 2.2D derinlikten 3.3D derinliğe ilerlerken ise dönme çapında %35 oranında azalma görülmüştür. Dönme çapı, IMO standartlarına göre tanımlanmıştır [39]. DSM modelinde, Çizelge 5.4'te sırası ile derinliğe ve dümen açısına göre dönme çapı, gemi boyu cinsinden verilmiştir.

Çizelge 5.4: Derinlik ve dümen açısına göre dönme çapı (Dd/L)

Dümen	Derinlik		
	1.1D	2.2D	3.3D
5 deg	55.18	59.71	44.03
10 deg	27.59	29.86	22.01
15 deg	18.39	19.90	14.744

Görülmektedir ki her derinlik için artan dümen açılarına karşı azalan dönme çapı gözlenirken, derinliğe bağlı çap değerlerine bakılırsa, aynı dümen açıları için en düşük çapın 3.3D'de ve en büyük çapın 2.2D'de meydana geldiği görülmektedir. Çizelge 5.5'te 10 derece dümen açısına ait derinliğe göre değişen yanal öteleme hızı ve savrulma açısal hızı değerleri boyutsuz olarak verilmiştir. Anlaşılabilir ki, en düşük yanal öteleme hızı 2.2D'de ve en büyük yanal öteleme hızı 3.3D'de oluşmaktadır. Böylece yanal öteleme hızının çap oluşumuna etkisi büyüktür denebilir. Çizelge 5.5'da görülmektedir ki 3D derinlik civarında işaret değiştiren N_v katsayısı aynı yöne uygulanan savrulma momentine karşılık 1.1D ve 2.2D derinliklere göre negatif bir yanal öteleme hızına sebep olmuştur. N_v katsayısının işaret değiştirmesinin fiziksel karşılığı bu değişim olmuştur. Yatay stabilitenin kararlı olduğu bölgede kalan 1.1D ve 2.2D derinliklerinde, 2.2D derinliğe ait yatay stabilitenin daha büyük olması sebebiyle, beklendiği gibi manevra performansı 1.1D derinlikteki manevra performansından daha düşüktür.

Çizelge 5.5: 10 derece dümen açısı için v ve r boyutsuz büyüklükleri.

Derinlik	v	r
1.1D	0.003	0.048
2.2D	0.002	0.058
3.3D	-0.006	0.085

Çizelge 5.6'de derinliğe ve dümen açısına karşı yüzde hız düşüm tablosu da verilmiştir. Buna göre tahmin edildiği gibi hız düşüşü artan dümen açısında ve yüzeye yaklaştıkça daha fazla artmıştır.

Çizelge 5.6: Dümen açısı ve derinliğe göre yüzde hız düşümü.

Dümen	Derinlik		
	1.1D	2.2D	3.3D
5 deg	32.96	11.76	5.12
10 deg	33.62	13.16	6.79
15 deg	34.64	15.32	9.42

Böylece DSM modeli için statik ve dinamik manevra testleri yapılmış ve sonuçları paylaşılmıştır. Statik ve dinamik manevra testleri sonucunda görülmüştür ki, yüzeye yakın hareketlerde derinliğe bağlı olarak değişen hidrodinamik türevler DSM modelinin manevra performansına büyük oranda etki etmektedir.

6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Çalışma sonucunda, DARPA Denizaltı geometrisinin derinliğe göre değişen hidrodinamik türevleri tespit edilmiş ve derinliğe göre değişen yatay stabilitesi incelenmiştir.Yatay stabilite çalışması incelenirken iki farklı geometri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, DSM' nin deney verilerini doğrular şekilde derin suda yatay stabiliteye sahip olmadığı fakat su yüzeyine yakın veya şnorkel durumlarında denizaltı (4.6D derinliğe kadar) yatay stabiliteye sahip olduğu bulunmuştur. Denizaltı modeli için daha önceki çalışmalardan seçilen derinlik değerlerine göre (1.1D, 2.2D, 3.3D ve 6D derinliklerde) HAD analizleri yapılmıştır ve ara derinlikler için elde edilen değerlere eğri uydurma uygulanmıştır.

Denizaltı modelinde yatay stabilite formülünü sağlayacak şekilde üç serbestlik dereceli doğrusal sistem tasarlanmış ve sayısal olarak çözülmüşür. Tasarlanan model için benzer çalışmalara uygun olarak ağdan bağımsızlık çalışmaları, doğrulama ve geçerleme çalışmaları yapılmıştır. Doğrusal modele ait hidrodinamik katsayı seti belirlenmiş ve HAD analizleri sonucu elde edilen veriler işlenerek belirlenen doğrusal katsayılar farklı derinliklere göre tespit edilmiştir. Denizaltı modelinin değişen derinliklere göre farklı katsayıya sahip olduğu görülmüştür.

Elde edilen katsayılar üç serbestlik dereceli olacak şekilde sabit itki kuvveti altında simülasyon modeline dahil edilmiştir ve gerçek zamanlı manevra simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Yine doğrusal dümen katsayılarını da içeren manevra simülasyon çalışmalarında statik ve dinamik manevra testleri icra edilmiş ve sonuçları paylaşılmıştır.

Denizaltı modeli statik ve dinamik testleri klas yapılarına uygun olarak ITTC kriterleri ve IMO standartları gözetilerek değerlendirilmiştir. Denizaltı modeli her ne kadar yüzeye yakın derinlikte yatay stabiliteye sahip olsa da DSM, [39] numaralı kaynakta belirtilen su üstü platformlar için önerilen manevra performansları kriterlerinden dönme kabiliyetine dahil olan taktik çap ve ilerleme manevra performanslarını sağlayamamıştır.

Derinliğe göre değişen bu katsayıların DSM manevra performansına etkisinin büyük olacağı düşünülerek karşılaştırma tabloları oluşturulmuş ve farklı derinlikte farklı dümen açılarına göre sonuçlar irdelenmiştir.

Derin sularda yatay stabilitesi olmayan DARPA modelinin, serbest su yüzeyine yaklaştıkça yatay stabiliteye sahip olduğu fakat bu değerin aşırı kararlılık bölgesine yakın olmasından kaynaklı manevra edilebilirliliğinin düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

Daha sonraki çalışmalar için öncelikle yalpa eksenini de ekleyerek dört, daha sonra ise düşey z ekseni ve baş kıç vurma momenti ekseni de eklenerek altı serbestlik dereceli bir model ile daha genel olarak manevra performansı incelenebilir. Düşey stabilite sayısının derinliğe göre tespiti için çalışmalar yapılabilir. DSM geometrik modeli ve dümen geometrisi geliştirilerek DSM'nin manevra performansları derinliğe bağlı olarak incelenebilir.

KAYNAKLAR

[1] **Kırıkbaş, O., Kınacı, Ö. K., & Bal, S.** Sualtı Araçlarının Manevra Karakteristiklerinin Değerlendirilmesi-I: Manevra Analizlerinde Kullanılan Yaklaşımlar. *Gemi ve Deniz Teknolojisi*, (219), 6-58.

[2] **Amiri, M. M., Sphaier, S. H., Vitola, M. A., & Esperança, P. T.** (2019). URANS investigation of the interaction between the free surface and a shallowly submerged underwater vehicle at steady drift. *Applied Ocean Research*, *84*, 192-205.

[3] **Duman, S., & Bal, S.** (2019). A quick-responding technique for parameters of turning maneuver. *Ocean Engineering*, *179*, 189-201.

[4] **Kırıkbaş, O., Kınacı, Ö. K., & Bal, S.** (2021). Su Altı Araçlarının Manevra Karakteristiklerinin Değerlendirilmesi-II: Akışkan Sınırlarının Etkileri. *Gemi ve Deniz Teknolojisi*, (220), 135-174.

[5] **Kirikbaş, O., Bal, S., & Baykal, M. A.** (2021). Comparison Of The Rules Of Classification Societies (IACS Members) In The Area Of Submersible Maneuvering. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (28), 178-183.

[6] **Sukas, O. F., Kinaci, O. K., & Bal, S.** (2019). Theoretical background and application of MANSIM for ship maneuvering simulations. *Ocean Engineering*, *192*, 106239.

[7] **Sezen, S., Dogrul, A., Delen, C., & Bal, S.** (2018). Investigation of self-propulsion of DARPA Suboff by RANS method. *Ocean Engineering*, *150*, 258-271.

[8] **Sukas, O. F., Kinaci, O. K., & Bal, S.** (2021). Asymmetric ship maneuvering due to twisted rudder using system-based and direct CFD approaches. *Applied Ocean Research*, *108*, 102529.

[9] **Sukas, O. F., Kinaci, O. K., & Bal, S.** (2019). System-based prediction of maneuvering performance of twin-propeller and twin-rudder ship using a modular mathematical model. *Applied Ocean Research*, *84*, 145-162.

[10] **Efremov, D. V., & Milanov, E. M.** (2019). Hydrodynamics of DARPA SUBOFF submarine at shallowly immersion conditions. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, *13*(2).

[11] **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*. David Taylor Research Center Bethesda MD Ship Hydromechanics Dept.

[12] **Ashok, A., & Smits, A. J.** (2013). The turbulent wake of a submarine model in pitch and yaw. In *Eighth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena*. Begel House Inc..

[13] **Chase, N.** (2012). *Simulations of the DARPA Suboff submarine including self-propulsion with the E1619 propeller*. IOWA UNIV IOWA CITY.

[14] **Racine, B., & Paterson, E.** (2005, Haziran). CFD-based method for simulation of marine-vehicle maneuvering. In *35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit* (p. 4904).

[15] **Abkowitz, M. A.** (1964). Ship hydrodynamics-steering and manoeuvrability. *Hydro-and Aerodynamics Laboratory, Hydrodynamics Section, Lyngby, Denmark, Report No. Hy-5, Lectures*.

[16] **Gertler, M., & Hagen, G. R.** (1967). *Standard equations of motion for submarine simulation*. David w Taylor Naval Ship Research and Development Center Bethesda MD.

[17] **Feldman, J.** (1979). *Dtnsrdc revised standarrd submarine equations of motion*. David W Taylor Naval Ship Research And Development Center Bethesda Md Ship Performance Dept.

[18] **Yoon,** Hyunse. "Phase-averaged stereo-PIV flow field and force/moment/motion measurements for surface combatant in PMM maneuvers." PhD (Doctor of Philosophy) thesis, University of Iowa, 2009. https://doi.org/10.17077/etd.jgq7s29l

[19] **ITTC, S.** (2008). Final Report and Recommendation to the 25th ITTC. *Proceedings of the 25th ITTC. The Seakeeping Committee*.

[20] **Doğrul, A.** (2019). Hydrodynamic Investigation of a Submarine Moving Under Free Surface. *Journal of ETA Maritime Science*, *7*(3), 212-227.

[21] **Anderson, J. D., & Wendt, J.** (1995). *Computational fluid dynamics* (Vol. 206, p. 332). New York: McGraw-Hill.

[22] **Cd-Adapco, S.** (2017). STAR CCM+ user guide version 12.04. *CD-Adapco: New York, NY, USA*.

[23] **Groves, N. C., Huang, T. T., & Chang, M. S.** (1989). *Geometric characteristics of DARPA suboff models:(DTRC Model Nos. 5470 and 5471)*. David Taylor Research Center.

[24] **Li, D., Yang, Q., Zhai, L., Wang, Z., & He, C. L.** (2021). Numerical investigation on the wave interferences of submerged bodies operating near the free surface. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, *13*, 65-74.

[25] **ITTC, R.** (2011). procedures and guidelines: practical guidelines for ship CFD applications, 7.5. *ITTC: Boulder, CO, USA*.

[26] **Amini Foroushani, J., & Sabzpooshani, M.** (2021). An approach for the estimation of hydrodynamic coefficients of an underwater vehicle in off-design velocities. *Journal of Marine Science and Technology*, *26*(2), 368-381.

[27] **Bettle, M. C., Gerber, A. G., & Watt, G. D.** (2009). Unsteady analysis of the six DOF motion of a buoyantly rising submarine. *Computers & Fluids*, *38*(9), 1833-1849.

[28] **Watt, G. D., & Knill, K. J.** (1999). *A Preliminary Validation of the RANS Code TASCflow Against Model Scale Submarine Hydrodynamic Data*. Defence Research Establishment Atlantic Dartmouth, Nova Scotia Canada.

[29] **Duman, S., & Bal, S.** (2021). Prediction of the acceleration and stopping manoeuvres of a bare hull surface combatant by closed-form solutions and CFD. *Ocean Engineering*, *235*, 109428.

[30] **Liu, Y., Li, Y., & Shang, D.** (2019). The hydrodynamic noise suppression of a scaled submarine model by leading-edge serrations. *Journal of Marine Science and Engineering*, *7*(3), 68.

[31] **Duman, S., & Bal, S.** (2017). Prediction of the turning and zig-zag maneuvering performance of a surface combatant with URANS. *Ocean systems engineering-an international journaL*, *7*(4), 435-460.

[32] **Sakaki, A., & Kerdabadi, M. S.** (2020). Experimental and numerical determination of the hydrodynamic coefficients of an autonomous underwater vehicle. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*.

[33] **Ray, A., Singh, S. N., & Seshadri, V.** (2009, Ocak). Evaluation of linear and nonlinear hydrodynamic coefficients of underwater vehicles using CFD. In *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering* (Vol. 43444, pp. 257-265).

[34] **Sung, C. H., Jiang, M. Y., Rhee, B., Percival, S., Atsavapranee, P., & Koh, I. Y.** (2002, Temmuz). Validation of the flow around a turning submarine. In *The Twenty-Fourth Symposium on Naval Hydrodynamics, Fukuoka, Japan*.

[35] **Inoue, S., Hirano, M., & Kijima, K.** (1981). Hydrodynamic derivatives on ship manoeuvring. *International Shipbuilding Progress*, *28*(321), 112-125.

[36] **Hoerner, S. F.** (1965). Fluid-dynamic drag. *Hoerner fluid dynamics*.

[37**] Fossen, T. I.** (1999). Guidance and control of ocean vehicles. *University of Trondheim, Norway, Printed by John Wiley & Sons, Chichester, England, ISBN: 0 471 94113 1, Doctors Thesis*.

[38] **ITTC, R.** (2017). Full Scale Manoeuvring Trials International Towing Tank Conference, 7.5. *ITTC: Boulder, CO, USA*.

[39] **IMO.** (2002). Explanatory Notes to the Standards for Ship Manoeuvrability. *Ref. T4/3.01, MSC/Circ. 1053*.

[40] **Sukas, Ö. F., Kınacı, Ö. K., & Bal, Ş.** (2017). Gemilerin Manevra Performans Tahminleri için Genel Bir Değerlendirme-I. *Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi, 23*, 37-75.

[41] **Dong, K., Wang, X., Zhang, D., Liu, L., & Feng, D.** (2022). CFD Research on the Hydrodynamic Performance of Submarine Sailing near the Free Surface with Long-Crested Waves. *Journal of Marine Science and Engineering*, *10*(1), 90.

EKLER

EK A: Matematik modelin türetilmesi

EK A: Matematik modelin türetilmesi

Altı serbestlik derecesini tam olarak 12 durum değişkeni mevcuttur. Bunlar u, v, w, p, q, r, x0, y0, z0, φ ψ ϕ terimleridir. İlk 6 (altı) değişken, x, y, z gemi koordinat sistemindeki çizgisel ve açısal hızları gösterir. Sonraki ilk 3 (üç) değişken atalet veya yer koordinat sistemindeki pozisyonları, son 3 (üç) değişken ise gemi koordinat sisteminin atalet veya yer koordinat sistemine göre oryantasyonunu tanımlayan ve sırasıyla yalpa, baş-kıç vurma ve savrulma olarak isimlendirilen Euler açılarını temsil eder. Bu terimlerle aşağıdaki altı serbestlik dereceli rijit body denklemi elde edilir. Altı serbestlik dereceli rijit body hareket denklemleri dış güçler (f0), dış momentler (m0), doğrusal hızlar (v0), açısal hızlar (w) ve yer çekim etkilerinin (G) toplamı olarak değerlendirilebilir [10]. 6 serbestlik dereceli denklem Şekil A.1'de verilmiştir.

$$
\begin{aligned}
m\left[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})\right] &= X \\
m\left[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})\right] &= Y \\
m\left[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})\right] &= Z \\
I_x\dot{p} + (I_z - I_y)qr + m\left[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)\right] &= K \\
I_y\dot{q} + (I_x - I_z)rp + m\left[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)\right] &= M \\
I_z\dot{r} + (I_y - I_x)pq + m\left[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)\right] &= N
\end{aligned}
$$

Şekil A.1: 6 DOF hareket denklemleri [10].

İlk üç denklem ileri, yanal ve düşey ötelenme hareketlerini temsil etmektedir. Son 3 denklem ise sırasıyla yalpa, baş-kıç vurma ve savrulma dönme hareketlerini temsil etmektedirler. Referans noktası denizaltı geometrisinin ağırlık merkezi seçildiğinde, yukarıdaki denklemde bazı terimlerin çarpımı sıfır olmaktadır. Aşağıda verilen m terimleri kütle matrisini temsil etmektedir ve kütle matrisi 6*6'lık bir kare matristir. Bu matriste geometrik olarak birbirinin etkisini sıfırlayan etkiler mevcuttur. DSM modelinde üç serbestlik derecesi kullanıldığı için kütle matrisi 3*3lük forma düşer. Ayrıca, iskele sancak simetrisi mevcut olduğu için kütle matrisi denklem A 1.1'deki şekli alır.

$$
M = \begin{bmatrix} m11 & 0 & 0 \\ 0 & m22 & m23 \\ 0 & m32 & m33 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} mx & 0 & 0 \\ 0 & my & Iyz \\ 0 & Iyz & Iz \end{bmatrix} \qquad \text{(A 1.1)}
$$

Akışkanın kinetik enerjisi olduğu için ek su kütlesi terimi kütle matrisine eklenmelidir. Akışkan için ek su kütlesi aşağıdaki matris formunu almaktadır. İskele sancak simetrik

geometrisinden dolayı değeri 0 olan terimler mecvuttur. Sonuçta denklem A 1.2'deki şekli alır.

$$Ma = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{r}} \\ 0 & N_{\dot{v}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad \text{(A 1.2)}$$

Sonuç olarak elde edilen toplam kütle matrisi denklem A 1.3'teki şekli almaktadır.

$$M = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mxg - Y_{\dot{r}} \\ 0 & mxg - N_{\dot{v}} & Iz - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad \text{(A 1.3)}$$

Bundan sonra kullanılacak denklemde üç serbestlik derecesi mevcut olduğu için, ayrıca denizaltı yg ve zg ağırlık merkezleri referans geometrisine göre orjinde olduğundan, 12 terimden sadece u, v, r, x0 terimleri 0 olmayacaktır. Böylelikle 3 eksen için rijit body denklemlerini tekrar yazılırsa, denklem A 1.4'teki denklem seti elde edilecektir.

$$\begin{bmatrix} m - \frac{\rho}{2}L^3 X'_{\dot{u}} & 0 & -y_G m \\ 0 & m - \frac{\rho}{2}L^3 Y'_{\dot{v}} & x_G m - \frac{\rho}{2}L^4 Y'_{\dot{r}} \\ -y_G m & x_G m - \frac{\rho}{2}L^4 N'_{\dot{v}} & I_z - \frac{\rho}{2}L^5 N'_{\dot{r}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ N \end{bmatrix} \quad \text{(A 1.4)}$$

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Furkan ÇAVDAR

Doğum Tarihi ve Yeri :

E-posta :

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2019, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği
- **Lisans** **:** 2019, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2019 yılından beri TÜBİTAK BİLGEM'de Araştırmacı olarak görev yapmaktadır.